UN WATER

unesco

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022

AGUAS SUBTERRÁNEAS

Hacer visible el recurso invisible



unesco
Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

PNUD

CEPE, CEPAL, CESPAO, CESPAP

unesco
Programa Hidrológico Intergubernamental

ONU-HABITAT
POR UN MEJOR FUTURO URBANO

UNIDO

GRUPO BANCO MUNDIAL

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022

AGUAS SUBTERRÁNEAS

Hacer visible el recurso invisible

Publicado en 2022 por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura,
7, place de Fontenoy, 75352 París 07 SP, Francia.

© UNESCO 2022

Este informe es publicado por la UNESCO en nombre de ONU-Agua. La lista de miembros y socios de ONU-Agua se encuentra en el siguiente sitio web www.unwater.org.

ISBN 978-92-3-300193-0



Esta publicación está disponible en acceso abierto bajo la licencia Atribución-CompartirIgual 3.0 (CC-BY-SA 3.0 IGO) (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/). Al utilizar el contenido de esta publicación, los usuarios aceptan someterse a las condiciones de uso del Repositorio de Acceso Abierto de la UNESCO (http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-sp).

La presente licencia se aplica exclusivamente al contenido textual de la publicación. Para la utilización de cualquier material que no esté claramente identificado como perteneciente a la UNESCO, deberá solicitarse autorización previa al propietario de los derechos de autor.

Las denominaciones empleadas y la presentación de los datos a lo largo de esta publicación no implican la expresión de ninguna opinión por parte de la UNESCO sobre el estatus legal de ningún país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, ni sobre la delimitación de sus fronteras o límites. Del mismo modo, las fronteras y los nombres mostrados y la designación utilizada en los mapas no implican la aprobación o aceptación oficial por parte de las Naciones Unidas.

Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no reflejan necesariamente las de la UNESCO y no comprometen a la Organización. Los contenidos han sido aportados por los miembros y socios de ONU-Agua, así como por otras personas que figuran en las páginas de los capítulos. La UNESCO y el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos no son responsables de los errores en el contenido proporcionado ni de las discrepancias en los datos y el contenido entre los capítulos aportados. El Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos ofreció la oportunidad de que los individuos figuraran como autores y colaboradores o fueran reconocidos en esta publicación. El Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos no es responsable de ninguna omisión en este sentido.

El capítulo 4 y la sección 8.1 contienen material del British Geological Survey © UKRI 2022.

Sección 8.2: Annukka Lipponen, Sonja Koeppel y Sarah Tiefenauer-Linardon © 2022 Naciones Unidas.

Capítulo 12: Annukka Lipponen, Sonja Koeppel y Sarah Tiefenauer-Linardon © 2022 Naciones Unidas.

Capítulo 13: Financiar la sostenibilidad © by Banco Internacional para la Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial. Esta traducción no ha sido creada por el Banco Mundial y no debe considerarse una traducción oficial del Banco Mundial. El Banco Mundial no se hace responsable de ningún contenido o error en esta traducción.

Título original: *The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater, Making the invisible visible*

Cita sugerida:
Naciones Unidas, *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas, Hacer visible el recurso invisible*. UNESCO, París.

Ilustración de cubierta: Davide Bonazzi
Coordinación de la edición en español, traducción y corrección de estilo: Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México, A.C. (ANEAS)
Diseño gráfico y maquetación: Marco Tonsini

B R E V E R E S U M E N

El enorme potencial de las aguas subterráneas y la necesidad de gestionarlas de forma sostenible ya no pueden seguir siendo ignorados.

Las aguas subterráneas, que representan aproximadamente el 99 % de la totalidad del agua dulce en estado líquido de la Tierra, tienen el potencial de proporcionar a las sociedades ingentes beneficios y oportunidades sociales, económicas y medioambientales. Dichas aguas ya constituyen la mitad del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial, incluyendo el agua potable para la gran mayoría de la población rural que no recibe el agua a través de sistemas de abastecimiento públicos o privados, y alrededor del 25 % de toda el agua extraída para el riego. Sin embargo, este recurso natural es a menudo poco conocido y, por consiguiente, se subestima, se gestiona mal e incluso se sobreexplota.



Las aguas subterráneas son fundamentales para la lucha contra la pobreza, la seguridad alimentaria e hídrica, la creación de empleos dignos, el desarrollo socioeconómico y la resistencia de las sociedades y de las economías al cambio climático. La dependencia de las aguas subterráneas no hará más que aumentar, principalmente debido al incremento de la demanda de agua por parte de todos los sectores, combinada con la creciente variación de los patrones de precipitación.

El informe describe los retos y las oportunidades asociados al desarrollo, a la gestión y a la gobernanza de las aguas subterráneas en todo el mundo. Pretende facilitar una clara comprensión del papel que desempeñan las aguas subterráneas en la vida cotidiana, de sus interacciones con las personas y de las oportunidades para optimizar su uso con el fin de garantizar la sostenibilidad a largo plazo de este recurso ampliamente disponible pero vulnerable.

Liberar todo el potencial de las aguas subterráneas exigirá esfuerzos firmes y concertados para gestionarlas y utilizarlas de forma sostenible. Y todo empieza por hacer visible este recurso invisible.

unesco

UN WATER

"Puesto que las guerras nacen en la mente de los hombres y de las mujeres, es en la mente de los hombres y de las mujeres donde deben erigirse los baluartes de la paz".

Índice

Prólogo por Audrey Azoulay, *Directora General de la UNESCO* viii

Prólogo por Gilbert F. Houngbo, *Presidente de ONU-Agua y Presidente del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola* ix

Prefacio x

Equipo del WWDR 2022 xii

Agradecimientos xiii

Resumen ejecutivo **1**

Prólogo Estado de los recursos hídricos subterráneos **13**

Volumen de agua dulce 14

Renovación del agua dulce 15

Extracción de agua dulce, estrés hídrico y escasez de agua 17

Recursos hídricos subterráneos y su distribución geográfica 18

Extracción y uso de aguas subterráneas 20

Limitaciones naturales específicas del área para la extracción de aguas subterráneas 23

Capítulo 1 Introducción **25**

1.1 Objetivo y alcance de este informe 26

1.2 Propiedades y características únicas de las aguas subterráneas y de los sistemas de aguas subterráneas 27

1.3 Los acuíferos, sus principales características y los recursos hídricos subterráneos que contienen 28

1.4 Breve historia de la explotación de las aguas subterráneas 31

1.5 Los múltiples servicios que ofrecen las aguas subterráneas a la humanidad y a los ecosistemas 32

1.6 Interconexiones globales 33

1.7 Las aguas subterráneas en el contexto de las agendas y acuerdos globales 35

1.8 Retos relacionados con las aguas subterráneas 36

1.9 Oportunidades para aumentar los beneficios de las aguas subterráneas 39

Capítulo 2 Aspectos jurídicos e institucionales de la gobernanza de las aguas subterráneas **41**

2.1 Gobernanza y gestión de las aguas subterráneas 42

2.2 Instrumentos jurídicos 44

2.3 Aspectos institucionales 47

Capítulo 3 Aguas subterráneas y agricultura **49**

3.1 Introducción 50

3.2 Uso de las aguas subterráneas en el sector agrícola 50

3.3 Impacto de la agricultura en la cantidad de aguas subterráneas 54

3.4 Tierras agrícolas con capas freáticas poco profundas 58

3.5 Impacto de la agricultura en la calidad de las aguas subterráneas 58

3.6 Vínculos entre las aguas subterráneas y la energía en la irrigación 61

Índice

Capítulo 4 Aguas subterráneas para los asentamientos humanos 63
4.1 Introducción 64
4.2 Abastecimiento de agua urbana 66
4.3 Abastecimiento de agua en zonas rurales 71
4.4 Preocupación por el medio ambiente 74
4.5 Papel de las partes interesadas 76
4.6 Observaciones finales 77

Capítulo 5 78
5.1 Contexto 79
5.2 Extracción y uso de aguas subterráneas en la industria 79
5.3 Industria, calidad de las aguas subterráneas y contaminación 84
5.4 Explotación minera y aguas subterráneas 86
5.5 Energía, producción de electricidad y aguas subterráneas 88
5.6 La industria y la responsabilidad de la gestión de las aguas subterráneas 92
5.7 Avanzar 94

Capítulo 6 Aguas subterráneas y ecosistema 95
6.1 Introducción a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas 96
6.2 Ubicuidad de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas 99
6.3 Servicios ecosistémicos de las aguas subterráneas y amenazas 102
6.4 Gestión conjunta del agua y la tierra, soluciones basadas en la naturaleza y protección de los ecosistemas 105

Capítulo 7 Aguas subterráneas, acuíferos y cambio climático 109
7.1 Introducción 110
7.2 Impacto del cambio climático en los recursos hídricos subterráneos 110
7.3 Resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas acuíferos al cambio climático 117
7.4 Adaptaciones de las aguas subterráneas al cambio climático: respuestas humanas ..119
7.5 Mitigación del cambio climático basada en las aguas subterráneas a través de la energía geotérmica baja en carbono 119
7.6 Mitigación del cambio climático mediante la captura y el secuestro de carbono 123

Capítulo 8 Perspectivas regionales sobre las aguas subterráneas 125
8.1 África Subsahariana 126
8.2 Europa y América del Norte 132
8.3 América Latina y el Caribe 140
8.4 Asia y el Pacífico 145
8.5 Región árabe 150

Capítulo 9 Construir y actualizar la base de conocimientos 156
9.1 Introducción 157
9.2 Estudio de las aguas subterráneas: caracterización y evaluación 157
9.3 Supervisión de las aguas subterráneas 161
9.4 Análisis de escenarios e incertidumbre de las predicciones 165
9.5 Compartir la base de conocimientos y crear capacidades 166

Índice

Capítulo 10 Políticas y planificación en materia de aguas subterráneas 169
10.1 Políticas en materia de aguas subterráneas 170
10.2 Ejemplos de políticas de aguas subterráneas 173
10.3 Planificación de la gestión de las aguas subterráneas 173
10.4 Ejemplos de planificación de la gestión de las aguas subterráneas 176

Capítulo 11 Gestión de las aguas subterráneas 178
11.1 Introducción 179
11.2 Requisitos de datos y conocimientos 179
11.3 Control de las retiradas 179
11.4 Proteger la calidad de las aguas subterráneas 182
11.5 Enfoques de gestión integrada 184
11.6 Conclusiones 185

Capítulo 12 Acuíferos transfronterizos 187
12.1 Introducción 188
12.2 Conocimiento actual de los acuíferos transfronterizos 188
12.3 Desafíos específicos de los acuíferos transfronterizos 189
12.4 Aspectos jurídicos e institucionales internacionales 192
12.5 Cooperación en materia de acuíferos transfronterizos 192
12.6 Beneficios de la cooperación transfronteriza 194

Capítulo 13 Financiación para la sostenibilidad 195
13.1 Financiación disponible y necesaria actualmente 197
13.2 Establecer fuentes de financiación permanentes, estructurales y adecuadas 198
13.3 Aprovechar mejor la financiación disponible actualmente 198

Capítulo 14 Conclusiones 203
14.1 Perspectivas y retos 204
14.2 Avanzando 206
14.3 Coda 210

Referencias 211

Abreviaturas y siglas 245

Cuadros, figuras y tablas

Cuadros

Cuadro 1.1 Sistemas de aguas subterráneas ... 27
Cuadro 1.2 ¿Qué es un acuífero? ... 28
Cuadro 2.1 Definición de la gobernanza de las aguas subterráneas ... 42
Cuadro 2.2 Definición de la gestión de las aguas subterráneas ... 44
Cuadro 2.3 Cambio de derechos de extracción de agua "basados en el volumen" a derechos "basados en la cuota" en Nueva Gales del Sur (Australia) ... 46
Cuadro 3.1 Agotamiento de las aguas subterráneas en Egipto ... 56
Cuadro 3.2 Tierras agrícolas de regadío con agua superficial y capa freática poco profunda: el caso del Pakistán ... 57
Cuadro 3.3 Energía e irrigación en el África Subsahariana ... 60
Cuadro 3.4 Aguas subterráneas y energía en la India ... 62
Cuadro 4.1 Un ejemplo de gestión exitosa de la extracción de aguas subterráneas urbanas en Hamburgo (Alemania) ... 66
Cuadro 4.2 Plan de uso conjunto para conservar un acuífero crítico en Lima ... 69
Cuadro 4.3 Las aguas subterráneas contribuyen a la supervivencia en caso de graves crisis de abastecimiento de agua en Chennai (India) ... 70
Cuadro 4.4 Un pozo profundo proporciona agua limpia a los refugiados rohinyás en Bangladesh ... 72
Cuadro 4.5 Dependencia importante de las aguas subterráneas con importantes riesgos en Lusaka ... 75
Cuadro 5.1 Beneficios del control de la calidad de las aguas subterráneas: el caso de AngloGold Ashanti en Cerro Vanguardia S.A. (Argentina) ... 88
Cuadro 5.2 Vertederos de cenizas de carbón: el legado de la contaminación de las aguas subterráneas ... 92
Cuadro 5.3 Una asociación entre PT Multi Bintang y la ONUDI ... 93
Cuadro 6.1 Cartografía de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en California (Estados Unidos) ... 98
Cuadro 6.2 Aguas subterráneas, humedales de importancia internacional (sitios Ramsar) y sitios designados por la UNESCO, como los sitios del Patrimonio Mundial, las reservas de biosfera y los geoparques ... 105
Cuadro 6.3 Soluciones basadas en la naturaleza para proteger los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas ... 107
Cuadro 7.1 Estrategias de recarga gestionada de acuíferos (MAR) ... 120
Cuadro 8.1 Crisis de abastecimiento de agua en Ciudad del Cabo ... 131
Cuadro 8.2 El programa de Recarga Artificial Gestionada (MAR) de Windhoek ... 131
Cuadro 8.3 Estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea en la Unión Europea ... 135
Cuadro 8.4 El reto de pasar de la evaluación hidrogeológica a la contabilización de las presiones humanas ... 136
Cuadro 8.5 El Acuerdo del Acuífero Guaraní (GAA) ... 144
Cuadro 8.6 Contratos de gestión de los acuíferos en Marruecos ... 155
Cuadro 8.7 Aplicación del MAR en Abu Dabi ... 155
Cuadro 10.1 Puntos de acción para el proceso de planificación de los acuíferos prioritarios ... 174
Cuadro 11.1 Gestión de la cantidad y la extracción de aguas subterráneas: permiso de pozos y aumento para reducir los impactos (cuenca del río South Platte, Colorado, Estados Unidos) ... 182
Cuadro 11.2 Áreas de protección de fuentes de agua subterránea ... 184
Cuadro 11.3 Recogida de aguas pluviales para el almacenamiento y la recuperación de acuíferos: ejemplo de un proyecto MAR, área de Adelaida (Australia) ... 186
Cuadro 12.1 Iniciativa internacional para la gestión de los recursos acuíferos compartidos ... 189
Cuadro 12.2 Protección y uso del Sistema Acuífero Transfronterizo del Karst Dinárico (DIKTAS) ... 193
Cuadro 12.3 El mecanismo de cooperación multinacional de Stampriet: el primer mecanismo de cooperación de acuíferos transfronterizos anidado en un organismo de cuenca ... 194
Cuadro 12.4 Cooperación en la cuenca del acuífero senegalés-mauritano para promover la paz y la resiliencia entre los Estados ... 195
Cuadro 13.1 Combinación de tasas y aranceles para mejorar la gestión, el control y el desarrollo de los recursos hídricos subterráneos en el Perú ... 200
Cuadro 13.2 Combinación de financiación mixta con tecnologías emergentes para suministrar agua potable a las aldeas rurales de Tanzanía ... 201
Cuadro 13.3 Pago por servicios de los ecosistemas con financiación del sector privado: el caso de Kumamoto (Japón) ... 202

Figuras

Figura 1 Volúmenes estimados de agua dulce líquida presentes en los diferentes continentes 15
Figura 2 Estimación de la renovación del agua dulce en los distintos continentes, 2015 16
Figura 3 Extracción de agua dulce en 2017, agregada por continente y por uso del sector del agua (km³/año) 17
Figura 4 Promedio anual mensual de escasez de agua azul con una resolución de 30x30 minutos de arco, 1996-2005 19
Figura 5 Número de meses al año en que la escasez de agua azul supera el 1,0, 1996-2005 19
Figura 6 Recursos hídricos subterráneos del mundo 20
Figura 7 Mapa mundial de la presencia conocida de aguas subterráneas dulces y salobres en alta mar 21
Figura 8 Zonas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión de agua de mar y a la subida del nivel del mar 23
Figura 9 Zonas calientes mundiales de hundimiento del terreno inducido por la extracción de aguas subterráneas 24
Figura 1.1 Sección transversal vertical que muestra los acuíferos, las unidades de confinamiento y la zona no saturada 29
Figura 1.2 Evolución de la extracción total de aguas subterráneas en determinados países, 1950-2020 32
Figura 1.3 Los múltiples servicios que ofrecen los sistemas de aguas subterráneas 33
Figura 1.4 Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 35
Figura 1.5 Cobertura de agua potable regional y mundial, 2015-2020 (%) 36
Figura 2.1 Principales elementos de la gobernanza y de la gestión de las aguas subterráneas, desde los principios políticos hasta los enfoques de aplicación 43
Figura 3.1 Estimación de la extracción total de aguas subterráneas y el porcentaje destinado a la irrigación para los países seleccionados en 2010 52
Figura 3.2 Descenso del nivel freático en una selección de los principales acuíferos del mundo 55
Figura 4.1 Resumen esquemático de las fuentes de agua urbanas y su uso e interacción 67
Figura 4.2 Evolución típica del abastecimiento urbano de agua 68
Figura 5.1 Extracciones de agua industrial autoabastecida en los Estados Unidos 80
Figura 5.2 Uso del agua durante el ciclo de vida de un proyecto minero 87
Figura 5.3 Origen y uso del agua dulce en los Estados Unidos, 2015 89
Figura 5.4 Energía utilizada para diversos procesos en el sector del agua 91
Figura 5.5 Impulsores de valores corporativos y comunitarios para la gestión del agua 94
Figura 6.1 Ejemplo de un ecosistema dependiente de las aguas subterráneas: una vista aérea de las llanuras de inundación y las islas en el Delta del Okavango (Botswana) 96
Figura 6.2 Interacciones entre las aguas subterráneas, los ecosistemas, la actividad humana y las soluciones basadas en la naturaleza 97
Figura 6.3 Patrones globales de dependencia de las aguas subterráneas, puntos calientes de amenazas regionales y prioridades de conservación y gestión de los ecosistemas acuáticos y terrestres 101
Figura 6.4 Conexión de los tipos de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas con los servicios ecosistémicos que proporcionan 102
Figura 6.5 Impactos ecológicos de la disminución de la calidad y cantidad de las aguas subterráneas 104
Figura 7.1 Interacciones clave entre las aguas subterráneas y el cambio climático: los impactos directos e indirectos del cambio climático afectan a los sistemas de aguas subterráneas 111
Figura 7.2 Cambios proyectados en la precipitación media anual a nivel mundial bajo el cambio climático 112
Figura 7.3 Cambios en el almacenamiento mensual de aguas subterráneas y en las precipitaciones anuales en cuatro grandes sistemas acuíferos de áreas secas de los Estados Unidos y Australia 114
Figura 7.4 Impacto de la subida del nivel del mar (SLR) en la intrusión de agua de mar en un sistema acuífero costero no confinado en pendiente 116
Figura 7.5 Diagrama esquemático que muestra los diferentes tipos de sistemas de energía geotérmica, incluidos el almacenamiento de energía térmica en acuíferos (ATES), la bomba de calor geotérmica (GSHP) y el sistema geotérmico mejorado (EGS) 122
Figura 8.1 Resistencia de las aguas subterráneas al cambio climático: un elevado almacenamiento de aguas subterráneas amortigua los cambios, a corto plazo, de las precipitaciones, y una elevada recarga media de aguas subterráneas a largo plazo permite que un acuífero se recupere rápidamente después de una sequía 128
Figure 8.2 Distribución de los principales tipos de acuíferos en África 129
Figura 8.3 Agua dulce subterránea extraída como porcentaje del agua dulce total (bruta) extraída en países seleccionados (último año disponible) 133
Figura 8.4 Porcentaje de área de masas de agua subterránea "no en buen estado químico" por demarcación hidrográfica 139
Figura 8.5 Tasa de recarga en los principales sistemas de aguas subterráneas de América Latina y el Caribe 141
Figura 8.6 Recursos hídricos subterráneos de Asia, Australia y Oceanía 146
Figura 8.7 Origen de la extracción de agua en determinados Estados árabes, por fuente 151

Figura 8.8 Sistemas acuíferos transfronterizos en la región árabe ... 152
Figura 8.9 Cambio en el almacenamiento de agua subterránea (espesor equivalente de agua líquida) en la región árabe entre 2002 y 2019 utilizando los datos de la misión GRACE (en cm) ... 153
Figura 9.1 Un ejemplo de mapa hidrogeológico con una sección transversal ... 160
Figura 9.2 Piezómetro moderno con un registrador de datos y una explicación para el público (Parque Nacional De Alde Feanen, Provincia de Frisia, Países Bajos) ... 162
Figura 9.3 Grupo de sondeos para controlar los niveles de agua a diferentes profundidades (sobrecarga, lecho de roca poco profundo y profundo) en un sitio del este de Irlanda ... 163
Figura 9.4 Indicador de sequía de aguas subterráneas poco profundas basado en GRACE para los Estados Unidos ... 164
Figura 9.5 Formas seleccionadas de presentar los datos y la información sobre las aguas subterráneas, en relación con los usuarios previstos ... 166
Figura 9.6 Sistema mundial de información sobre las aguas subterráneas (GGIS) ... 168
Figura 10.1 ¿Qué es una política? Un modelo del estado de Nueva Gales del Sur (Australia) ... 170
Figura 10.2 Estructura institucional para el desarrollo de las políticas relativas a las aguas subterráneas ... 172
Figura 10.3 Etapas y factores en la elaboración de un plan de gestión de aguas subterráneas ... 175
Figura 11.1 Fuentes de contaminación que amenazan la calidad de las aguas subterráneas ... 182
Figura 12.1 Acuíferos transfronterizos del mundo ... 188
Figura 12.2 El bombeo de agua subterránea de un pozo en el país A puede tener un impacto en la parte del acuífero del país B ... 190
Figura 13.1 Valor económico total de las aguas subterráneas ... 199

Tablas

Tabla 1 Extracciones de agua subterránea en 2017, agregadas por las principales regiones del mundo ... 22
Tabla 2 Desglose de la extracción de agua subterránea en 2017 por sector de uso del agua y por continente ... 22
Tabla 3.1 Áreas de irrigación por región y a nivel global, incluyendo la cuota de agua subterránea ... 52
Tabla 4.1 Datos de países seleccionados sobre la extracción de aguas subterráneas urbanas ... 65
Tabla 4.2 Resumen de los beneficios de las fuentes del agua subterránea para los servicios de distribución de agua ... 66
Tabla 4.3 Escala de servicios de agua potable con uso de aguas subterráneas ... 73
Tabla 5.1 Quince países con las mayores extracciones anuales de agua subterránea estimadas, 2010 ... 80
Tabla 5.2 Los nueve países con la mayor extracción anual de agua industrial (km^3/año) ... 81
Tabla 5.3 Uso de agua en el procesamiento textil en los Estados Unidos (en l/kg de producción) ... 82
Tabla 5.4 Contaminantes comunes de las aguas subterráneas industriales por fuente ... 84
Tabla 5.5 Impactos en las aguas subterráneas de la minería activa y heredada ... 87
Tabla 5.6 Consumo de agua en la generación de energía termoeléctrica en el Canadá (2017), por fuente ... 90
Tabla 8.1 Algunas características generales de la gobernanza de las aguas subterráneas para cada subregión, desde una perspectiva de integración regional (solo a título indicativo) ... 134
Tabla 8.2 Respuestas seleccionadas de gobernanza y/o gestión a los desafíos de las aguas subterráneas en cada subregión (solo indicativo) ... 139
Tabla 9.1 Parámetros incluidos frecuentemente en el control de la calidad de las aguas subterráneas ... 158
Tabla 10.1 Ejemplos de acciones que pueden especificarse en los planes de gestión de las aguas subterráneas ... 176
Tabla 11.1 Métodos de control de las extracciones de aguas subterráneas ... 180
Tabla 12.1 Datos e información necesarios para evaluar y gestionar un acuífero transfronterizo ... 191
Tabla 12.2 Resultados resumidos del seguimiento global Indicador 6.5.2, 2017 y 2020 ... 194

Prólogo

por **Audrey Azoulay**, *Directora General de la UNESCO*

El ciclo hidrológico nos enseña que el agua está en constante movimiento. El agua se funde, se evapora, se condensa y circula, pero nunca es estática. Como parte de este proceso, el agua se filtra en el suelo, acumulándose en depósitos subterráneos. Esta agua subterránea es un recurso natural crítico, invisible pero indispensable para la vida en nuestro planeta.

De hecho, casi el 50 % de la población urbana del mundo depende de fuentes de agua subterránea. Sin embargo, cada vez son más los acuíferos contaminados, sobreexplotados y desecados por el hombre, a veces con consecuencias irreversibles. Además, muchos responsables de la toma de decisiones en el ámbito del agua no tienen una noción clara de las aguas subterráneas, a pesar de su papel esencial en el ciclo del agua.

Por eso la UNESCO, en colaboración con ONU-Agua, organiza una cumbre mundial sobre las aguas subterráneas en diciembre de 2022. También por eso esta cuestión será el tema del Día Mundial del Agua, el 22 de marzo. Y, por último, por eso las aguas subterráneas son el tema central de la edición de este año del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*.

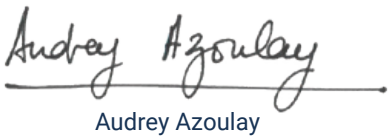
Este informe, titulado "Las aguas subterráneas, hacer visible lo invisible", sensibiliza sobre este recurso abundante pero frágil. Proporciona información detallada sobre la disponibilidad de las aguas subterráneas y subraya su importancia en el suministro de agua para los seres humanos y el medio ambiente.

Es importante destacar que el informe amplía las oportunidades actuales y los retos inminentes y explora cómo podemos utilizar, gestionar y gobernar este recurso de forma sostenible. Esto significa, entre otras cosas, hacer un uso más inteligente del potencial de los recursos hídricos subterráneos aún poco desarrollados, proteger las aguas subterráneas contra la contaminación y la sobreexplotación, responder de forma dinámica a las necesidades de una población cada vez más numerosa y dar una respuesta eficaz a las crisis climática y energética mundiales.

Por último, el informe subraya las interrelaciones entre las aguas subterráneas y la salud humana, la reducción de la pobreza y la igualdad de género. Para ello, no basta con mejorar los conocimientos y el desarrollo de capacidades; para proteger los acuíferos, necesitamos también innovación, en términos de intervenciones técnicas, reformas institucionales y legales, mejora de la financiación y cambios de comportamiento.

Esta notable publicación, coordinada por la UNESCO, ha sido posible gracias al apoyo constante del Gobierno de Italia y de la Regione Umbria al Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. También deseo dar las gracias a la familia de ONU-Agua por haber contribuido con sus conocimientos y habilidades.

En lo que respecta a las aguas subterráneas, son muchos los retos y las oportunidades que se presentan. La UNESCO se ha comprometido a abordarlos, especialmente a través de su Programa Hidrológico Intergubernamental. Por lo tanto, confío en que este *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* inspire a los responsables de la toma de decisiones a adoptar enfoques más centrados en el desarrollo, la gestión y el gobierno de las aguas subterráneas y, al hacerlo, haga visible lo invisible.



Audrey Azoulay

Prólogo

por **Gilbert F. Houngbo**, *Presidente de ONU-Agua*
y Presidente del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola

Bajo nuestros pies, fuera de la vista, el agua subterránea es un recurso en el que la mayoría de nosotros rara vez piensa. Sin embargo, casi toda el agua dulce líquida del mundo es agua subterránea, proporcionando un apoyo crítico al abastecimiento de agua potable, a los cultivos, a las industrias y a los ecosistemas.

Tal y como deja claro este informe, las actividades humanas sobreexplotan y contaminan las aguas subterráneas en muchos lugares; y en otros, simplemente no sabemos cuánta agua hay ahí abajo. La mala gestión de las aguas subterráneas y su frecuente abuso, ya sea por contaminación o por sobreexplotación, es una amenaza para todo el ciclo del agua y, por tanto, para el bienestar humano y la supervivencia de toda la vida.

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* de este año se centra en la necesidad de explorar y proteger las aguas subterráneas, y muestra que su gestión equitativa y sostenible será fundamental para sobrevivir y adaptarse al cambio climático y satisfacer las necesidades de una población creciente.

Como siempre, esta publicación es muy relevante tanto para un público experto como para los lectores en general que buscan una mejor comprensión del papel que desempeña el agua en las sociedades humanas y el desarrollo. Las experiencias, la información y los análisis aportados por los miembros y socios de ONU-Agua nos ayudan a comprender las múltiples formas en que las aguas subterráneas son fundamentales para la atención sanitaria, la agricultura, el empleo, el medio ambiente y muchos otros ámbitos.

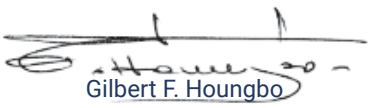
La conclusión es clara: mejorar la forma en que utilizamos y gestionamos las aguas subterráneas es una prioridad urgente si queremos alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible para 2030.

Los responsables de la toma de decisiones deben empezar a tener plenamente en cuenta las formas vitales en que las aguas subterráneas pueden ayudar a garantizar la resistencia de la vida y las actividades humanas en un futuro en el que el clima es cada vez más impredecible.

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022* es el resultado de la cooperación entre varias entidades de las Naciones Unidas y organizaciones asociadas de la "familia" de ONU-Agua. Un conjunto muy diverso de profesionales expertos ha elaborado un análisis exhaustivo, pero claro y accesible, de este tema que identifica los retos y recomienda soluciones.

Agradezco a la UNESCO y a su Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos la coordinación de esta edición, así como a todos los colegas que han participado.

Debemos proteger y utilizar las aguas subterráneas de forma sostenible, equilibrando las necesidades de las personas y del planeta. Confío en que este informe proporcione al lector una mejor comprensión de cómo mejorar las políticas de aguas subterráneas y espero que estimule la acción urgente que tanto se necesita.



Gilbert F. Houngbo

Prefacio

por **Michela Miletto**, *Coordinadora del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos* y **Richard Connor**, *Redactor Jefe*

Todas las ediciones anteriores del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR) han ofrecido una visión bastante singular del agua. Algunos informes se han centrado en temas relativamente técnicos como la energía, las aguas residuales, las soluciones basadas en la naturaleza o el cambio climático. Otros temas relacionados con el agua tratados en estos informes, como el desarrollo sostenible, el agua y el empleo, el no dejar a nadie atrás o la valoración del agua, se han abordado principalmente a través de lentes socioeconómicas. En algunos casos, pudimos basar nuestro trabajo en una cantidad considerable de datos, información, análisis y material ya existentes, mientras que en otros, la base de conocimientos era considerablemente limitada, lo que nos obligó a adoptar un enfoque más creativo a la hora de diseñar y redactar el informe.

Este último WWDR es especialmente único: es la primera vez que nuestro informe se centra en un elemento específico del ciclo global del agua, en este caso, las aguas subterráneas. En otras palabras, el tema del informe de este año es algo más que un ángulo o una perspectiva a través de la cual se explora el papel del agua en los distintos objetivos sociales, económicos y medioambientales; se trata del propio recurso. Y lo que es más importante, se trata de un recurso de agua dulce fundamental que ha permanecido "bajo el radar" durante demasiado tiempo.

Como noveno de una serie de informes temáticos anuales, la edición de 2022 del WWDR pretende explorar la importancia de las aguas subterráneas para el desarrollo sostenible y arrojar algo de luz sobre las medidas políticas y de gestión que deben adoptarse, no solo para garantizar la perennidad del recurso, sino también para maximizar las numerosas oportunidades que ofrece en un mundo en rápida evolución, con una demanda de agua cada vez mayor y unos recursos de agua dulce limitados y a menudo vulnerables.

Como se subraya a lo largo del informe, las aguas subterráneas ya desempeñan un papel vital en el apoyo a la seguridad alimentaria y energética, los asentamientos urbanos y (especialmente) rurales, y la industria. Es un componente esencial para muchos ecosistemas que funcionan de forma saludable y ofrece perspectivas excepcionales en términos de adaptación y mitigación del cambio climático. El informe también describe las posibles respuestas para superar los retos que actualmente impiden el progreso en la gobernanza y la gestión de los recursos hídricos subterráneos, concretamente en lo que respecta a la recopilación y difusión de datos, los marcos jurídicos y políticos, la creación de capacidades y la financiación.

Otro aspecto único del WWDR de este año es el gran número de autores y colaboradores, y la riqueza de sus aportaciones. Nunca antes habíamos contado con un apoyo tan amplio de expertos y profesionales reconocidos de todo el mundo, y creemos humildemente que esto se refleja en la calidad y la relevancia del informe. Sin duda, hemos hecho muchos amigos nuevos —y nos hemos reencontrado con otros— por el camino. Esperamos sinceramente que sigamos fomentando este tipo de colaboración en los años venideros.

Gracias a la estrecha colaboración con todos estos colaboradores, nos hemos esforzado por elaborar un informe equilibrado, basado en hechos y neutral sobre el estado actual de los conocimientos, que abarca los avances más recientes y destaca los retos y las oportunidades que puede ofrecer una mayor atención a las aguas subterráneas. Aunque está dirigido principalmente a los responsables políticos y de la toma de decisiones, a los gestores de los recursos hídricos, a los académicos y a la comunidad de desarrollo en general, esperamos que este informe también sea bien recibido por los no especialistas, y por aquellos que están comprometidos con la mitigación de la pobreza y las crisis humanitarias, con la búsqueda de los derechos humanos al abastecimiento de agua y al saneamiento, y con el avance de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Esta última edición del WWDR es el resultado de un esfuerzo concertado entre las Agencias Líderes de los capítulos que se enumeran en los agradecimientos. El informe también se ha beneficiado en gran medida de las aportaciones y contribuciones de otros miembros y socios de ONU-Agua, así como de numerosas universidades, instituciones de investigación, asociaciones científicas y ONG que han proporcionado una amplia gama de material relevante.

En nombre de la Secretaría del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a los organismos mencionados, a los miembros y socios de ONU-Agua, y a los redactores y demás colaboradores por haber elaborado colectivamente este informe único y autorizado durante el segundo año de la pandemia de COVID-19, con todas las dificultades adicionales que la situación nos ha impuesto a todos y cada uno de nosotros. Jac van der Gun merece un reconocimiento especial por haber compartido generosamente sus conocimientos, su sabiduría y su orientación durante todo el proceso de publicación del informe.

Estamos profundamente agradecidos al Gobierno italiano por el financiamiento del Programa y a la Regione Umbria por acoger generosamente la Secretaría del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos en la Villa La Colombella de Perugia. Sus contribuciones han sido fundamentales para la elaboración del WWDR.

Nuestro especial agradecimiento a la Sra. Audrey Azoulay, Directora General de la UNESCO, por su constante apoyo al Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos y a la elaboración del WWDR, y al Sr. Gilbert F. Houngbo, Presidente de ONU-Agua y Presidente del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA).

Extendemos nuestra más sincera gratitud a todos nuestros colegas de la Secretaría del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, cuyos nombres figuran en los agradecimientos. El informe no podría haberse realizado sin su profesionalidad y compromiso.

Por último, pero no por ello menos importante, dedicamos este informe a los proveedores de atención sanitaria de primera línea y a los trabajadores de servicios esenciales, cuyos incansables esfuerzos nos permitieron permanecer lo más seguros posible durante la actual pandemia de COVID-19.



Michela Miletto



Richard Connor

Equipo del WWDR 2022

Directora de la publicación
Michela Miletto

Jefe de la Edición
Richard Connor

Coordinador de procesos
Engin Koncagül

Asistente de Publicaciones
Valentina Abete

Diseñador gráfico
Marco Tonsini

Corrector de estilo
Céline Curiol

Secretaría del Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) (2021-2022)

Coordinadora: Michela Miletto

Programas: Richard Connor, Laura Veronica Imburgia, Engin Koncagül y Laurens Thuy

Publicaciones: Valentina Abete, Martina Favilli y Marco Tonsini

Comunicaciones: Simona Gallese

Administración y apoyo: Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini y Arturo Frascani

TI y seguridad: Michele Brensacchi, Tommaso Brugnami y Francesco Gioffredi

Pasantes: Hanouf Alyami Madhi, Ahmed Asaad Quotah, Caterina Brazda, Giulia Cadoni, Hugo Chauvin, Arianna Fusi y Candelaria Landin Moreno

Coordinación de la edición en español, traducción y corrección de estilo:
Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México, A.C. (ANEAS)

Agradecimientos

Este informe es publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), en nombre de ONU-Agua, y su elaboración la coordina el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP). Agradecemos a los miembros y socios de ONU-Agua y a otros colaboradores que han hecho posible la preparación del contenido de este informe.

Agencias líderes de los capítulos

Ask for Water GmbH en nombre de la Red Rural de Abastecimiento de Agua (RWSN), Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (CeReGAS), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC), International Water Association (IWA), Instituto Internacional de Ordenación de los Recursos Hídricos (IWMI), Relator Especial sobre los derechos humanos al agua potable y al saneamiento, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), UNESCO (Programa Hidrológico Intergubernamental — PHI, Oficina de Montevideo, Oficina de Nairobi y Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos), Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat), Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), Comisiones Regionales de las Naciones Unidas (Comisión Económica para Europa — CEPE, Comisión Económica para América Latina y el Caribe — CEPAL, Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico — CESPAP, Comisión Económica y Social para Asia Occidental — CESPAO), y el Banco Mundial.

Colaboradores

AIH, Ask for Water GmbH en nombre de la RWSN, British Geological Survey (BGS), Associación Internacional de Ingeniería et Investigación Hidroambiental (IAHR), CDP (antes Carbon Disclosure Project), Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Land and Water, Empresa de Transformación Agraria (TRAGSA), Environmental Law Institute, Agencia Europea del Medio Ambiante (AEMA), Global Water Partnership (GWP), Asociaciòn Internacional de Ciencias Hidrológicas (AICH), Asociación Internacional para el Derecho del Agua (AIDA), Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), IGRAC, IHE Delft, Instituto de Evaluación Ambiental e Investigación del Agua del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IDAEA-CSIC), Organización Internacional para las Migraciones (OIM), Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), IWMI, Asociación Internacional de Recursos Hídricos (IWRA), Kiwa Water Research Institute (KWR), Departamento de Agua y Alcantarillado del Condado de Miami-Dade (WASD), Organización Holandesa para la Investigación Científica Aplicada (TNO), Departamento de Planificación, Industria y Medio Ambiente de Nueva Gales del Sur, Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos (ACNUDH), Universidad de la Sorbona y Écoles des Mines de Paris de París, Relator Especial sobre los derechos humanos al agua potable y al saneamiento, Universidad Técnica de Cataluña, Universidad Técnica de Dresde (TU-Dresden), Facultad de Derecho de la Universidad de Texas A&M, The Nature Conservancy (TNC), Trinity College Dublin, PNUD, CEPAL, CESPAO, PHI de la UNESCO, Centro del Patrimonio Mundial (WHC), Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos (UNESCO WWAP), ONUDI, Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Arizona, Instituto para la Reducción de Riesgos y Desastres del University College London (UCL-IRDR), Universidad de Flinders y National Centre for Groundwater Research and Training, Universidad de Ginebra, Universidad de Kiel, Universidad de Massachusetts, Universidad de Strathclyde, Universidad de Texas en Austin (UTexas-Austin), Universidad de Tsukuba, División de Estadística de las Naciones Unidas, Instituto de la Universidad de las Naciones Unidas para la Gestión Integrada de los Flujos de Materiales y de los Recursos (UNU-FLORES), Instituto para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud (UNU-INWEH), Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), WaterAid, Women for Water Partnership (WfWP), Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Banco Mundial.

Donantes

La elaboración del informe ha contado con el apoyo financiero del Gobierno de Italia y de la Regione de Umbría. Se agradece a todos los que han aportado contribuciones en especie, así como a sus respectivos donantes.



Resumen ejecutivo

El objetivo de esta edición del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR 2022) es centrar la atención en las aguas subterráneas, llamando la atención sobre sus funciones, retos y oportunidades específicas en el contexto del desarrollo, la gestión y la gobernanza de los recursos hídricos en todo el mundo.

Las aguas subterráneas —que representan aproximadamente el 99 % de toda el agua dulce líquida de la Tierra y están distribuidas por todo el planeta, aunque de forma desigual— tienen el potencial de proporcionar a las sociedades enormes beneficios sociales, económicos y medioambientales, incluida la adaptación al cambio climático.

Las aguas subterráneas ya proporcionan la mitad del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial, y alrededor del 25 % de toda el agua extraída para irrigación, sirviendo al 38 % de las tierras de regadío del mundo. Sin embargo, a pesar de su enorme importancia, este recurso natural es a menudo poco conocido y, en consecuencia, infravalorado, mal gestionado e incluso abusado. En el contexto de la creciente escasez de agua en muchas partes del mundo, no se puede seguir pasando por alto el enorme potencial de las aguas subterráneas y la necesidad de gestionarlas cuidadosamente.

Los múltiples servicios que ofrecen las aguas subterráneas

La capacidad de los sistemas de aguas subterráneas para ofrecer diversos servicios depende de sus propiedades, que varían geográficamente, y está influenciada dinámicamente por los procesos naturales y humanos en curso.

Estos servicios incluyen:

- *servicios de abastecimiento* que permiten la extracción de aguas subterráneas para su uso (humano);
- *servicios de regulación*, que reflejan la capacidad de amortiguación de los acuíferos para regular los regímenes de cantidad y calidad de los sistemas de aguas subterráneas;
- *servicios de apoyo* de los que dependen los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE) y otras características medioambientales relacionadas con las aguas subterráneas; y
- *los servicios culturales* vinculados a las actividades de ocio, a la tradición, a la religión o a los valores espirituales, que se asocian a lugares concretos y no a los acuíferos.

Las aguas subterráneas ofrecen una serie de oportunidades adicionales, como la ampliación de la generación de energía geotérmica, el aumento del almacenamiento para mejorar la seguridad del agua y la adaptación a los efectos del cambio climático.

Los retos

El agotamiento de las aguas subterráneas se produce cuando la descarga supera la recarga. Aunque la variabilidad del clima y el cambio climático pueden influir, la mayoría de los casos de agotamiento del almacenamiento de aguas subterráneas a largo plazo son consecuencia de la extracción intensiva. El ritmo de agotamiento del almacenamiento global de aguas subterráneas es considerable: para principios del presente siglo, las estimaciones se sitúan en su mayoría entre 100 y 200 km^3/año (lo que representa aproximadamente entre el 15 y el 25 % de las extracciones totales de aguas subterráneas).

La contaminación de las aguas subterráneas reduce la idoneidad de las aguas subterráneas extraídas para el consumo y también afecta a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

Hay muchas fuentes de contaminación antropogénica de las aguas subterráneas: la mayoría de ellas están situadas en la superficie del terreno o cerca de ella, pero otras fuentes inyectan contaminantes en el subsuelo a mayor profundidad bajo la superficie. La contaminación agrícola está muy extendida, es una fuente difusa que suele incluir grandes cantidades de nitrato, pesticidas y otros productos agroquímicos. La contaminación de las aguas subterráneas es un proceso prácticamente irreversible: una vez contaminadas, las zonas del acuífero tienden a permanecer con agua contaminada.

Gobernanza de las aguas subterráneas

Los procesos de gobernanza de las aguas subterráneas permiten su gestión, planificación y aplicación de políticas. Tiene lugar a múltiples escalas y niveles geográficos, incluidas las escalas regionales y transfronterizas. La gestión de las aguas subterráneas está orientada a la acción y se centra en las actividades de aplicación práctica y en las operaciones cotidianas. Es más frecuente que se produzca a nivel micro y meso.

En el África Subsahariana, donde las oportunidades que ofrecen los vastos acuíferos poco profundos siguen siendo en gran medida infra explotadas, solo el 5 % del área equipada para la irrigación utiliza aguas subterráneas

Dado que las aguas subterráneas se perciben a menudo como un recurso privado (es decir, estrechamente vinculado a la propiedad de la tierra y, en algunas jurisdicciones, tratado como de propiedad privada), la regulación y la gobernanza y gestión de arriba abajo son difíciles. Los gobiernos tienen que asumir plenamente su papel de custodios del recurso en vista de los aspectos de bien común de las aguas subterráneas.

Las leyes y reglamentos nacionales regulan el acceso a las aguas subterráneas, así como las actividades humanas que afectan a su calidad. Otros instrumentos jurídicos pertinentes son los que: proporcionan acceso al agua para satisfacer las necesidades básicas como cuestión de derechos humanos; permiten el acceso a las aguas subterráneas para los medios de subsistencia y los usos productivos a pequeña escala; regulan los usos de la tierra que son contrarios a los procesos naturales de recarga y descarga de las aguas subterráneas; y regulan la formación y el funcionamiento de las asociaciones de usuarios de aguas subterráneas para las responsabilidades de asignación, supervisión y vigilancia. Los marcos jurídicos también deben incluir la protección de las zonas de descarga y recarga y del área que rodea a los pozos de abastecimiento de agua, así como normas de rendimiento sostenible y controles de extracción, y reglamentos de uso conjunto.

En algunas jurisdicciones, las aguas subterráneas se regulan conjuntamente con las aguas superficiales, incluidos los ríos. En los casos en que existen conflictos entre los derechos de las aguas subterráneas y los derechos de las aguas superficiales (por ejemplo, en el caso de un arroyo que se está secando debido al intenso bombeo de aguas subterráneas en las cercanías, y viceversa), se justifica un enfoque de gestión conjunta.

Las fuentes puntuales de contaminación pueden regularse mediante permisos, así como mediante normas generales de efluentes y/o de calidad ambiental del agua. La contaminación no puntual procedente de fuentes difusas o indistintas requiere medidas de prevención: regulación de los usos del terreno y/o imposición de mejores prácticas agrícolas y medioambientales.

Agricultura

Las aguas subterráneas son un recurso fundamental para la agricultura de regadío, la ganadería y otras actividades agrícolas, incluida la transformación de alimentos. Para satisfacer la demanda mundial de agua y agricultura de aquí a 2050, incluido un aumento estimado del 50 % de la demanda de alimentos, piensos y biocombustibles en relación con los niveles de 2012, es de vital importancia aumentar la productividad agrícola mediante la intensificación sostenible de la extracción de aguas subterráneas, disminuyendo al mismo tiempo las huellas hídricas y medioambientales de la producción agrícola.

Cuando existe una fuente perenne y fiable de aguas subterráneas poco profundas, estas pueden ser una fuente importante para los pequeños agricultores. Entre las regiones que dependen en gran medida de las aguas subterráneas para la irrigación se encuentran América del Norte y Asia del Sur, donde el 59 % y el 57 % de las áreas equipadas para la irrigación utilizan aguas subterráneas, respectivamente. En el África Subsahariana, donde las oportunidades que ofrecen los vastos acuíferos poco profundos siguen siendo en gran medida infra explotadas, solo el 5 % del área equipada para la irrigación utiliza aguas subterráneas.

Se estima que la contaminación agrícola ha superado a la procedente de asentamientos e industrias como principal factor de degradación de las aguas interiores y costeras. El nitrato, procedente de los fertilizantes químicos y orgánicos, es el contaminante antropogénico más frecuente en las aguas subterráneas de todo el mundo. Los insecticidas, herbicidas y fungicidas, cuando se aplican o eliminan incorrectamente, pueden contaminar las aguas subterráneas con carcinógenos y otras sustancias tóxicas.

Los datos sugieren que las leyes y los reglamentos para prevenir o limitar la contaminación difusa de las aguas subterráneas por parte de la agricultura, y especialmente su aplicación, son generalmente débiles. Las políticas que abordan la contaminación del agua en la agricultura deberían formar parte de un marco global de política agrícola y del agua a escala nacional, de cuenca hidrográfica y de acuífero.

La electrificación rural ha sido uno de los principales motores del desarrollo de las aguas subterráneas, sobre todo cuando las redes eléctricas rurales se han extendido a áreas que de otro modo habrían dependido del gasóleo o de la energía eólica. Los avances en la tecnología solar han permitido el desarrollo de Sistemas de Irrigación Solar (SPIS), adoptados a gran escala para dar servicio a las operaciones agrícolas. Sin embargo, existe el riesgo de un uso insostenible del agua si la implantación de los SPIS no se gestiona y regula adecuadamente.

Asentamientos humanos

Las aguas subterráneas son la única forma viable y asequible de ampliar el acceso básico al agua a las poblaciones rurales no atendidas en gran parte del mundo

La dependencia de las aguas subterráneas de innumerables ciudades parece intensificarse, de manera que se estima que casi el 50 % de la población urbana mundial se abastece hoy en día de fuentes subterráneas.

Sin embargo, muchos pobres urbanos viven en asentamientos periurbanos, que no están planificados y carecen de estatus legal, y en los que no se proporcionan infraestructuras y servicios públicos de agua.

En las economías en desarrollo, el uso de pozos de agua privados para el autoabastecimiento urbano ha proliferado en los últimos años. Esta práctica suele comenzar como estrategia de supervivencia ante un abastecimiento de agua por tuberías irregular o inadecuado, y luego continúa a perpetuidad como estrategia de reducción de costos para evitar el pago de tarifas de agua más altas.

El impacto de un saneamiento inadecuado o inapropiado en las aguas subterráneas se observa en las áreas urbanas donde la cobertura del alcantarillado principal es baja y la mayoría de los residuos fecales domésticos se vierten en letrinas de pozo. Las empresas de suministro de agua tienen que hacer mucho más énfasis en la protección de sus fuentes de agua críticas mediante la restricción de los cultivos agrícolas y la construcción de viviendas en sus zonas de captación de aguas subterráneas, con el fin de salvaguardar la salud pública y reducir el coste del abastecimiento de agua.

Las aguas subterráneas son la única forma viable y asequible de ampliar el acceso básico al agua a las poblaciones rurales no atendidas en gran parte del mundo. Esto ocurre especialmente en el África Subsahariana y en el sur de Asia, donde la población rural es numerosa, pero está dispersa.

La coexistencia del saneamiento *in situ* y el abastecimiento de aguas subterráneas es una grave preocupación para las fuentes poco profundas. Se calcula que la contaminación persistente de los abastecimientos rurales de aguas subterráneas con agentes patógenos afecta a un 30 % del total de las instalaciones. Por lo general, afectará más a los marginados (las mujeres y las niñas suelen tener un riesgo desproporcionado de contraer enfermedades debido a los agentes patógenos y las toxinas como resultado de su exposición a las aguas residuales).

Los asentamientos, tanto temporales como permanentes, de personas desplazadas requieren una mención especial. Estos asentamientos suelen tener una alta densidad de población, pero se sitúan entre la categoría urbana y la rural. La construcción de pozos de agua bien diseñados, junto con sistemas de saneamiento debidamente citados y bien mantenidos, es vital en estos casos.

Industria

Las industrias del petróleo, el gas y la minería, a través de sus diversas actividades, pueden disponer de amplios datos internos sobre la ubicación y la extensión de los acuíferos y sus propiedades

Entre las industrias que extraen aguas subterráneas se encuentran la fabricación, la minería, el petróleo y el gas, la generación de energía, la ingeniería y la construcción. Entre las industrias que dependen en gran medida de las aguas subterráneas a través de las cadenas de abastecimiento se encuentran los sectores de la confección y de la alimentación y las bebidas. Diversos procesos industriales hacen uso de los recursos de aguas subterráneas, en lugares donde la disponibilidad de aguas superficiales es limitada en cantidad, pero también en situaciones donde la calidad es importante.

El vertido y la infiltración en el suelo de efluentes industriales no tratados o solo parcialmente tratados pueden contaminar las aguas subterráneas. La salud humana y el medio ambiente también pueden correr un riesgo importante como consecuencia de la contaminación del suelo y la lixiviación procedente de vertederos industriales antiguos y no diseñados y de minas heredadas.

Muchos procesos de producción necesitan una gran cantidad de agua para el lavado y la limpieza de sus productos al final de la producción, para separar los residuos de los productos químicos de procesamiento. El uso de las aguas subterráneas con fines de refrigeración depende en gran medida de la ubicación y el tipo de industria, por lo que varía mucho de un país a otro. Las construcciones subterráneas, como los túneles, suelen requerir un desagüe temporal o permanente.

En muchos casos, las minas requieren un desagüe frecuente o continuo para poder operar, y existe el riesgo de contaminar un acuífero local, que puede ser una fuente de agua potable. La eliminación del agua también plantea problemas de tratamiento si está contaminada por las actividades mineras.

Sin embargo, las industrias del petróleo, el gas y la minería, a través de sus diversas actividades, pueden disponer de amplios datos internos sobre la ubicación y la extensión de los acuíferos y sus propiedades. Estos datos podrían ser muy útiles para los hidrogeólogos, los gobiernos y las empresas de abastecimiento de agua.

El sector energético también puede tener efectos profundos en la calidad de las aguas subterráneas. El carbón utilizado en la generación de electricidad térmica puede afectar significativamente a la calidad de las aguas subterráneas como resultado de la lixiviación a través de los vertederos de residuos de cenizas de carbón. La fracturación hidráulica para la obtención de gas natural, especialmente en acuíferos poco profundos, también puede presentar riesgos considerables de contaminación de las aguas subterráneas. Las fuentes de contaminación incluyen las aguas residuales de la formación, el agua de retorno y los líquidos de perforación y fracturación.

El sector financiero está ejerciendo ahora su considerable influencia sobre la inversión sostenible y esto tendrá un efecto en cadena, favoreciendo a los clientes de la industria y la energía que utilizan las aguas subterráneas de forma sostenible, y animando a otros a hacerlo.

Ecosistemas

Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE) pueden encontrarse en una gran variedad de paisajes, desde los valles de alta montaña hasta el fondo del océano e incluso los desiertos.

La descarga de aguas subterráneas sustenta los flujos de base de arroyos y ríos, una fuente de agua crucial que determina el riesgo de que se sequen durante los periodos de sequía. Los ecosistemas terrestres dependen de las aguas subterráneas en todos los biomas del mundo donde son accesibles para las plantas. Las charcas de los entornos áridos suelen alimentarse exclusivamente de aguas subterráneas, por lo que estas son cruciales para sostener las complejas redes alimentarias de los paisajes áridos, como las sabanas. Las zonas ribereñas, los humedales y otras masas de agua superficiales dependen a menudo de las aguas subterráneas.

Los GDE también apoyan servicios ecosistémicos críticos. Los GDE acuáticos y terrestres proporcionan hábitat, apoyan la biodiversidad, amortiguan las inundaciones y las sequías, proporcionan alimentos y ofrecen servicios culturales. Los GDE desempeñan un papel fundamental en la protección de los acuíferos frente a la contaminación, ya que garantizan la separación física, permiten procesos biofísicos como la filtración, la biodegradación y la sorción de contaminantes, y facilitan y protegen la recarga natural.

El bienestar compartido de las aguas subterráneas, los ecosistemas y los seres humanos puede mejorarse mediante la gestión de las aguas subterráneas, la gestión conjunta del agua y la tierra, las soluciones basadas en la naturaleza y la mejora de la protección de los ecosistemas. Mientras que la gestión de las aguas subterráneas se centra a menudo en las aguas subterráneas o en los acuíferos en sí mismos, las aguas subterráneas y los ecosistemas deben gestionarse conjuntamente para garantizar el suministro continuo de servicios ecosistémicos críticos.

Cambio climático

El desarrollo de un abastecimiento de agua resistente al cambio climático implicará, en muchas partes del mundo, el uso de aguas subterráneas conjuntamente con ríos, lagos y otros depósitos de agua superficial

El cambio climático influye directamente en la recarga natural de las aguas subterráneas a través de su influencia en las precipitaciones y en las fugas de las aguas superficiales, incluidos los arroyos efímeros, los humedales y los lagos. Sin embargo, persiste una gran incertidumbre en las proyecciones globales sobre la magnitud de los impactos del cambio climático en la recarga de las aguas subterráneas.

Uno de los efectos observados y generalizados del cambio climático que influye en la reposición de las aguas subterráneas es la intensificación de las precipitaciones. En áreas con un saneamiento inadecuado, las lluvias intensas pueden arrastrar patógenos microbianos fecales y sustancias químicas a través de los suelos poco profundos hasta la capa freática.

El aumento global del nivel del mar (SLR) ha inducido la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros de todo el mundo. Sin embargo, el impacto del SLR por sí solo en la intrusión de agua de mar suele ser pequeño en relación con el de la extracción de agua subterránea. El impacto del cambio climático en las aguas subterráneas puede ser mayor a través de sus efectos indirectos en la demanda de agua de irrigación a través del aumento de la evapotranspiración.

El desarrollo de un abastecimiento de agua resistente al cambio climático implicará, en muchas partes del mundo, el uso de aguas subterráneas conjuntamente con ríos, lagos y otros depósitos de agua superficial. Las adaptaciones al cambio climático basadas en las aguas subterráneas aprovechan el almacenamiento distribuido de aguas subterráneas y la capacidad de los sistemas acuíferos para almacenar excedentes de agua estacionales o episódicos. Incurren en pérdidas por evaporación sustancialmente menores que las infraestructuras convencionales, como las presas de superficie.

El desarrollo de la energía geotérmica, una fuente de energía sostenible, desempeña un papel importante en la reducción de las emisiones de CO_2. Los acuíferos profundos también pueden utilizarse para la captura y secuestro de carbono, el proceso de almacenamiento de carbono para frenar la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera.

Perspectivas regionales

África Subsahariana

África posee grandes recursos de agua subterránea. Aunque no toda esta agua subterránea almacenada está disponible para su extracción, se calcula que su volumen es más de 100 veces superior a la renovación anual de los recursos de agua dulce de la región. El desarrollo de las aguas subterráneas tiene un gran potencial para satisfacer la necesidad de un abastecimiento de agua en rápido aumento en toda el África Subsahariana, tanto para la supervivencia humana como para promover el desarrollo económico. Alrededor de 400 millones de personas en el África Subsahariana aún no tienen acceso ni siquiera a los servicios básicos de agua.

La mayoría de los recursos hídricos subterráneos de la región árabe no son renovables y deben gestionarse teniendo en cuenta que son un recurso finito

La mayoría de los países de África Occidental y Central tienen poco almacenamiento de aguas subterráneas pero una elevada pluviometría anual y, por tanto, una recarga regular. Por el contrario, muchos países de África Oriental y Meridional tienen un considerable almacenamiento de aguas subterráneas a pesar de los bajos niveles de recarga. Este almacenamiento proporciona un amortiguador significativo antes de que la extracción afecte al sistema regional de aguas subterráneas. Sin embargo, el actual bombeo de aguas subterráneas se realizará en última instancia a expensas de las generaciones futuras.

Solo el 3 % del total de las tierras cultivadas en el África Subsahariana está bajo riego, y solo el 5 % de ellas se riega con aguas subterráneas. El desarrollo de las aguas subterráneas podría actuar como catalizador del crecimiento económico al aumentar la extensión de las áreas de regadío y, por tanto, mejorar el rendimiento agrícola y la diversidad de los cultivos. En la actualidad, el desarrollo de las aguas subterráneas en el África Subsahariana no está limitado por la falta de agua subterránea, sino por la falta de inversión, sobre todo en infraestructuras, instituciones, profesionales formados y conocimiento del recurso.

Europa y América del Norte

Las características de los recursos hídricos subterráneos y su disponibilidad varían entre y dentro de Europa y América del Norte, lo que refleja las diferencias en la geología y la hidrología. La proporción que representan las aguas subterráneas en la extracción total de agua dulce también varía mucho de un país a otro.

En muchos países de Europa, las aguas subterráneas se utilizan principalmente como agua potable, lo que subraya la necesidad de controlar la calidad del agua, dados los riesgos potenciales para la salud. Los contaminantes que más comúnmente causan un mal estado químico en la Unión Europea son los nitratos, así como los pesticidas. Aunque predominan los contaminantes procedentes de la agricultura, los productos químicos industriales y las sustancias relacionadas con la minería también provocan la contaminación química de las aguas subterráneas en varias demarcaciones hidrográficas. Se necesita más información sobre estos contaminantes "nuevos" (o "emergentes").

Además de la necesidad de colaboración entre los distintos usuarios del agua dentro de un mismo país, cada vez se es más consciente del carácter transfronterizo de muchos recursos hídricos subterráneos y, por tanto, de la necesidad de cooperación interjurisdiccional.

El control y los conocimientos de las aguas subterráneas suelen estar en manos de instituciones especializadas, mientras que la aplicación de los instrumentos de la política del agua exige la cooperación entre instituciones. De hecho, muchas de las presiones y los factores de impulso son los mismos para las aguas subterráneas y superficiales. Se están desarrollando políticas integradas y esfuerzos para garantizar la coherencia.

América Latina y el Caribe

Debido a la relativa abundancia de aguas superficiales y al limitado nivel de uso de las aguas subterráneas, menos del 30 % del agua dulce extraída en América Latina y el Caribe procede de fuentes subterráneas. En los países que sí dependen de las aguas subterráneas, aproximadamente la mitad de la extracción se destina a la irrigación, un tercio al uso doméstico y el resto al uso industrial.

En toda la región, existen deficiencias en la protección y el control de las aguas subterráneas, lo que da lugar a su explotación intensiva y/o a su contaminación, poniendo en peligro su sostenibilidad, así como su accesibilidad para las poblaciones más vulnerables, que dependen de estas fuentes de aguas subterráneas para su abastecimiento de agua potable.

Las aguas subterráneas desempeñan un papel importante en los sistemas de abastecimiento de agua de la mayoría de las ciudades latinoamericanas, aunque no siempre como fuente principal de suministro. También representa el 50 % del agua utilizada por el sector industrial. En el Caribe, donde las aguas superficiales tienden a ser relativamente escasas, las aguas subterráneas representan alrededor del 50 % del agua extraída.

Dado que la importancia de los acuíferos para los ecosistemas, el desarrollo social y las actividades económicas de la región no hará más que aumentar en un futuro próximo, la región necesita avanzar hacia procesos políticos que armonicen la toma de decisiones, el seguimiento y la gestión de las aguas subterráneas tanto a nivel nacional e internacional.

Asia y el Pacífico

La región de Asia-Pacífico es la que más agua subterránea extrae en el mundo, ya que contiene siete de los diez países que más agua subterránea extraen (Bangladesh, China, India, Indonesia, Irán, Pakistán y Türkiye). Solo estos países representan aproximadamente el 60 % de la extracción total de agua subterránea del mundo.

Estos beneficios socioeconómicos del uso de las aguas subterráneas son especialmente cruciales para el sector agrícola. Los sectores industrial y municipal también son usuarios importantes. Aunque las aguas subterráneas son abundantes en la mayor parte de la región, su agotamiento ha suscitado preocupación por la sostenibilidad de su uso en distintas áreas de Asia Central, China, Asia Meridional y algunos centros urbanos del Sudeste Asiático.

La contaminación de las aguas subterráneas por procesos antropogénicos y geogénicos es una preocupación adicional. Los efectos del cambio climático en la variabilidad de las precipitaciones agravan aún más la presión sobre los recursos hídricos subterráneos, sobre todo en áreas con climas semiáridos y áridos y en los pequeños Estados insulares en desarrollo.

Aunque en toda la región existen prácticas de gestión y sistemas institucionales, jurídicos y normativos para abordar las cuestiones relativas a las aguas subterráneas, la gobernanza de las aguas subterráneas es un reto debido al régimen de acceso irrestricto vigente en muchos países. Se necesita urgentemente una mejor gobernanza de las aguas subterráneas, con apoyo popular y capacidad de ejecución.

La región árabe

La región árabe es una de las que más escasea el agua en el mundo y las aguas subterráneas son la fuente de agua más utilizada en al menos 11 de los 22 Estados árabes. La sobreexplotación de las aguas subterráneas en muchas partes de la región ha provocado el descenso de la capa freática, sobre todo en áreas muy pobladas y agrícolas. Esto es especialmente alarmante, ya que las aguas subterráneas son la principal fuente de agua para los grupos vulnerables que no están conectados formalmente o no tienen acceso a fuentes públicas. Las prácticas agrícolas insostenibles, así como las industrias y la urbanización, están afectando significativamente a la calidad de las aguas subterráneas.

La mayoría de los recursos hídricos subterráneos de la región árabe no son renovables y deben gestionarse teniendo en cuenta que son un recurso finito. Sin embargo, el control de la extracción de aguas subterráneas sigue siendo difícil, a pesar de la aparición de nuevas tecnologías. Esto complica la gestión de las aguas subterráneas, especialmente en un contexto transfronterizo. Lamentablemente, en la región existen muy pocos casos de cooperación en materia de aguas subterráneas.

La importancia de las aguas subterráneas para la seguridad hídrica de la región en un clima cambiante exige una mejor gobernanza a través de políticas y legislaciones, enfoques de gestión innovadores, un mayor uso de las tecnologías, una financiación específica para un mejor conocimiento del recurso y una mayor cooperación regional.

Creación y actualización de la base de conocimientos

El *Resumen de la actualización de los progresos de 2021 sobre el ODS 6* plantea la cuestión de la falta de datos sobre las aguas subterráneas y de iniciativas de seguimiento de las aguas subterráneas, haciendo hincapié en que el seguimiento de las aguas subterráneas es un "área descuidada".

Los datos sobre aguas subterráneas recogidos con fondos públicos deben ser de libre acceso

Las aguas subterráneas deben ser controladas a lo largo del tiempo en términos de cantidad y calidad, con el fin de conocer el comportamiento y el estado de los acuíferos, y para identificar posibles cambios negativos como la sobreexplotación, la reducción de la recarga (incluidos los efectos del cambio climático) y la contaminación. La recarga de las aguas subterráneas suele estimarse en lugar de medirse directamente. Los acuíferos altamente vulnerables que prestan servicios a las personas y al medio ambiente deben ser objeto de un seguimiento más frecuente.

Los conocimientos científicos en hidrogeología y los métodos y herramientas disponibles son suficientes para abordar la mayoría de los problemas de gestión de las aguas subterráneas. El reto reside más bien en la escasez de datos fiables para las evaluaciones de las aguas subterráneas en áreas específicas y los análisis de escenarios. Dado que todos los acuíferos y sus condiciones de contorno son únicos, es fundamental disponer de evaluaciones de las aguas subterráneas sobre el terreno para poder aplicar políticas y gestionar los recursos hídricos subterráneos con conocimiento de causa.

Aunque suele ser relativamente caro, el seguimiento es una inversión inteligente: identificar los problemas en una fase temprana puede ser muy rentable, lo que permite introducir medidas de mitigación antes de que se produzca un deterioro grave del recurso. Los programas de seguimiento convencionales pueden verse incrementados por iniciativas de ciencia ciudadana, que también pueden promover la integración de los conocimientos locales en la caracterización hidrogeológica y la evaluación de los sistemas de aguas subterráneas. Las técnicas de teledetección también han sido utilizadas por la comunidad científica para mejorar el seguimiento y la estimación de los recursos hídricos subterráneos.

El intercambio de datos e información es a menudo deficiente, especialmente en los países de bajos ingresos.

Los datos sobre aguas subterráneas recogidos con fondos públicos deben ser de libre acceso.

Las empresas privadas deberían divulgar los datos y la información pertinentes sobre los parámetros relacionados con el agua del subsuelo que mejorarían la evaluación y la gestión de las aguas subterráneas. Por ejemplo, los datos geofísicos y de sondeos adquiridos durante la exploración de petróleo y gas podrían mejorar el conocimiento de la extensión y los parámetros de los acuíferos.

En muchos países de ingresos bajos y medios falta capacidad hidrogeológica, incluso cuando las aguas subterráneas constituyen la mayor parte de sus recursos hídricos gestionados. A menudo, esto comprende tanto la capacidad técnica como la institucional.

Política y planificación

Con demasiada frecuencia, la adopción de una política de aguas subterráneas se centra principalmente en la utilización de las aguas subterráneas tras su extracción. Esto está muy alejado de una buena gestión del acuífero, que requiere prestar atención al uso del suelo, a la reposición, a la protección y a la aplicación de medidas destinadas a preservar los servicios y las funciones del sistema de aguas subterráneas.

El despliegue de varias herramientas de gestión de las aguas subterráneas está supeditado a la existencia previa de estructuras jurídicas e institucionales que otorguen autoridad para su uso y aplicación

Cualquier "visión de la gestión de las aguas subterráneas" debe integrarse en una visión nacional de los recursos hídricos, en diálogo con actores que van desde los usuarios y técnicos locales de las aguas subterráneas hasta los científicos, los responsables políticos y los inversores. La política de aguas subterráneas debe depender del estatus legal y de la naturaleza de la propiedad de las aguas subterráneas (pública o privada), así como de factores como los usuarios del agua, las características de las aguas superficiales interrelacionadas y los usos del suelo en las áreas de recarga de los acuíferos. También debe prever una toma de decisiones integrada para los recursos hídricos subterráneos y los sistemas acuíferos, y conectar con otros sectores y ámbitos de la sociedad más allá del sector del agua, como el desarrollo socioeconómico, la igualdad de género y la mitigación de la pobreza, la alimentación y la energía, los ecosistemas, el cambio climático y la salud humana.

Las políticas, las estrategias y los planes deben adaptarse al contexto local, basarse en las prioridades y las aspiraciones de la población local y en pruebas científicas sólidas. Los planes pueden prepararse como un esfuerzo de cooperación entre los ministerios nacionales, los organismos provinciales y locales y otras partes interesadas, sobre la base del diálogo y el apoyo técnico inclusivo (por ejemplo, la cartografía participativa) para permitir la copropiedad del proceso y el resultado. El proceso produce un documento formal que puede ser validado, con acciones e indicadores con plazos definidos que pueden ser monitoreados, y productos e impactos/resultados que pueden ser evaluados.

Gestión de las aguas subterráneas

La gestión de las aguas subterráneas tiene como objetivo controlar la extracción y la calidad de las aguas subterráneas, así como abordar los efectos de la extracción de aguas subterráneas en los ecosistemas, las aguas superficiales y el hundimiento del terreno, entre otros. Quizá uno de los componentes más importantes de la gestión de las aguas subterráneas sea el control de la ubicación y la cantidad de las extracciones de agua del acuífero.

El despliegue de varias herramientas de gestión de las aguas subterráneas está supeditado a la existencia previa de estructuras jurídicas e institucionales que otorguen autoridad para su uso y aplicación. Sin embargo, no toda la gestión se realiza a través del gobierno. Las comunidades y/o los propios usuarios de aguas subterráneas pueden optar por gestionar de forma independiente la ubicación de los pozos y las extracciones de aguas subterráneas.

El enfoque más sostenible y rentable para gestionar la calidad de las aguas subterráneas es garantizar su adecuada protección, evitando así la contaminación. Esto puede lograrse mediante la cartografía de la vulnerabilidad, el desarrollo de zonas de protección de las aguas subterráneas y la planificación del uso del suelo.

Debe prestarse especial atención a la gestión conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos y al potencial de las soluciones "basadas en la naturaleza". La integración con la gestión medioambiental, la gestión del uso del suelo y la gestión del espacio y los recursos del subsuelo son cuestiones importantes dentro del ámbito de la gestión integrada. La recarga gestionada de acuíferos (MAR) es un enfoque integrado que permite la reposición de los acuíferos como complemento de las presas de almacenamiento y ofrece una alternativa rentable que minimiza la evaporación y el impacto ambiental. El MAR también puede utilizarse para retener las aguas pluviales urbanas no aprovechadas y el agua reciclada, para que estén disponibles para su uso productivo cuando sea necesario. A escala de la cuenca hidrográfica, el MAR puede utilizarse para mantener los caudales de agua ambientales y su disponibilidad, creando retrasos en los vertidos de agua a un arroyo. La aplicación del MAR se ha multiplicado por 10 en los últimos 60 años, pero todavía hay un amplio margen para una mayor expansión, desde los 10 km³/años actuales hasta probablemente unos 100 km³/año.

Acuíferos transfronterizos

Con frecuencia, los acuíferos transfronterizos forman parte de acuerdos más amplios de cooperación en materia de agua elaborados para las cuencas hidrográficas transfronterizas

Los acuíferos transfronterizos incluyen una vía natural de flujo subterráneo que cruza una frontera internacional. Las acciones sobre el acuífero en un país, como la extracción o la contaminación intensas, pueden tener un impacto significativo en el otro lado de la frontera. La gestión de los acuíferos transfronterizos suele adolecer de falta de voluntad institucional y de recursos insuficientes para recopilar la información necesaria, especialmente a nivel local. Coordinar, armonizar y compartir datos representa el primer paso en la cooperación entre países vecinos. Estas acciones son esenciales para llegar a un acuerdo sobre un modelo conceptual fiable del acuífero, que a su vez es un requisito previo para la formulación de planes de gestión. La integración de las consideraciones de género en la cooperación transfronteriza genera oportunidades para una gestión de las aguas subterráneas más equitativa desde el punto de vista social.

El derecho internacional del agua se desarrolló inicialmente para las aguas superficiales, pero cada vez más con frecuencia, los acuíferos transfronterizos forman parte de acuerdos más amplios de cooperación en materia de agua elaborados para las cuencas hidrográficas transfronterizas. Esto ilustra la creciente conciencia de la importancia de los acuíferos transfronterizos.

En todo el mundo existen iniciativas de cooperación científica en el marco de proyectos técnicos sobre acuíferos transfronterizos. Estas iniciativas pueden tener diversos alcances, algunas de ellas destinadas a la evaluación científica conjunta, mientras que otras abordan la gestión de cuestiones específicas. En estos casos, el papel de las organizaciones regionales e internacionales y de los donantes puede ser fundamental, sobre todo cuando los países implicados no están a la par en cuanto a capacidad, conocimientos e información, o cuando falta confianza.

Financiación

A diferencia de las aguas superficiales, cuyos costes de capital suelen ser cubiertos por el sector público, las infraestructuras de desarrollo de las aguas subterráneas suelen ser financiadas por el usuario final, ya sea una industria, un hogar, un agricultor o una comunidad. Los usuarios acceden al recurso directamente y de forma descentralizada. Los usuarios finales invierten su capital privado en el coste del acceso a las aguas subterráneas, que suele consistir en un coste fijo por el pozo y un coste variable por el bombeo. En algunos países, puede haber una tasa de extracción o una tarifa de aguas subterráneas, pero estas tasas y tarifas rara vez reflejan los verdaderos costes y el valor del recurso.

Los gobiernos deben evaluar y aceptar su papel potencial en la promoción de la sostenibilidad de los recursos de aguas subterráneas de acuerdo con las condiciones locales, y utilizar los limitados recursos financieros de manera más eficiente a través de iniciativas adaptadas. Los presupuestos gubernamentales deberían, como mínimo, financiar el control de las aguas subterráneas —calidad y cantidad, y los costes de funcionamiento y mantenimiento correspondientes— y potenciar la inversión privada financiando las iniciativas iniciales de exploración y gestión.

Es esencial que los países se comprometan a desarrollar un marco adecuado y eficaz para la gobernanza de las aguas subterráneas

Existe la oportunidad de integrar mejor el desarrollo y la gestión sostenible de las aguas subterráneas como parte de otros proyectos e iniciativas del sector del agua. Por ejemplo, el almacenamiento y la extracción de aguas subterráneas pueden incluirse como parte del abastecimiento de agua urbana para añadir seguridad y flexibilidad en caso de variación estacional de los recursos. Esto permitiría aprovechar aún más la financiación existente de la ayuda oficial al desarrollo, de las tarifas de abastecimiento de agua y saneamiento, e incluso de las asociaciones público-privadas. Las tasas e impuestos en otros sectores, como el agrícola, también pueden ayudar a financiar las iniciativas relacionadas con las aguas subterráneas y a reducir las posibles externalidades negativas.

En muchos países, las actividades financiadas con fondos públicos en otros sectores contribuyen al agotamiento o la contaminación de los recursos hídricos subterráneos. Por ejemplo, las subvenciones en el sector energético que incentivan la sobreexplotación de las aguas subterráneas mediante la reducción de las tarifas eléctricas, o las subvenciones agrícolas que fomentan los cultivos con alta demanda de agua, pueden convertirse en incentivos perversos. Reformar las subvenciones perjudiciales y alinearlas con las políticas de aguas subterráneas debería formar parte de la agenda de financiación del agua.

Avanzando

La Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU), así como el Consejo de Derechos Humanos, reconocen que el acceso equitativo al agua potable y al saneamiento son derechos humanos distintos. Se espera que los Estados Miembros de la ONU hagan realidad los derechos humanos al agua potable y al saneamiento a través de planes de acción o estrategias, y —dado que las aguas subterráneas son un componente esencial del abastecimiento de agua y del saneamiento— a la protección de las aguas subterráneas y la recarga de los acuíferos.

Es esencial que los países se comprometan a desarrollar un marco adecuado y eficaz para la gobernanza de las aguas subterráneas. Esto requiere que los gobiernos tomen la iniciativa y asuman la responsabilidad de establecer y mantener una estructura de gobernanza plenamente operativa, que incluya: la base de conocimientos; la capacidad institucional; las leyes, los reglamentos y su aplicación; la política y la planificación; la participación de las partes interesadas; y la financiación adecuada. También corresponde a los países garantizar la

plena aplicación de sus políticas y planes (gestión de las aguas subterráneas). Es imperativo que los gobiernos asuman su papel de custodios del recurso en vista de los aspectos de bien común de las aguas subterráneas y garanticen que el acceso a las aguas subterráneas (y los beneficios de las mismas) se distribuyan de forma equitativa y que el recurso siga estando disponible para las generaciones futuras.

Coda

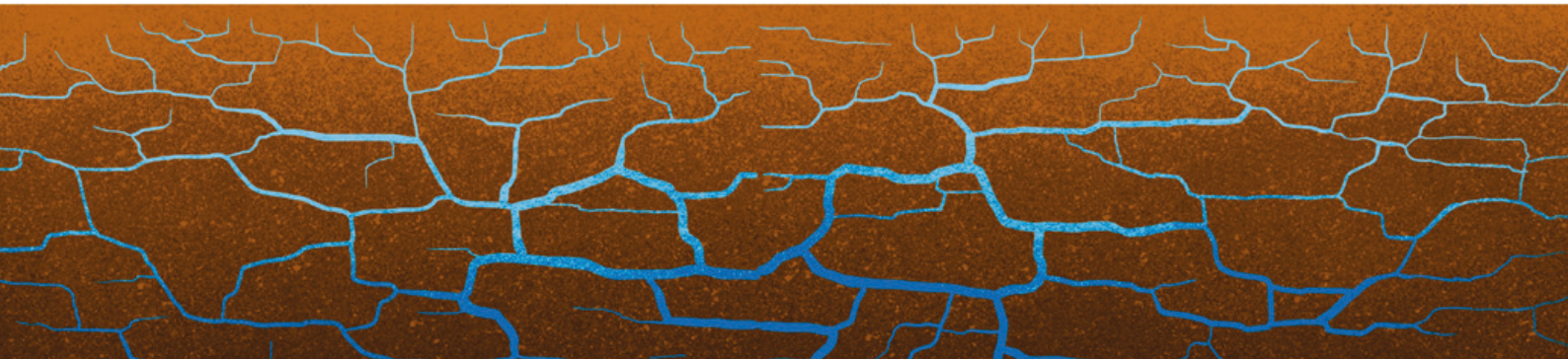
Los recursos totales de agua subterránea de la Tierra representan un enorme abastecimiento de agua dulce. En un mundo con una demanda de agua cada vez mayor, en el que los recursos hídricos superficiales suelen ser escasos y están cada vez más estresados, el valor de las aguas subterráneas está a punto de ser reconocido progresivamente por todos, como un recurso que ha permitido el florecimiento de las sociedades humanas desde hace milenios.

Sin embargo, a pesar de su abundancia general, las aguas subterráneas siguen siendo vulnerables a la sobreexplotación y la contaminación, que pueden tener efectos devastadores sobre el recurso y su disponibilidad. Para liberar todo el potencial de las aguas subterráneas será necesario realizar esfuerzos firmes y concertados para gestionarlas y utilizarlas de forma sostenible. Y todo empieza por hacer visible lo invisible.

Prólogo

Estado de los recursos hídricos subterráneos

Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos
Michela Miletto, Jac van der Gun y Richard Connor



Como preludio al *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*, este prólogo presenta estadísticas agregadas, cifras y otra información sobre determinadas características generales y el estado de los recursos hídricos del mundo, así como sobre las tendencias observadas. La información numérica agregada a escala mundial, continental o regional se basa en innumerables observaciones no coordinadas sobre variables difíciles de evaluar, mientras que la documentación sobre su procesamiento suele ser inexistente. Por lo tanto, esta información está inevitablemente sujeta a una importante incertidumbre, incluso en la medida en que circulan diferentes versiones de una misma variable. A pesar de estas incertidumbres, se cree que la información presentada facilitará la comprensión del entorno macroscópico y el contexto de los temas relativos a las aguas subterráneas que se tratan en los distintos capítulos del informe, siempre que se tengan debidamente en cuenta los fallos mencionados.

Volumen de agua dulce

El agua es el líquido más abundante de la Tierra, pero la mayor parte es salina. A lo largo de los años, varios científicos han publicado estimaciones del volumen mundial de agua dulce. Shiklomanov y Rodda (2003) destacan la estimación de Garmonov publicada en Korzun (1974), según la cual el volumen global de agua dulce líquida (menos del 1 % de toda el agua de la Tierra en forma líquida, congelada o de vapor) se estima en 10,6 millones de km³, lo que equivale a una capa de agua de 79 m (profundidad equivalente) en toda el área terrestre del globo, excluyendo la Antártida. Aproximadamente el 99 % de este volumen consiste en agua subterránea, y solo 1,4 millones de km³ de agua subterránea almacenada es "moderna", lo que significa que entró en el subsuelo hace menos de 50 años (Gleeson et al., 2016). Entre las estimaciones más recientes del volumen mundial de agua dulce se encuentran las de Kotwicki (2009) 11,1 millones de km³, y de Ferguson et al. (2021): 15,9 millones de km³ (solo el componente de agua dulce subterránea). Todas las estimaciones se basan en parte en suposiciones bastante arbitrarias, por lo que no es posible decidir qué estimación es la más realista. Evidentemente, estas estimaciones están sujetas a un amplio margen de incertidumbre.

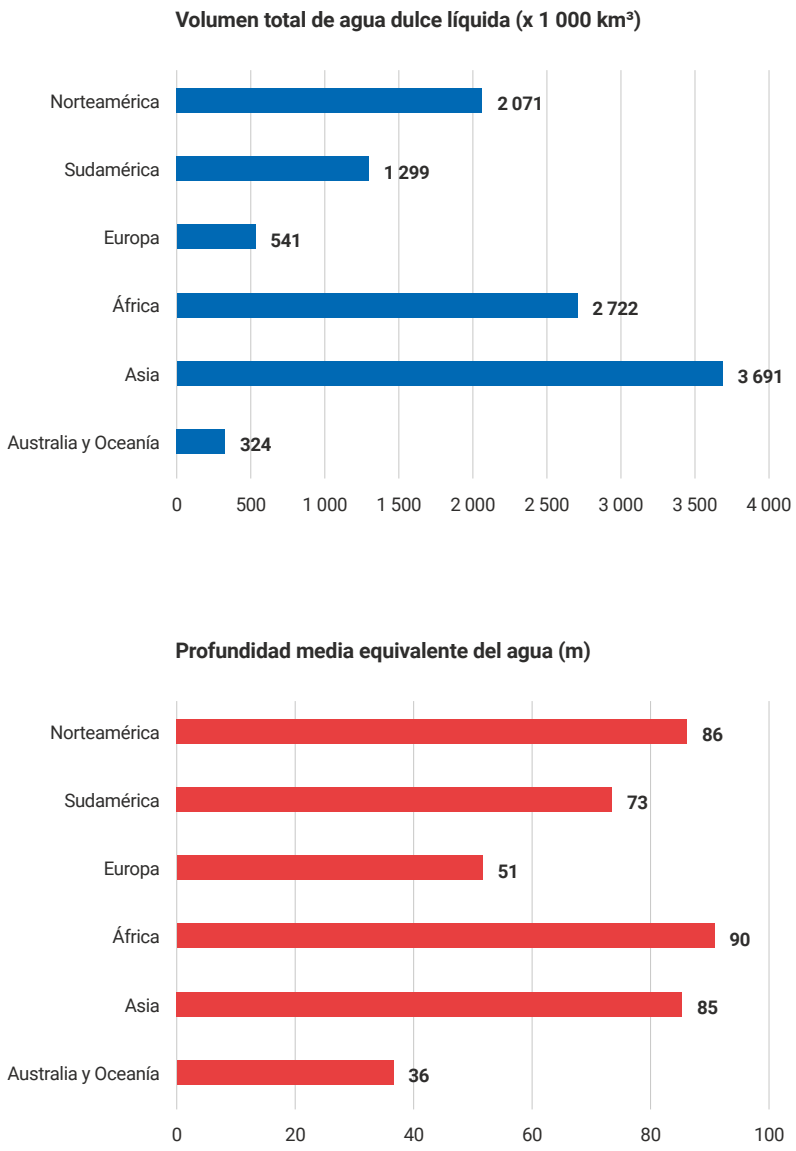
Al igual que los volúmenes de agua dulce, las tasas de renovación del agua dulce también están sujetas a una considerable variación espacial

El volumen de agua dulce se distribuye de forma irregular en los continentes, lo que se explica en parte por las diferencias de tamaño de los mismos y en parte por las diferencias en el volumen medio de agua dulce por unidad de área. En la figura 1 se muestra un desglose realizado por Korzun (1974), basado en la estimación de Garmonov. A escala de países y territorios más pequeños, la variación espacial de la profundidad del agua equivalente es mucho más pronunciada, con valores que van de cero a casi dos mil metros.

Las variaciones de los volúmenes de agua dulce a lo largo del tiempo, como las causadas por la variación climática estacional, el cambio climático y la explotación intensiva, no tienen, durante el tiempo de vida de un ser humano, ningún efecto apreciable en los volúmenes mostrados en la figura 1. Sin embargo, las mismas variaciones pueden tener, dentro del mismo marco temporal, impactos drásticos a escala local o regional. Algunos ejemplos son: a) la reducción de lagos como el Lago Chad, el Mar de Aral, el Lago Urmia, el Gran Lago Salado y el Lago Poopó (Wurtsbaugh et al., 2017); b) la desaparición de numerosos manantiales en todo el mundo; la disminución de los caudales en ríos como el Río Amarillo, el Ganges, el Río Grande, el Congo y el Murray-Darling (Shi et al., 2019); y c) el descenso constante de los niveles de agua subterránea en sistemas acuíferos intensamente explotados, como la cuenca del Ganges-Brahmaputra, la llanura del norte de China y el valle central de California (Shamsudduha y Taylor, 2020).

Figura 1

Volúmenes estimados de agua dulce líquida presentes en los diferentes continentes



Fuente: Shiklomanov y Rodda (2003), basado en los datos de Korzun (1974).

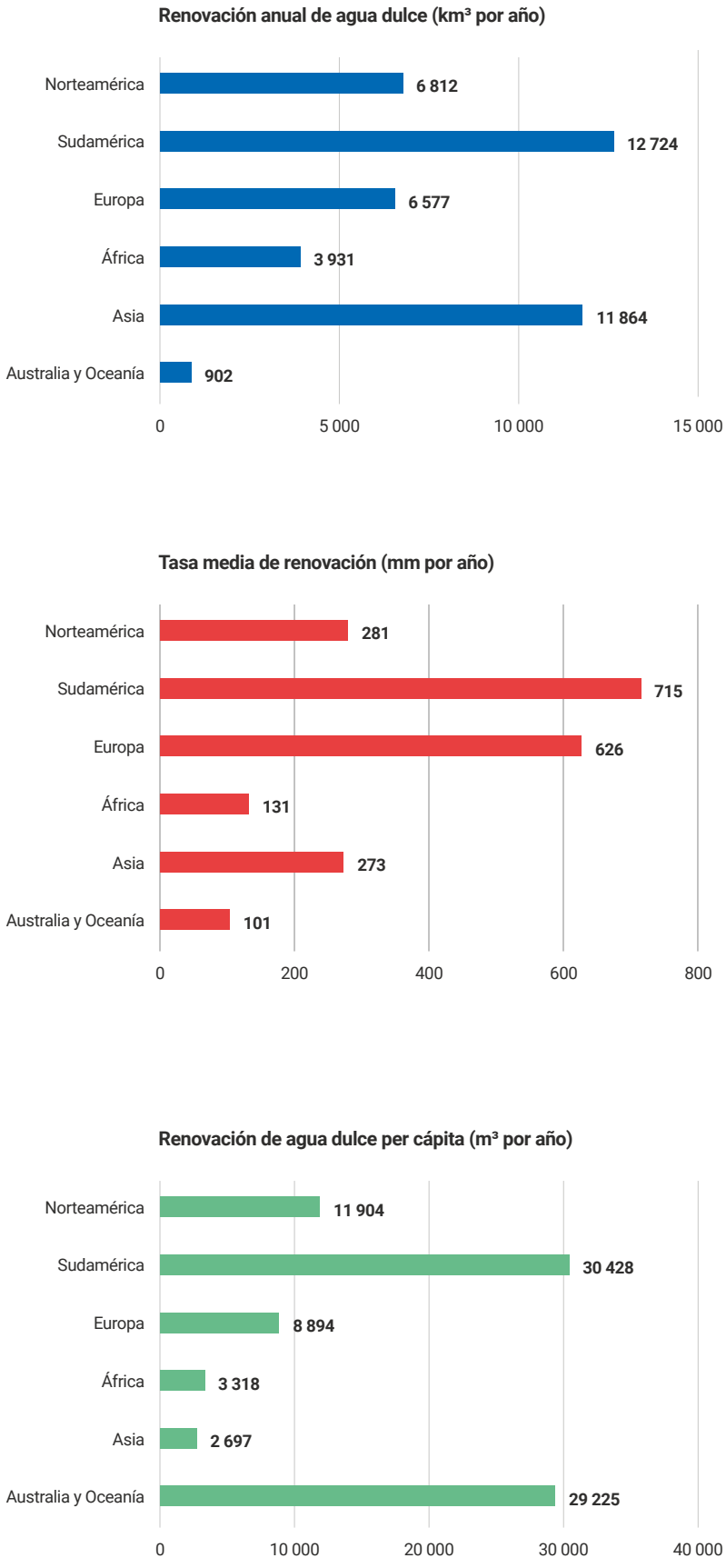
Renovación del agua dulce

La tasa de renovación define el límite superior teórico de la extracción sostenible de agua. La renovación del agua dulce (esencialmente el agua de la parte terrestre del ciclo del agua que se mantiene en movimiento), reemplaza los volúmenes descargados de los arroyos, los suelos y los acuíferos, y permite a los seres humanos extraer agua de forma sostenible. Al igual que los volúmenes de agua dulce, las tasas de renovación del agua dulce también están sujetas a una considerable variación espacial. Incluso cuando se agregan al nivel de los continentes, muestran marcadas diferencias (figura 2).

Obviamente, las diferencias en la participación de cada continente en el volumen global de renovación de agua dulce (valor medio: 37 000 km³/año) se deben en parte a las variaciones en el tamaño de los continentes, pero también hay diferencias significativas en la tasa de renovación por unidad de área (profundidad del agua en mm por año). La profundidad media de renovación del agua dulce en los continentes comparativamente húmedos de América del Sur y Europa es de cuatro a siete veces mayor que la de Asia, África y Australia y Oceanía, continentes que incluyen cada uno vastos territorios áridos y semiáridos. Según los datos presentados por Ritchie y Roser (2017), la renovación media anual de agua dulce promediada sobre el total de

Figura 2

Estimación de la renovación del agua dulce en los distintos continentes, 2015



Fuente: Ritchie y Roser (2017), basado en los datos de Aquastat

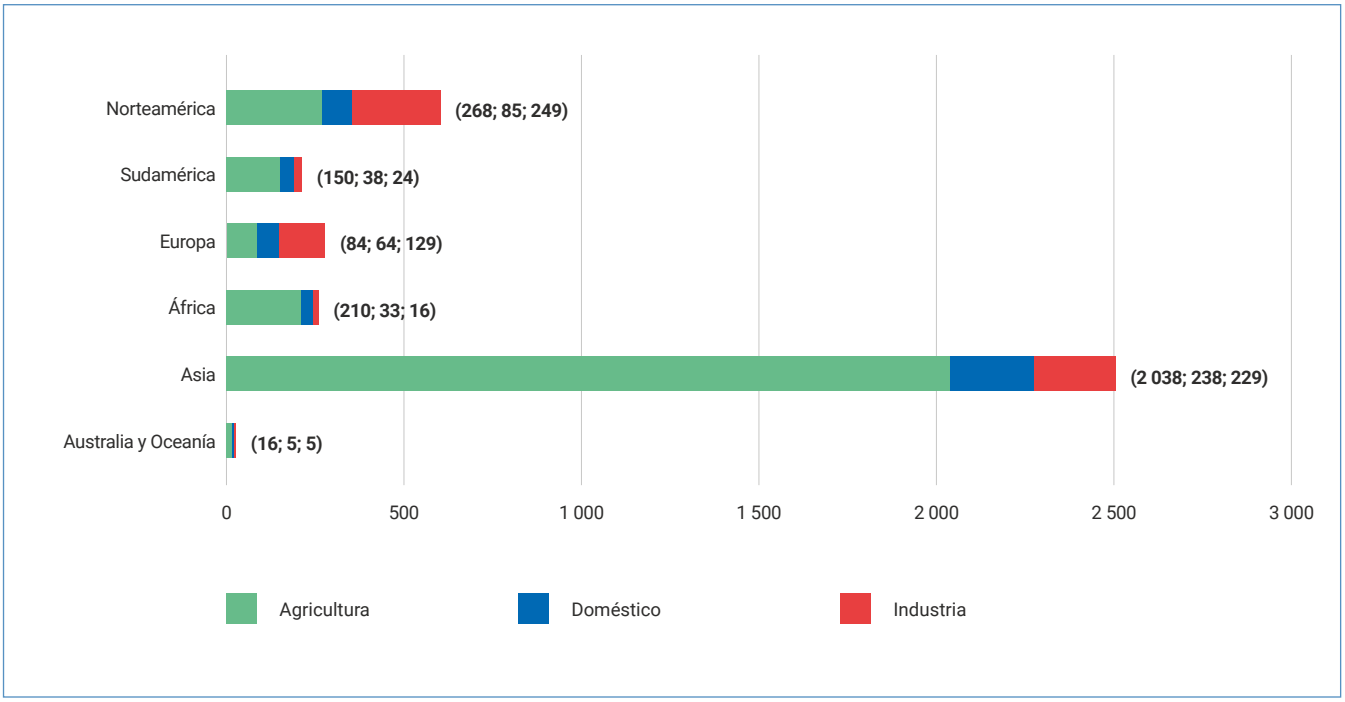
la superficie terrestre mundial (excluida la Antártida) equivale a una profundidad de agua de 274 mm, solo el 0,35 % de la profundidad media del agua dulce almacenada, lo que implica un tiempo de residencia medio de casi trescientos años. África y Asia tienen las tasas más bajas de renovación de agua dulce per cápita.

Extracción de agua dulce, estrés hídrico y escasez de agua

La extracción de agua dulce de arroyos, lagos, acuíferos y embalses construidos por el hombre (las llamadas fuentes de "agua azul") ha aumentado fuertemente durante el último siglo, y sigue aumentando en la mayor parte del mundo. La extracción mundial de agua dulce era probablemente de unos 600 km³/año en 1900 y aumentó a 3 880 km³/año en 2017, según estimaciones recientes (Naciones Unidas, 2021; Aquastat, s.f.). La tasa de aumento fue especialmente alta (alrededor del 3 % anual) durante el periodo 1950-1980, en parte debido a una mayor tasa de crecimiento de la población, y en parte al rápido aumento del desarrollo de las aguas subterráneas, en particular para la irrigación. En la actualidad, la tasa de aumento es de aproximadamente el 1 % anual, en sintonía con la actual tasa de crecimiento de la población.

Como muestra la figura 3, Asia tiene la mayor cuota de extracción de agua dulce en el mundo (64,5 %). Le siguen Norteamérica (15,5 %), Europa (7,1 %), África (6,7 %), Sudamérica (5,4 %) y Australia y Oceanía (0,7 %).

Figura 3 Extracción de agua dulce en 2017, agregada por continente y por uso del sector del agua (km³/año)



Fuente: Basado en datos de Aquastat (s.f.).

La comparación con las estimaciones de renovación (figura 2) muestra que, a escala mundial, la tasa de extracción de agua dulce ha alcanzado el 10,5 % de la tasa media anual de renovación de agua dulce. Estos porcentajes varían significativamente entre los continentes: alto para Asia (41,3 %), bajo para Sudamérica (1,7 %) y Australia y Oceanía (2,9 %), con valores intermedios en África (6,6 %), Norteamérica (8,8 %) y Europa (4,2 %).

Aunque el ritmo de aumento del uso del agua dulce se ha estabilizado en la mayoría de los países desarrollados, sigue creciendo en la mayoría de las economías emergentes, así como en los países de ingresos medios y bajos. A nivel mundial, se espera que el uso del agua crezca

aproximadamente un 1 % al año durante los próximos 30 años, impulsado por el aumento de la demanda en los sectores de la industria y la energía, así como por los usos municipales y domésticos, principalmente en función del desarrollo industrial y la mejora de la cobertura de los servicios de agua y saneamiento, en combinación con el crecimiento de la población, el desarrollo económico y los cambios en los patrones de consumo (Naciones Unidas, 2021).

Se calcula que cuatro mil millones de personas viven en áreas que sufren una grave escasez física de agua durante al menos un mes al año

La extracción como porcentaje de la renovación es un indicador de estrés hídrico utilizado a menudo, pero cuando se aplica a grandes áreas agregadas y a los datos medios anuales, resulta bastante ineficaz para detectar las zonas que sufren estrés hídrico. El indicador adquiere más sentido cuando se utiliza con una mayor resolución espacial y teniendo en cuenta la variación estacional, pero sigue teniendo algunos defectos, sobre todo porque se ignoran los flujos ambientales y los flujos de retorno de la fracción no consumida del agua extraída, mientras que a menudo no se sabe cómo deben interpretarse las puntuaciones del indicador.

Estas deficiencias se han abordado en el indicador de escasez de agua azul, introducido por Mekonnen y Hoekstra (2016). Este indicador se define como la huella hídrica azul dividida por la disponibilidad de agua azul. La huella hídrica azul se refiere al "consumo de agua azul" o a la "extracción neta de agua" y es igual al volumen de "agua azul" (= agua dulce superficial y subterránea combinada) que se extrae y no se devuelve a los sistemas de aguas subterráneas o superficiales porque el agua se evaporó o se incorporó a un producto. La disponibilidad de agua azul en un área determinada se calcula como la suma del escurrimiento generado en esa área y recibido desde aguas arriba, menos los requisitos de flujo ambiental de todas las áreas contribuyentes, y menos la huella hídrica en todas las áreas contribuyentes aguas arriba. La figura 4 muestra el patrón global simulado de escasez de agua azul de media anual, mientras que la figura 5 (basada en simulaciones por mes natural) indica el número de meses al año en los que la escasez de agua azul supera el 1,0, lo que indica una tasa de extracción insostenible. Se calcula que cuatro mil millones de personas viven en áreas que sufren una grave escasez física de agua durante al menos un mes al año (Mekonnen y Hoekstra, 2016). Las respuestas típicas para las áreas en las que los valores de escasez anual superan el 1,0 incluyen transferencias de agua desde las áreas vecinas con excedentes de agua (si están disponibles), o el agotamiento de los volúmenes de agua almacenada de los lagos, los embalses de aguas superficiales y, sobre todo, los acuíferos.

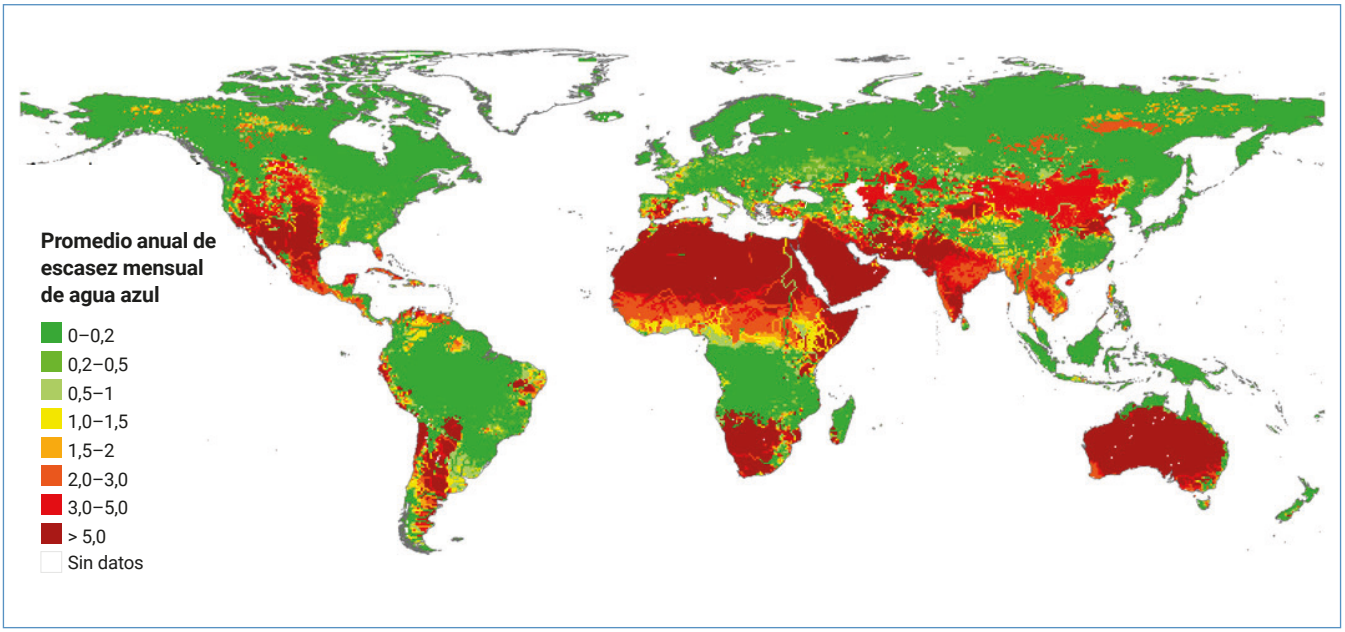
Recursos hídricos subterráneos y su distribución geográfica

Grandes volúmenes de agua dulce subterránea están presentes bajo la superficie del suelo y distribuidos por todo el planeta, pero su abundancia y las condiciones para su extracción están sujetas a una considerable variación espacial. Para ser productivos, los pozos tienen que adentrarse en formaciones geológicas que se caracterizan por una porosidad y permeabilidad comparativamente altas (los llamados "acuíferos", véase el capítulo 1), y que están llenos de agua dulce subterránea.

Los mapas hidrogeológicos muestran las pautas y los límites de las zonas en las que se encuentran esas formaciones favorables (acuíferos), alternando con zonas dominadas por formaciones que no pueden aportar cantidades significativas de agua a los pozos. La idoneidad de un determinado lugar o zona para la extracción de aguas subterráneas depende además de la tasa de reposición del acuífero explotado (recarga de aguas subterráneas) y de la calidad del agua. La recarga permite extraer agua subterránea de forma sostenible; si no existe o es mínima, la extracción de agua subterránea agota el volumen de agua subterránea almacenada.

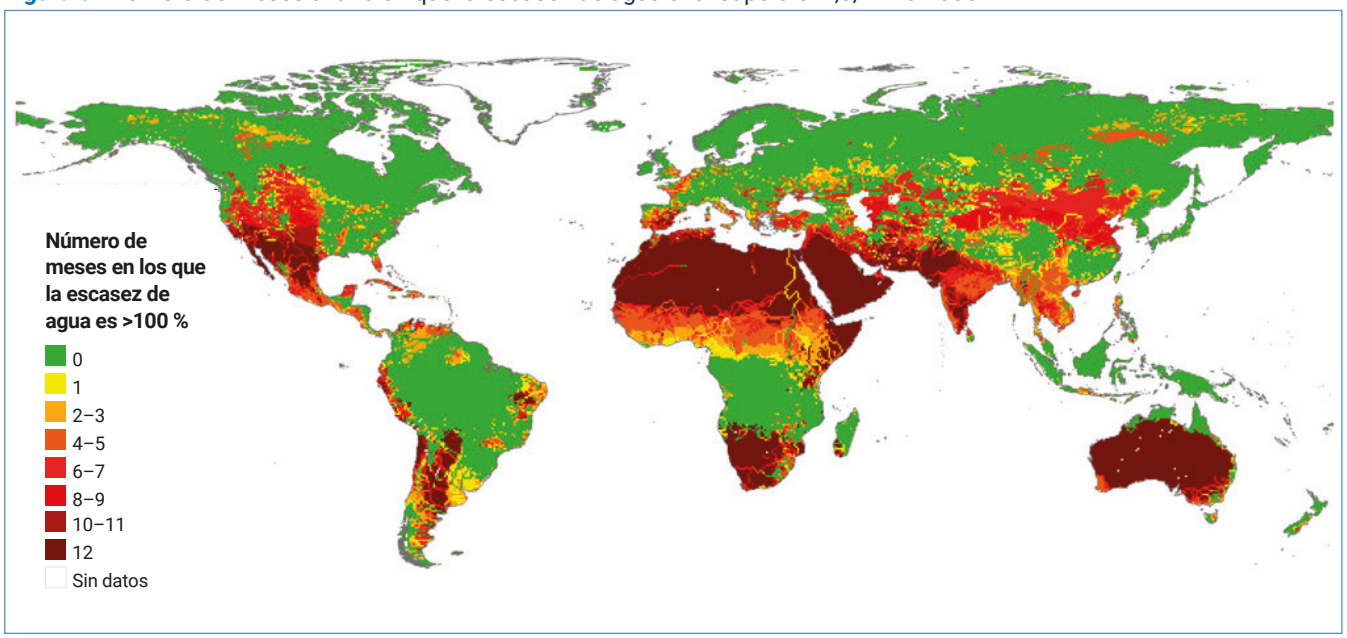
La figura 6 muestra un mapa hidrogeológico simplificado a escala mundial. Muestra las principales cuencas de aguas subterráneas (en color azul) en todos los continentes, una parte de ellas dotada de tasas de recarga altas o medias, y otras (en zonas áridas y de permafrost) sin recarga o con una recarga escasa. Estas grandes cuencas subterráneas contienen la mayor parte de las aguas subterráneas frescas almacenadas en la Tierra y presentan, en general, las condiciones más favorables para la extracción de aguas subterráneas. Las áreas con una

Figura 4 Promedio anual mensual de escasez de agua azul con una resolución de 30x30 minutos de arco, 1996-2005



Fuente: Mekonnen y Hoekstra (2016, fig. 2, p. 3).

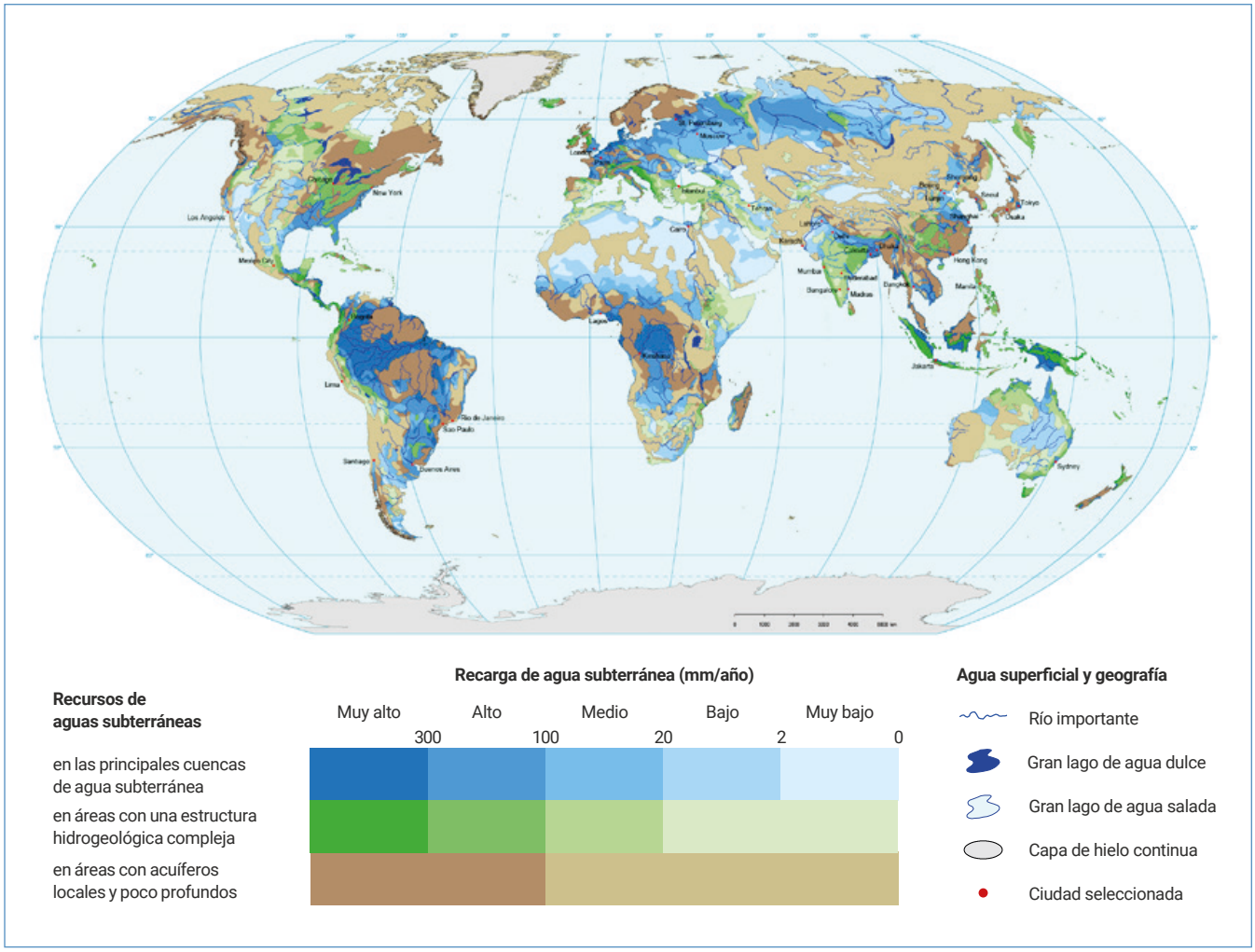
Figura 5 Número de meses al año en que la escasez de agua azul supera el 1,0, 1996-2005



Fuente: Mekonnen y Hoekstra (2016, fig. 3, p. 3).

estructura hidrogeológica compleja (color verde) contienen gruesas secuencias de formaciones que también transmiten cantidades significativas de agua subterránea (a menudo almacenada y fluyendo en fisuras más que en poros), pero su productividad tiende a ser menor que la de las principales cuencas subterráneas, en promedio. La tercera unidad cartográfica principal (color marrón) representa las áreas menos favorables para el desarrollo de las aguas subterráneas, pero hay que tener en cuenta que se trata solo de una caracterización macroscópica, no apropiada para las evaluaciones a escala local. Además de las zonas no productivas, esta unidad incluye numerosos acuíferos relativamente pequeños y/o poco profundos que pueden tener una enorme importancia local o regional. Para los proyectos locales, deben consultarse los mapas hidrogeológicos a escala local.

Figura 6 Recursos hídricos subterráneos del mundo



Fuente: BGR/UNESCO (2008).

Las aguas subterráneas dulces y salobres no solo se encuentran en el subsuelo de los continentes e islas: también están presentes en alta mar. La figura 7 muestra los resultados de un inventario reciente de estas masas. Algunas partes menores de estas masas de agua subterránea dulce o salobre de alta mar pueden recibir alguna recarga contemporánea (por afluencia lateral de un sistema de agua subterránea conectado en tierra), pero la mayoría de ellas son recursos no renovables. La viabilidad y el atractivo de la explotación de estas masas de agua dulce y salobre de alta mar para el abastecimiento de agua en el futuro aún deben ser explorados.

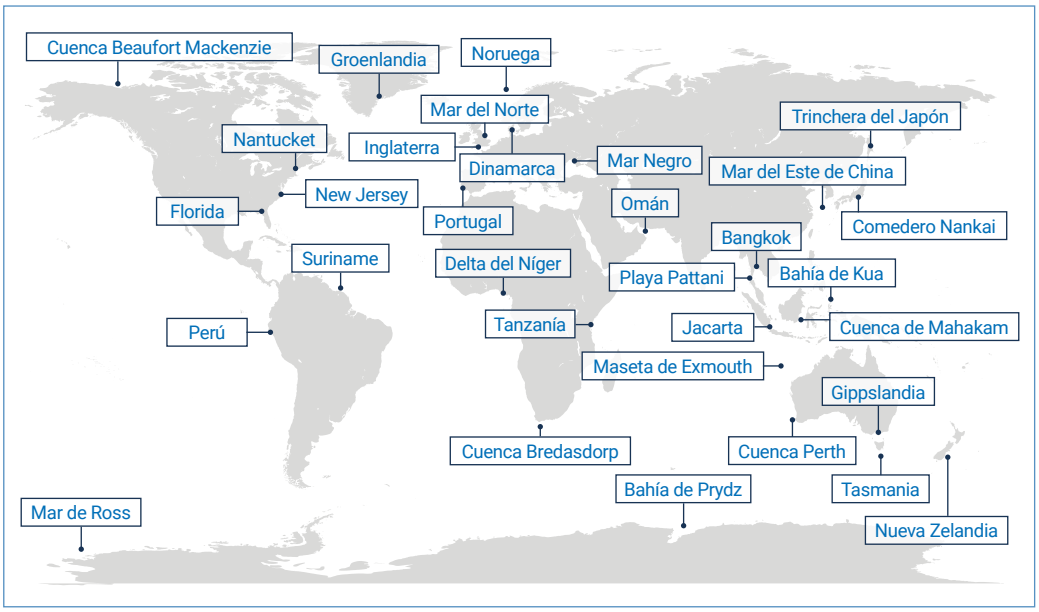
Extracción y uso de aguas subterráneas

En respuesta al rápido aumento de la demanda de agua y catalizada por el progreso técnico, científico y económico, la extracción de aguas subterráneas se ha disparado durante el siglo XX en la mayoría de los países del mundo, alcanzando niveles sin precedentes a principios del presente siglo. El cuadro 1 presenta las estimaciones de las extracciones de aguas subterráneas durante 2017, agregadas por región y por continente. Según esta tabla, la extracción total de agua subterránea a nivel mundial en 2017 fue de 959 km³, distribuida de forma desigual por todo el planeta[1]. Llama la atención que dos tercios de esta cantidad se hayan extraído en Asia, con cuotas destacadas en el Sur y el Este de Asia. América del Norte ocupa el segundo lugar por

[1] Los datos que estuvieron disponibles poco antes de la edición final de este informe apuntan a una extracción global de agua subterránea de 978 km³ para 2018. La diferencia con la estimación de 2017 se encuentra dentro del margen de las variaciones interanuales y de las inexactitudes de los informes.

Figura 7

Mapa mundial de las apariciones conocidas de aguas subterráneas dulces y salobres en alta mar



Fuente: Basado en Post et al. (2013, fig. 1, p. 72).

A pesar de que África representa alrededor del 17 % de la población mundial (1 400 millones), su extracción de agua subterránea es comparativamente baja, representando algo menos del 5 % del total mundial

continentes, con una cuota del 16 % de la extracción mundial de aguas subterráneas. De hecho, ocho de los diez países con mayor participación en la extracción mundial de aguas subterráneas (que representan el 75 % del total) se encuentran en Asia (en orden descendente: India, China, Pakistán, Irán, Indonesia, Bangladesh, Arabia Saudita y Türkiye), y dos en América del Norte (Estados Unidos de América y México) (véase el cuadro 5.1). A pesar de que África representa alrededor del 17 % de la población mundial (1 400 millones), su extracción de agua subterránea es comparativamente baja, representando algo menos del 5 % del total mundial. Australia y Oceanía, con su escasa población, también tiene una cuota muy baja en la extracción mundial de aguas subterráneas.

La comparación con las estimaciones realizadas anteriormente para 2010 (Margat y Van der Gun, 2013) muestra que la tasa total de retirada mundial no ha cambiado significativamente entre 2010 y 2017. Sin embargo, a nivel regional, los porcentajes de cambio varían considerablemente. Aunque estos porcentajes parecen bastante pronunciados para algunas de las regiones, todavía no permiten sacar conclusiones firmes sobre las tendencias, ya que las diferencias calculadas pueden deberse a la variación climática interanual o incluso a las incoherencias en los informes de los organismos nacionales. Tras examinar las series temporales de registros anuales, parece que las tasas de extracción de aguas subterráneas en la mayoría de los países europeos se han estabilizado, o incluso están disminuyendo ligeramente. Lo mismo parece ocurrir en el norte de América del Norte (es decir, el Canadá, los Estados Unidos y Groenlandia) y en el sur y el este de Asia. Aparentemente, la extracción de agua subterránea en los países correspondientes ha alcanzado intensidades más allá de las cuales la expansión ya no es deseable o viable.

El cuadro 1 muestra también que, a nivel mundial, la extracción de aguas subterráneas corresponde actualmente al 25 % de la extracción total de agua dulce. Los porcentajes varían según los continentes: son bajos en el caso de América del Sur, gran parte de la cual está dotada de abundantes recursos hídricos superficiales permanentes, y son altos en el caso de Australia y Oceanía, donde esos recursos hídricos superficiales son escasos.

En el cuadro 2 se presenta un desglose de la extracción de aguas subterráneas por sectores de uso del agua. Muestra que el 69 % del volumen total se extrae para su uso en el sector agrícola, el 22 % para usos domésticos y el 9 % para fines industriales. Estos porcentajes varían según los continentes. Los capítulos 3, 4 y 5 de este informe proporcionan más información sobre los diferentes usos humanos de las aguas subterráneas, mientras que el capítulo 6 aborda los servicios *in situ* de las aguas subterráneas en apoyo de los ecosistemas.

Tabla 1 Extracciones de agua subterránea en 2017, agregadas por las principales regiones del mundo

Continente y región	Extracción de aguas subterráneas (km³/año)	% cambio desde 2010	% de la extracción total de agua dulce
América del Norte	156	0	26
Norte de América del Norte	113	-1	24
América Central	37,1	+12	38
Caribe	6,5	-37	27
América del Sur	27	+6	13
Norte y este de Sudamérica	7,9	-32	9
Países andinos		-22	11
Sur de Sudamérica	14,7	+83	19
Europa	65	-6	23
Europa del Norte	4,7	-3	20
Europa Occidental	15,2	+1	22
Europa del Este	15,2	-24	18
Europa del Sur	29,7	+1	31
África	45	+10	20
África del Norte	26,2	+24	21
África Occidental	8,0	+9	28
África Central	2,1	-21	72
África Oriental	6,3	-6	13
África Meridional	2,8	-16	14
Asia	657	-4	26
Asia del Norte	3,1	-10	15
Asia Central	2,7	-85	2
Asia Occidental	63,7	-3	39
Asia Meridional	401	-5	39
Asia Oriental	132	-6	18
Asia Sudoriental	54,2	+54	11
Australia y Oceanía	8	+21	31
Australasia	7,5	+30	29
Micro, Mela y Polinesia	0,6?	-36?	79?
Mundo	959	-2	25

Fuente: Estimaciones basadas en Aquastat (s.f.), Eurostat (s.f.) y Margat y Van der Gun (2013).

Tabla 2 Desglose de la extracción de agua subterránea en 2017 por sector de uso del agua y por continente

	Extracción de aguas subterráneas		Volúmenes por sector de uso del agua			Porcentajes por sector de uso del agua		
	(km³/año)	% del mundo	Agricultura	Doméstico	Industria	Agricultura	Doméstico	Industria
América del Norte	156	16	97	48	12	62	30	7
América del Sur	27	3	13	9	5	49	32	20
Europa	65	7	24	29	12	36	45	19
África	45	5	29	14	2	65	32	4
Asia	657	68	496	107	53	76	16	8
Australia y Oceanía	8	1	4	4	0	48	48	3
Mundo	**959**	**100**	**664**	**211**	**84**	**69**	**22**	**9**

Fuente: Estimaciones basadas en Aquastat (s.f.), Eurostat (s.f.) y Margat y Van der Gun (2013).

Limitaciones naturales específicas del área para la extracción de aguas subterráneas

Evidentemente, la ausencia de acuíferos productivos en un área determinada constituye una limitación primordial para la extracción de aguas subterráneas. Los mapas hidrogeológicos proporcionan orientación sobre la existencia o ausencia de tales acuíferos. Sin embargo, existen más limitaciones naturales a la extracción de aguas subterráneas; a continuación, se mencionan y describen brevemente algunas de ellas.

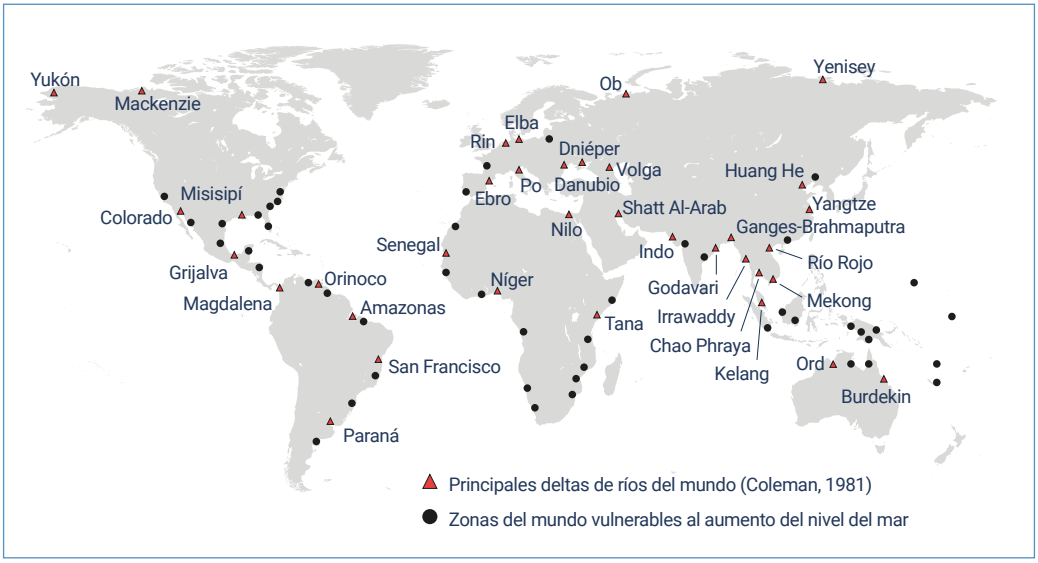
Las deficiencias en la calidad de las aguas subterráneas constituyen una importante limitación para su extracción. Aunque la mayor parte de las aguas subterráneas situadas a unos cientos de metros por debajo de la superficie terrestre son dulces, más de la mitad de las aguas subterráneas situadas bajo la superficie terrestre del planeta son salinas y, por tanto, inadecuadas para la mayoría de los tipos de uso del agua. La elevada salinidad de las aguas subterráneas predomina en los dominios más profundos de las cuencas sedimentarias (paleo salinidad), pero en muchas zonas dispersas por el mundo también se observa a menor profundidad, por ejemplo, en áreas costeras y en zonas con un nivel freático muy bajo en climas áridos (Van Weert et al., 2009). Además, en algunas áreas las aguas subterráneas frescas contienen contaminantes naturales en concentraciones excesivas, por ejemplo, arsénico y fluoruro.

Otra limitación para la extracción de aguas subterráneas es la profundidad por debajo de la superficie del terreno. Si hay que perforar pozos muy profundos para explotar los acuíferos productivos, o si los niveles de agua subterránea están muy por debajo de la superficie, para la mayoría de la gente y para los fines previstos el coste de la construcción de pozos o del bombeo puede resultar prohibitivo para la extracción de agua subterránea. Esta limitación tiende a aumentar las diferencias de acceso entre los segmentos pobres y los más ricos de la sociedad local.

Además, la extracción de agua subterránea cerca de la costa en los acuíferos costeros puede desencadenar la intrusión de agua de mar, lo que pondrá fin a la extracción local de agua dulce subterránea. La subida del nivel del mar reducirá igualmente la extracción de agua subterránea de los acuíferos costeros bajos. La figura 8 muestra los puntos calientes globales de las zonas vulnerables a la intrusión de agua de mar y a la subida del nivel del mar. Una condición física similar que limita la extracción de agua subterránea dulce es la presencia de agua subterránea salina o salobre debajo y conectada hidráulicamente con el agua subterránea dulce poco profunda. La extracción de agua dulce subterránea en estas áreas (a menudo también en las zonas costeras) tiende a verse obstaculizada por la subida de agua salina o salobre.

Figura 8

Puntos calientes mundiales de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión de agua de mar y a la subida del nivel del mar

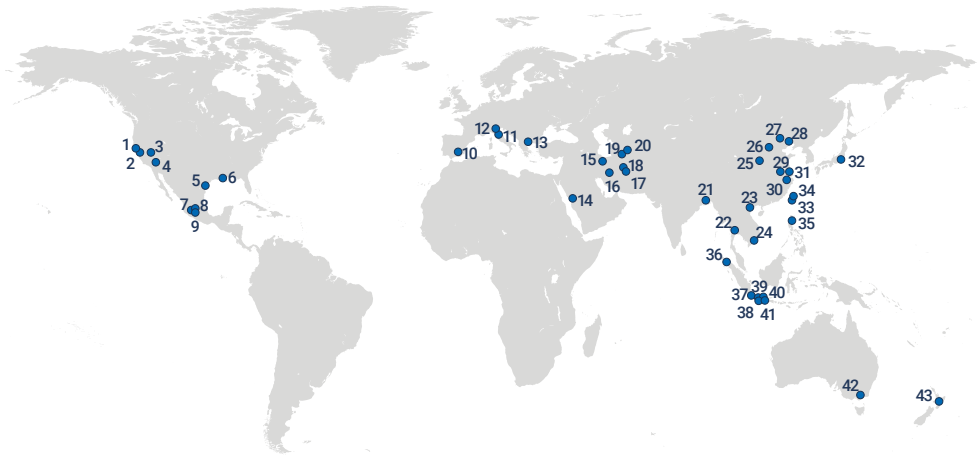


Fuente: Basado en Oude Essink et al. (2010, fig. 1, p. 2).

Por último, los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas y las capas sedimentarias poco profundas y compresibles conectadas hidráulicamente a los acuíferos son componentes adicionales del entorno natural que pueden imponer limitaciones a la extracción de aguas subterráneas, si se quiere evitar la degradación de los ecosistemas y el hundimiento del terreno. En la figura 9 se muestran los puntos calientes globales de hundimiento del terreno inducido por la extracción de aguas subterráneas.

Figura 9

Puntos calientes mundiales de hundimiento del terreno inducido por la extracción de aguas subterráneas



Fuente: Basado en Guzy y Malinowska (2020, fig. 1, p. 4).

Nota: Estados Unidos de América: 1. Valle de Santa Clara; 2. Valle de San Joaquín; 3. Las Vegas; 4. Eloy Basin; 5. Houston; 6. Nueva Orleans. México: 7. Celaya; 8. Zamora de Hidalgo; 9. Ciudad de México. España: 10. Lorca. Italia: 11. Ravenna; 12. Venecia. Grecia: 13. Región de Salónica. Arabia Saudita: 14. Wa di Al-Yutama. Irán: 15. Teherán; 16. Yazd; 17. Rafsanjan; 18. Zarand; 19. Kashmar; 20. Mashad. India: 21. Calcuta. Tailandia: 22. Bangkok. Viet Nam: 23. Hanoi; 24. Ho Chi Minh. China: 25. Xian; 26. Taiyuan; 27. Beijing; 28. Tianjin; 29. Su-Xi-Chang; 30. Hangzhou-Jiaxing-Huzhou; 31. Shanghai. Japón: 32. Tokio. Provincia china de Taiwán: 33. Yunlin; 34. Taipei. Filipinas: 35. Manila. Indonesia: 36. Medan; 37. Yakarta; 38. Bandung; 39. Blanakan; 40. Pekalongan; 41. Semarang. Australia: 42. Latrobe Valley. Nueva Zelandia: 43. Wairakei.

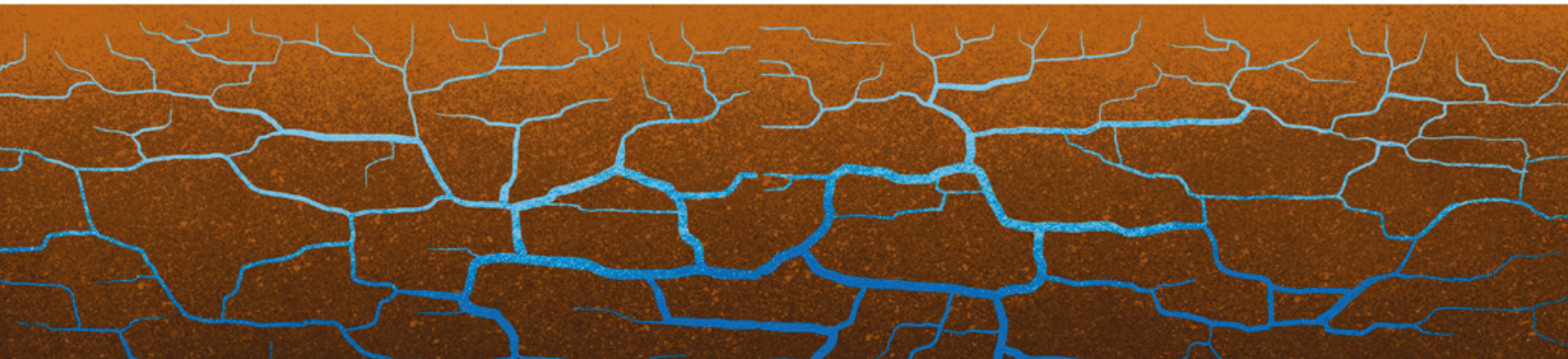
Capítulo 1

Introducción

Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos
Michela Miletto, Jac van der Gun y Richard Connor

UNESCO-PHI
Dan Lapworth*, Abhijit Mukherjee y Alice Aureli

* Afiliado al British Geological Survey.



1.1 Objetivo y alcance de este informe

El objetivo de esta edición del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR 2022) es centrar la atención en las aguas subterráneas, llamando la atención sobre sus funciones, retos y oportunidades específicas en el contexto del desarrollo, la gestión y la gobernanza de los recursos hídricos en todo el mundo.

Las aguas subterráneas representan aproximadamente el 99 % de toda el agua dulce líquida de la Tierra (Shiklomanov y Rodda, 2003), ofrece a las sociedades enormes oportunidades de obtener beneficios sociales, económicos y medioambientales, incluidas las posibles contribuciones a la adaptación al cambio climático y a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Su contribución a la satisfacción de la demanda de agua es considerable. Por ejemplo, las aguas subterráneas proporcionan el 49 % del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial (Aquastat, s.f.; Margat y Van der Gun, 2013) y alrededor del 25 % de toda el agua extraída para irrigación, sirviendo al 38 % de las tierras de regadío del mundo (Aquastat, s.f.; Margat y Van der Gun, 2013; Siebert et al., 2013). Sin embargo, a pesar de su enorme importancia, este recurso natural es a menudo poco conocido y, en consecuencia, infravalorado, mal gestionado e incluso abusado. En el contexto de la creciente escasez de agua en muchas partes del mundo, no se puede seguir pasando por alto el enorme potencial de las aguas subterráneas y la necesidad de gestionarlas cuidadosamente.

Las aguas subterráneas representan aproximadamente el 99 % de toda el agua dulce líquida de la Tierra

Las aguas subterráneas están íntimamente interconectadas e interactúan con muchos otros componentes del entorno físico de la Tierra. Esto puede observarse en el ciclo del agua, en el que el agua atmosférica y el agua superficial, al filtrarse al subsuelo, se convierten en aguas subterráneas que, a su vez, tarde o temprano se vierten en masas de agua superficiales o en el mar, o vuelven a la atmósfera por evaporación. Transformaciones similares tienen lugar en la cadena de uso del agua, una rama lateral antropogénica del ciclo del agua: cuando se extraen aguas subterráneas o superficiales, estas aguas brutas se convierten, en algunos casos mediante tratamiento, en aguas subterráneas potables, se suministran a los usuarios y la parte no consumida se convierte posteriormente en aguas residuales que se vierten —tratadas o no— a los sistemas de aguas subterráneas o superficiales. Las aguas subterráneas también participan en otros muchos ciclos y procesos naturales, y desempeñan un importante papel en el mantenimiento de la salud humana, los medios de vida, el desarrollo económico y los ecosistemas. La conciencia de estas interrelaciones ha llevado a la opinión ampliamente compartida de que el desarrollo y la gestión de las aguas subterráneas deben tener lugar con enfoques integrados. Sin embargo, esto no resta importancia a la necesidad crítica de comprender adecuadamente las facetas específicas de las aguas subterráneas y de los procesos en los que participan. Este informe pretende contribuir a esta comprensión.

Este primer capítulo del informe presenta los conceptos básicos y la terminología relacionada con las aguas subterráneas y los acuíferos[2] en el contexto de las perspectivas e iniciativas mundiales, y resume los principales retos y oportunidades relacionados con las aguas subterráneas. El siguiente capítulo aborda los aspectos jurídicos y otros aspectos institucionales de la gobernanza de las aguas subterráneas. Los capítulos siguientes describen las aguas subterráneas desde la perspectiva de los tres principales sectores de uso del agua en la sociedad humana: la agricultura (capítulo 3), los asentamientos humanos (capítulo 4) y la industria (capítulo 5), sus interacciones con los ecosistemas (capítulo 6) y su relación con el cambio climático (capítulo 7). El capítulo 8 presenta diferentes perspectivas sobre las aguas subterráneas en cinco regiones del mundo. Por último, se describen y discuten las opciones de respuesta en términos de ampliación de la base de conocimientos (capítulo 9), política y planificación de las aguas subterráneas (capítulo 10), gestión de las aguas subterráneas (capítulo 11), recursos acuíferos transfronterizos (capítulo 12) y financiación (capítulo 13). El informe concluye con una perspectiva para avanzar en el desarrollo, el uso, la gestión y la protección de los recursos hídricos subterráneos de la forma más prudente posible y crear las condiciones propicias para ello (capítulo 14).

[2] Véase el apartado 1.3 para la definición y caracterización de los acuíferos.

1.2 Propiedades y características únicas de las aguas subterráneas y de los sistemas de aguas subterráneas

1.2.1 ¿Qué son las aguas subterráneas?

Mucha gente considera que el agua subterránea es sinónimo de agua subterránea, es decir, toda el agua que se encuentra bajo la superficie de la tierra. Los hidrogeólogos e hidrólogos, sin embargo, distinguen entre el agua subterránea en la zona saturada (donde todos los intersticios están completamente llenos de agua) y la de la zona no saturada (donde los intersticios contienen tanto agua como aire). Reservan el término agua subterránea solo para la primera, es decir, para el agua que se encuentra por debajo del nivel freático[3]. Esta definición más estricta de las aguas subterráneas se adopta a lo largo de este informe.

1.2.2 Propiedades únicas y características relacionadas

Las aguas subterráneas y las superficiales están estrechamente interconectadas e interactúan. Para muchos usos humanos, cualquiera de las dos puede ser sustituida por la otra. No obstante, algunas propiedades y características distinguen notablemente los sistemas de aguas subterráneas (véase el cuadro 1.1) de los sistemas de aguas superficiales:

- El agua subterránea está presente en *los poros, fisuras y otros huecos de las formaciones geológicas* y no existe sin esta matriz litológica.
- Las aguas subterráneas son *invisibles*, están ocultas a simple vista.
- El agua subterránea es un recurso *distribuido espacialmente*. Es prácticamente omnipresente y se extiende lateralmente por debajo de la mayor parte de la superficie terrestre, a diferencia de las aguas superficiales de arroyos y lagos, que solo cubren una parte menor del área terrestre.
- Las aguas subterráneas no solo tienen una gran extensión lateral, sino también una *importante dimensión vertical* (geometría 3D). Las aguas subterráneas pueden extenderse verticalmente desde muy cerca de la superficie terrestre hasta grandes profundidades, hasta miles de metros.
- Las aguas subterráneas *se mueven en general muy lentamente*, sobre todo porque la matriz litológica del subsuelo ofrece una resistencia hidráulica al flujo muchos órdenes de magnitud superior a la resistencia hidráulica experimentada en el flujo de canal abierto. Sin embargo, el flujo de aguas subterráneas en formaciones kársticas puede ser bastante rápido.
- *Se almacenan grandes volúmenes de agua subterránea* en el subsuelo, superando la reposición anual de agua subterránea en dos órdenes de magnitud, por término medio.

Cuadro 1.1 Sistemas de aguas subterráneas

Sistema de aguas subterráneas es un término genérico que puede referirse a diferentes imágenes conceptuales de porciones tridimensionales específicas del subsuelo saturado. Entre ellos son bien conocidos los conceptos de *acuíferos* y *sistemas acuíferos*, identificados y delineados sobre la base de los contrastes percibidos en las propiedades hidráulicas con las partes adyacentes del subsuelo. En el apartado 1.3 se definen y tratan con más detalle. Otros ejemplos son los *segmentos del subsuelo* que contribuyen a las cuencas fluviales (con divisiones de aguas subterráneas como límites), los sistemas de flujo de aguas subterráneas definidos por Tóth (1963) y *las masas de agua subterránea* introducidas por la Unión Europea en su Directiva Marco del Agua (Parlamento Europeo/Consejo, 2006; Comisión Europea, 2008). La delimitación de estas últimas no sigue una metodología estandarizada, pero uno de los criterios para definir los límites es la jurisdicción con respecto a las aguas subterráneas. Estas imágenes conceptuales son una simplificación de la realidad, pero resultan útiles para analizar y comprender el estado de las aguas subterráneas, los procesos relevantes de las mismas y las interacciones con las personas, los ecosistemas y otros sistemas externos (véase también la figura 1.1).

[3] Esto implica una presión hidrostática igual o mayor que la presión atmosférica local.

Como resultado de las propiedades únicas mencionadas, los sistemas de aguas subterráneas en la práctica suelen mostrar las siguientes características y rasgos:

- Acceso *fácil y abierto* a numerosas personas, lo que da lugar a características *comunes de la piscina*.
- A menudo son *poco conocidos* y comprendidos, incluso por la población local.
- *Acceso difícil y/o costoso* a las actividades de exploración, evaluación y seguimiento. Esto limita el desarrollo de conocimientos suficientes y precisos sobre los sistemas locales de aguas subterráneas, necesarios para una adecuada identificación y análisis de las oportunidades y los retos, así como de las posibles respuestas.
- Los grandes volúmenes de agua subterránea almacenada (reservas de agua subterránea) forman *enormes amortiguadores de la cantidad de agua*, asegurando la disponibilidad permanente de agua en muchas regiones con pronunciadas estaciones secas y solo arroyos intermitentes o de flujo estacional.
- Dentro de cada uno de los grandes sistemas de aguas subterráneas, *la edad de las aguas* subterráneas suele variar mucho (desde reciente hasta decenas de milenios), mientras que la salinidad y otros parámetros de calidad también pueden estar sujetos a una *variación significativa*.
- Con el tiempo, *la calidad del agua subterránea* puede cambiar debido a los largos tiempos de residencia y al contacto con la matriz litológica y la biosfera del subsuelo
- En comparación con los sistemas de aguas superficiales, los sistemas de aguas subterráneas suelen estar *mejor protegidos contra la contaminación* (debido a la resistencia de la sobrecarga al flujo), pero una vez contaminados son mucho más difíciles de remediar. A su vez, los dominios de aguas subterráneas poco profundas son más vulnerables a la contaminación que los más profundos.

1.3 Los acuíferos, sus principales características y los recursos hídricos subterráneos que contienen

1.3.1 Acuíferos: unidades espaciales definidas por la subdivisión hidráulica del subsuelo

Las formaciones geológicas que componen el subsuelo —rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas— muestran una variación casi infinita de propiedades. La categoría de propiedades hidráulicas es la más relevante para entender el flujo y el almacenamiento de las aguas subterráneas. Por ello, los hidrogeólogos suelen observar el subsuelo a través de una lente hidráulica y lo subdividen esquemáticamente en unidades espaciales que se diferencian entre sí por su capacidad de almacenar agua subterránea (vinculada a la porosidad total o drenable o a la relación de vacíos) y de transmitirla (vinculada a la permeabilidad o conductividad hidráulica). Las unidades espaciales que obtienen una puntuación comparativamente alta en ambos aspectos se denominan *acuíferos*; combinan las funciones de depósito de agua subterránea y de "autopista" para el flujo de agua subterránea.

En los libros de texto y otras publicaciones se pueden encontrar diversas definiciones de *acuífero*. Muestran diferencias de perspectiva (fuente de abastecimiento de agua frente a flujo subterráneo "neutro") y algunas definiciones parecen asociar un acuífero exclusiva o principalmente con la matriz litológica (contenedor) y no o menos con el agua subterránea en sus intersticios (contenido). El cuadro 1.2 presenta una definición sencilla pero clara, directa y compatible con las opiniones de la mayoría de los profesionales de las aguas subterráneas.

Cuadro 1.2 ¿Qué es un acuífero?

Un acuífero es una unidad geológica permeable saturada que puede transmitir cantidades significativas de agua bajo gradientes hidráulicos ordinarios (Freeze y Cherry, 1979).

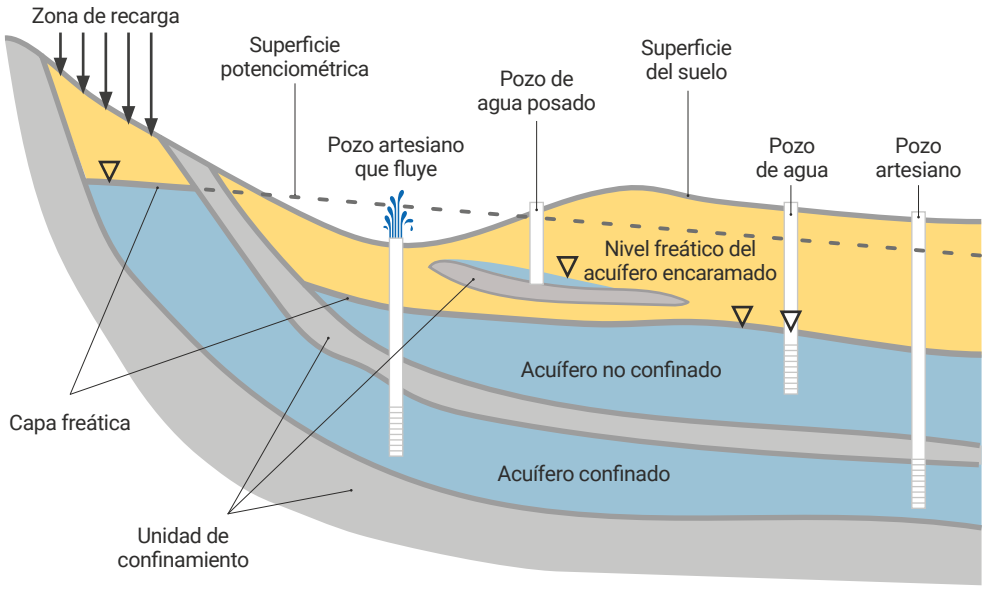
La delimitación de los límites del acuífero suele ser difícil, en particular si el acuífero es litológicamente heterogéneo, de gran extensión o está profundamente enterrado. Requiere la participación de hidrogeólogos competentes capaces de interpretar adecuadamente la estructura, la continuidad y las propiedades de las formaciones geológicas del subsuelo que normalmente solo se han observado en un número limitado de lugares.

1.3.2 Otras unidades hidráulicas del subsuelo

Los acuíferos interactúan con otras unidades hidráulicas distintas del subsuelo, en particular con la zona no saturada y con los acuitardos (véase la definición más adelante). La figura 1.1 presenta una sección transversal vertical hipotética en la que se muestran los acuíferos y algunas otras unidades hidráulicas del subsuelo.

Figura 1.1

Sección transversal vertical que muestra los acuíferos, las unidades de confinamiento y la zona no saturada



Fuente: Basado en Harlan et al. (1989, p. 9).

La delimitación de los límites del acuífero suele ser difícil, en particular si el acuífero es litológicamente heterogéneo, de gran extensión o está profundamente enterrado

La zona no saturada se extiende desde la superficie del terreno hasta el nivel freático. Los intersticios (poros o fisuras) de la matriz de esta zona no están totalmente llenos de agua, sino que contienen también aire. El agua de la zona no saturada tiene una presión inferior a la atmosférica, debido a las fuerzas de succión de la matriz, lo que influye en su comportamiento hidráulico. La zona no saturada desempeña un papel en la recarga de las aguas subterráneas al transmitir el exceso de precipitaciones o de agua superficial hacia abajo desde la superficie del terreno hasta la zona saturada. En áreas con niveles freáticos poco profundos, facilita el flujo ascendente necesario para que las aguas subterráneas se descarguen directamente a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración.

Los *acuitardos* son formaciones del subsuelo que contienen cantidades importantes de agua subterránea pero que no pueden transmitir cantidades significativas a los pozos. Su permeabilidad es baja en comparación con la de los acuíferos, pero a escala regional pueden ceder cantidades importantes de agua a los acuíferos contiguos o transmitir agua entre los acuíferos que separa. Hidráulicamente, los acuitardos funcionan como capas confinantes o semiconfinantes.

Las restantes unidades litológicas del subsuelo son hidráulicamente inactivas y forman barreras al flujo de aguas subterráneas, bien por su muy baja permeabilidad, bien por la ausencia de intersticios interconectados. Los términos algo anticuados para estas unidades de confinamiento son *acuicludos y acuíferos*, respectivamente.

1.3.3 Tipos de acuíferos

Los acuíferos pueden diferenciarse y clasificarse en función de diversos criterios, como, por ejemplo:

- *Tamaño*: la extensión lateral de los acuíferos oscila entre menos de cien y más de un millón de km², mientras que su espesor puede variar entre menos de diez y más de mil metros.
- *Litología*: los acuíferos más productivos están compuestos por arenas y gravas (no consolidadas), areniscas (consolidadas), calizas kársticas o ciertas rocas volcánicas (por ejemplo, basaltos); la roca madre meteorizada puede formar acuíferos locales, generalmente menos productivos.
- *Volúmenes almacenados (reservas)*: mayores en acuíferos sedimentarios gruesos y porosos, menores en acuíferos de lecho de roca fisurada.
- *Ubicación con respecto a la superficie de la tierra*: es probable que los acuíferos poco profundos (con su parte superior a menos de unas decenas de metros por debajo de la superficie) participen más activamente en el ciclo del agua que los acuíferos moderadamente profundos o profundos; además, la extracción de agua subterránea se vuelve más costosa y técnicamente difícil a medida que aumenta la profundidad.
- *No confinado o confinado*: los acuíferos no confinados tienen un nivel freático libre que se mueve verticalmente con los cambios de almacenamiento, mientras que en los acuíferos confinados no hay nivel freático libre, ya que la presión del agua por debajo de la capa superior de confinamiento supera en todas partes la presión atmosférica. El cambio de almacenamiento en los acuíferos confinados no está relacionado con un nivel freático en movimiento, sino que va acompañado de respuestas elásticas del agua almacenada y de la matriz sólida a los cambios de presión.
- *Condiciones de recarga*: muchos acuíferos se recargan abundantemente (cientos de milímetros al año) y, por lo tanto, contienen recursos hídricos subterráneos renovables; otros (principalmente en áreas secas o de permafrost) no se recargan significativamente, por lo que el agua que contienen se clasifica como no renovable.
- *Acuíferos domésticos versus transfronterizos*: los acuíferos domésticos están situados en su totalidad dentro de una única jurisdicción (nacional o subnacional), mientras que los acuíferos atravesados por fronteras nacionales u otras jurisdicciones se denominan transfronterizos.

Los acuíferos importantes suelen tener un nombre, para facilitar su identificación y comunicación.

Las actividades humanas, como la extracción de agua subterránea y la recarga artificial, producen cambios en el balance hídrico

1.3.4 Régimen hidrológico de un acuífero

El principio de conservación de la masa implica que la recarga de las aguas subterráneas siempre se equilibra con la descarga de las aguas subterráneas y el cambio en el almacenamiento. En consecuencia, las actividades humanas, como la extracción de agua subterránea y la recarga artificial, producen cambios en el balance hídrico: la primera conduce a la reducción de la descarga natural y/o del almacenamiento de aguas subterráneas, la segunda a lo contrario.

1.3.5 Sistemas acuíferos

Dependiendo de las condiciones específicas del área y de la escala de investigación o cartografía, dos o más acuíferos apilados con acuitardos intercalados y superpuestos pueden denominarse conjuntamente *sistema acuífero*, siempre que sean componentes interconectados de un sistema hidráulicamente continuo. Si, por ejemplo, en la figura 1.1, la unidad de confinamiento entre los dos acuíferos fuera permeable (y, por tanto, fuera un acuitardo), entonces existe conectividad hidráulica entre los dos acuíferos, lo que significa que, junto con el acuitardo, forman un sistema acuífero. En la práctica, la distinción entre acuíferos y sistemas acuíferos es un tanto arbitraria, porque distinguir entre acuitardos y lentes de baja permeabilidad, así como entre rocas permeables y poco permeables, es

subjetivo. Al aumentar la complejidad y el tamaño, se tiende a preferir el término "sistema acuífero". Los mayores sistemas acuíferos del mundo, situados en cuencas sedimentarias profundas, tienen una extensión lateral de varios millones de kilómetros cuadrados y miles de metros de profundidad. Las partes más profundas de la mayoría de estos sistemas acuíferos están llenas de agua salina.

1.4 Breve historia de la explotación de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas se han extraído y utilizado para fines humanos desde tiempos inmemoriales. Durante mucho tiempo, esto debió limitarse a extraer agua de manantiales y de pozos excavados a poca profundidad. Se utilizaba la energía muscular de los animales o de los humanos para elevar el agua de los pozos a la superficie. Con el tiempo, se han desarrollado técnicas para utilizar esta energía de la manera más eficiente posible, como el shaduf (predecesor temprano de la bomba manual), y la saqiyah (rueda persa modificada) y el arhor accionados por animales (Margat y Van der Gun, 2013; Yannopoulos et al., 2015). Estas técnicas contribuyeron al desarrollo de la irrigación basada en aguas subterráneas a pequeña escala, pero las tasas de extracción de aguas subterráneas siguieron siendo bajas en esta primera etapa de desarrollo.

Un gran paso adelante fue la invención e introducción del sistema de *qanats*, en torno a los años 1000 a 800 a.C., un sistema de túneles que aprovecha las aguas subterráneas poco profundas y las transporta por gravedad, sin necesidad por tanto de energía externa para llevarlas a la superficie. Se cree que los *qanats* se originaron en el noroeste de Irán y desde allí se extendieron por Oriente Medio, el norte de África y el sur de Europa, aunque también se encuentran en Asia Central, China occidental y Sudamérica (English, 1968; Mostafaeipour, 2010). Han sido —y siguen siendo en algunos países— de gran importancia para la irrigación y los asentamientos humanos en regiones áridas. Los molinos de viento son otra antigua técnica de ahorro de energía para llevar el agua a la superficie. No se sabe desde cuándo se utilizan para bombear agua subterránea: probablemente desde la Edad Media o antes. En la actualidad siguen utilizándose, en particular para el abrevado del ganado y la irrigación a pequeña escala (Yannopoulos et al., 2015; Glazema, 2003).

Las aguas subterráneas se han extraído y utilizado para fines humanos desde tiempos inmemoriales

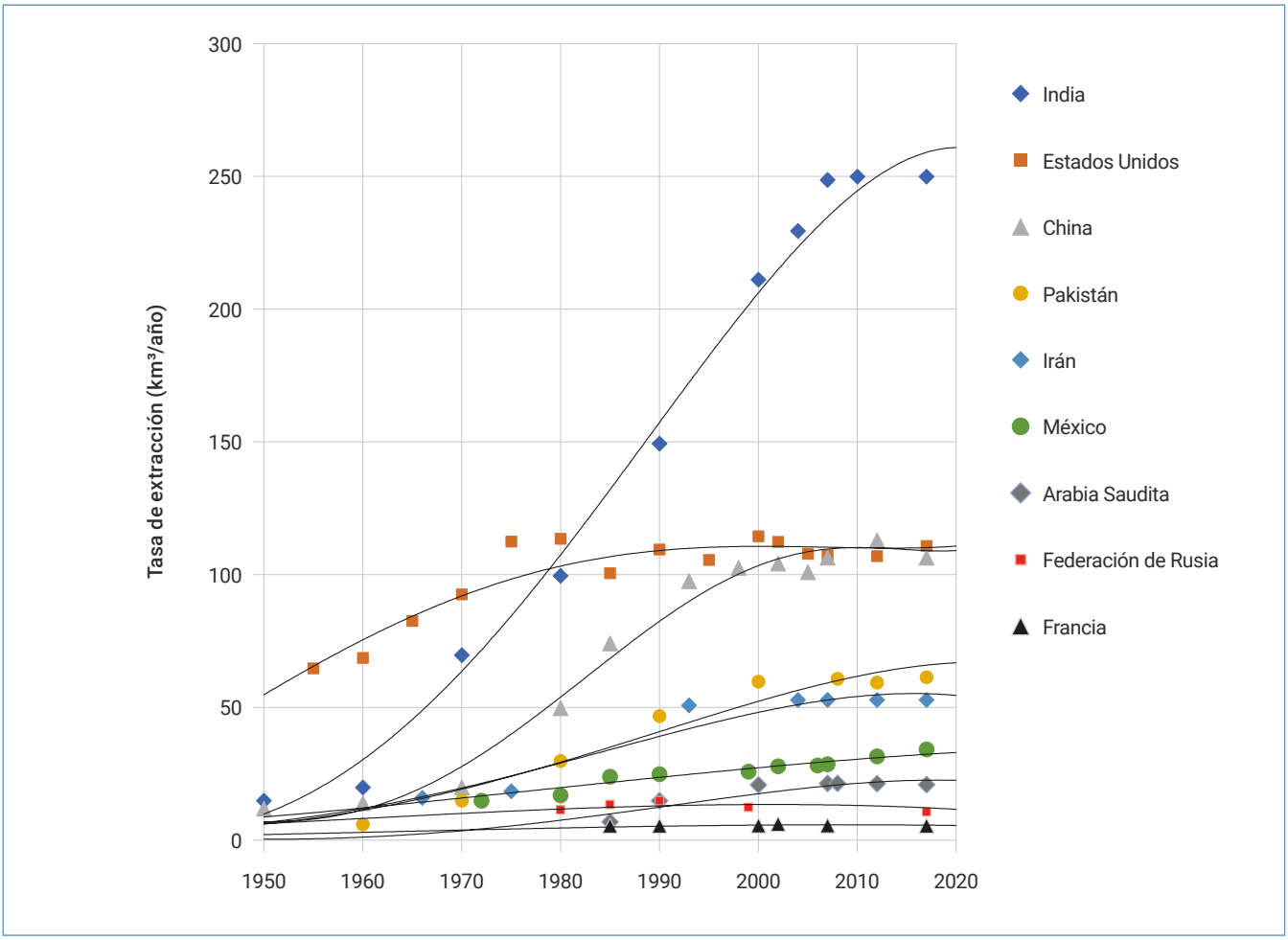
Aunque las técnicas de perforación por percusión se desarrollaron en China hace ya mil años para la explotación de salmueras profundas (Kuhn, 2004; Han y Cheng, 2013), la excavación siguió siendo hasta tiempos recientes la técnica común para la construcción de pozos de agua en todo el mundo, restringiendo la extracción de agua subterránea a profundidades relativamente bajas. El desarrollo de las técnicas de perforación de pozos, a partir de principios del siglo XIX, supuso una gran revolución, aunque pasó mucho tiempo antes de que estas técnicas fueran lo suficientemente avanzadas y se aplicaran ampliamente en todo el mundo. Estas técnicas permitieron explorar y explotar acuíferos más profundos, y también fueron decisivas para descubrir zonas de acuíferos artesianos en las que se podían construir pozos fluyentes. A principios del siglo XX, la aparición de bombas de gran capacidad de accionamiento eléctrico capaces de bombear aguas subterráneas profundas provocó un aumento sin precedentes de la extracción de aguas subterráneas en respuesta a una demanda de agua cada vez mayor. En consecuencia, la extracción de aguas subterráneas se disparó durante el siglo XX, comenzando durante las primeras décadas en los Estados Unidos, México y varios países europeos, y en la mayoría de los demás países durante la segunda parte del siglo o cerca de su final.

La figura 1.2 ilustra la evolución de la extracción de aguas subterráneas durante el periodo 1950-2020 en determinados países (países de los que se dispone de datos suficientes). Muestra claramente la diferencia en el momento de máximo crecimiento entre los Estados Unidos y los países asiáticos como la India, China, el Pakistán e Irán. La extracción total de agua subterránea a nivel mundial durante 2017 se estima en 959 km³ (véase el prólogo), de los cuales el 68 % corresponde a los nueve países que se muestran en la figura 1.2. Suponiendo que los demás países del mundo siguieran por término medio la misma pauta de

aumento, se estima que la extracción de agua subterránea agregada a nivel mundial era de solo 158 km³/año en 1950, y que esta aumentó en las décadas sucesivas en los siguientes porcentajes medios anuales +3,7 % (1950-1960), +4,8 % (1960-1970), +3,9 % (1970-1980), +3,4 % (1980-1990), +1,8 % (1990-2000), +0,8 % (2000-2010) y -0,2 % (2010-2017). Su participación en la extracción total de agua dulce ha pasado del 12 % en 1950 al 25 % en 2017. Puede observarse que las tasas de extracción de aguas subterráneas se han estabilizado más o menos en los Estados Unidos, la mayoría de los países europeos y China.

Los usos, beneficios y retos de las aguas subterráneas en los sectores agrícola, doméstico e industrial se describen en los capítulos 3, 4 y 5, respectivamente.

Figura 1.2 Evolución de la extracción total de aguas subterráneas en determinados países, 1950-2020



Fuente: Basado en Margat y Van der Gun (2013, fig. 5.4, p. 128). Actualizado por el último autor, utilizando los datos nacionales comunicados.

1.5 Los múltiples servicios que ofrecen las aguas subterráneas a la humanidad y a los ecosistemas

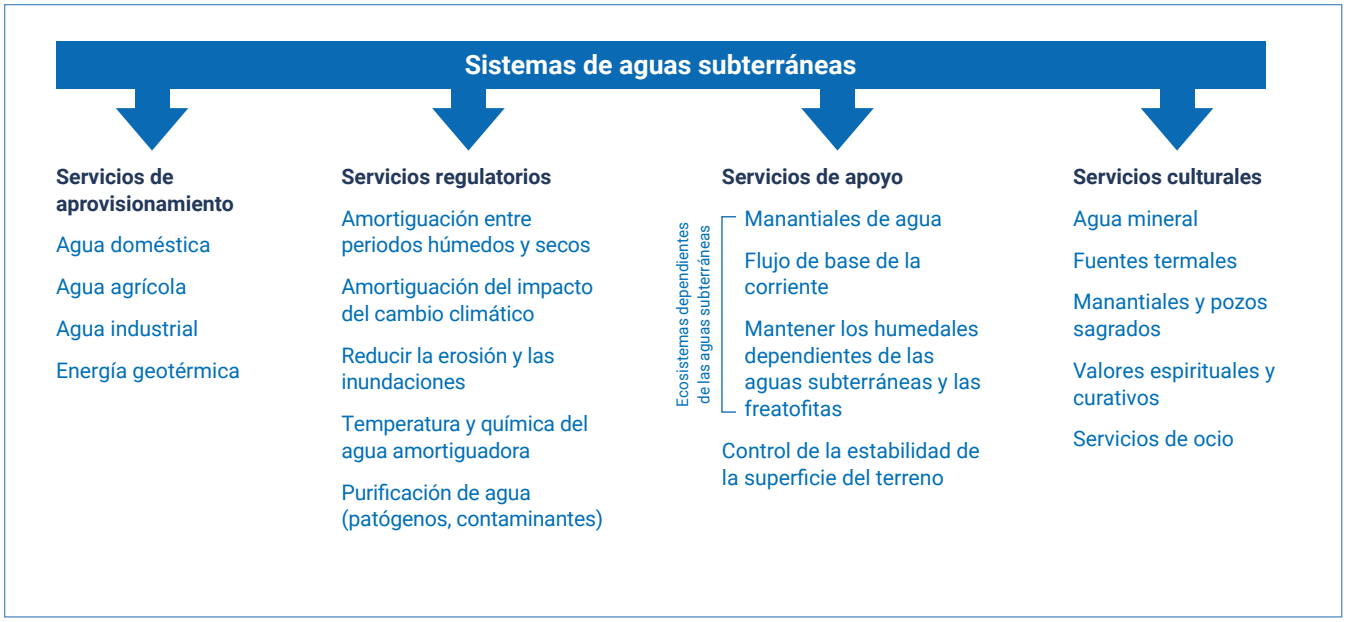
La extracción de agua subterránea para usos humanos es muy importante, pero solo corresponde a una categoría de los servicios que ofrecen los sistemas de aguas subterráneas (servicios provisionales). No debe pasarse por alto que las aguas subterráneas ofrecen muchos más servicios, como se indica en la figura 1.3. La mayoría de los servicios mencionados en esta figura son obvios, pero se presentan algunos comentarios explicativos.

- *Los servicios de abastecimiento* permiten la extracción de aguas subterráneas para su uso, pero en algunos casos la extracción es simplemente para extraer la energía geotérmica que transporta, tras lo cual el agua extraída se devuelve al subsuelo.
- *Los servicios de regulación* son servicios *in situ* que reflejan la capacidad de amortiguación de los acuíferos (véase el apartado 1.2); regulan principalmente los regímenes de cantidad y calidad del agua de los sistemas subterráneos.

- *Los servicios de apoyo* son también servicios *in situ*; se centran en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE) y otras características ambientales relacionadas con las aguas subterráneas. No solo los acuíferos, sino también los acuitardos pueden desempeñar un papel importante en esta categoría, a veces un papel principal (control del hundimiento del terreno).
- Por último, las aguas subterráneas también proporcionan *servicios culturales*; los vinculados a actividades de ocio, tradición, religión o valores espirituales se asocian a lugares concretos y no a un acuífero. De hecho, las aguas subterráneas han desempeñado un papel importante en las culturas y religiones de todo el mundo, desde las cuevas y manantiales venerados por los pueblos mayas de México hasta los pozos del dragón y los manantiales sagrados de China (Ray, 2020).

Los servicios de aprovisionamiento pueden entrar en conflicto con los servicios de apoyo: estos últimos tienden a sufrir estrés bajo la extracción intensiva de agua subterránea. La gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas tienen que buscar un equilibrio óptimo entre los servicios que entran en conflicto o compiten entre sí.

Figura 1.3 Los múltiples servicios que ofrecen los sistemas de aguas subterráneas



Fuente: Basado en Van der Gun (2019, fig. 5).

1.6 Interconexiones globales

Las aguas subterráneas son básicamente un recurso local, considerado predominantemente por los profesionales en un contexto local. Sin embargo, está interconectada con su entorno a diferentes escalas espaciales, lo que implica que se necesitan diferentes perspectivas para supervisar y abordar toda la gama de cuestiones relevantes: no solo cuenta la perspectiva local, sino también las perspectivas de todo el acuífero, nacionales, transfronterizas, regionales y globales. A continuación, se revisan brevemente algunas interconexiones globales importantes en relación con las aguas subterráneas.

1.6.1 Las aguas subterráneas en el ciclo global del agua, en interacción con el clima y otros sistemas globales

Con sus características específicas, especialmente su capacidad de amortiguación, las aguas subterráneas marcan de forma distintiva el ciclo global del agua. Sin embargo, el ciclo global del agua y su balance hídrico no se encuentran en un equilibrio dinámico: están siendo modificados por el cambio climático y por interferencias humanas cada vez más

importantes, como la extracción de aguas subterráneas y las prácticas de uso del suelo. En principio, la interacción es bidireccional, lo que implica que un ciclo del agua modificado también producirá una retroalimentación en el clima global. En las últimas décadas se han producido avances considerables en la evaluación y comprensión de estas modificaciones a escala global y sus repercusiones. Ha surgido una nueva disciplina: la Hidrología Global. Utiliza modelos hidrológicos a escala mundial, explorando los patrones y procesos hidrológicos a gran escala, acoplados a modelos climáticos, de uso del suelo o del agua, con el fin de obtener una mejor comprensión del sistema Tierra. El acoplamiento con otros ámbitos —seguridad alimentaria, economía, energía y biodiversidad— está por venir (Bierkens, 2015).

La extracción intensiva de agua subterránea provoca una reducción del agua terrestre almacenada, lo que produce un aumento casi igual del volumen de agua en los océanos

1.6.2 Aguas subterráneas y resiliencia del sistema terrestre

Como señalan Gleeson et al. (2020a), los diferentes procesos del ciclo global del agua regulan el clima y sustentan los ecosistemas. Las actividades humanas —incluida la extracción de aguas subterráneas— son actualmente una fuerza importante que perturba estos procesos, pudiendo causar cambios de régimen a escala planetaria que amenazan la estabilidad de nuestro planeta como hábitat adecuado para los seres humanos y los ecosistemas. Es importante estudiar la capacidad de resistencia de nuestro planeta a esos cambios de régimen y la forma de controlarlos.

1.6.3 Aguas subterráneas y aumento del nivel del mar

La extracción intensiva de agua subterránea provoca una reducción del agua terrestre almacenada, lo que produce un aumento casi igual del volumen de agua en los océanos. Las estimaciones de la correspondiente contribución global anual divergen (Wada et al., 2010, 2016; Konikow, 2011; Bierkens y Wada, 2019), pero no cabe duda de que constituye una contribución significativa al aumento total del nivel del mar observado y previsto, además de las contribuciones del cambio climático. Los principales impactos de la subida del nivel del mar son las inundaciones costeras, las inundaciones y el aumento de la intrusión de agua salina.

1.6.4 Degradación global de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas

Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas son muy vulnerables a la extracción intensiva de agua subterránea. El aumento continuo de la extracción de agua subterránea en todo el mundo provoca una disminución a escala mundial de los flujos de base, manantiales, flujos artesianos y humedales, lo que conduce a la pérdida de la biodiversidad y a la desertificación a largo plazo (véase el capítulo 6).

1.6.5 Aguas subterráneas y comercio mundial

El comercio mundial ha permitido que los alimentos y otros productos básicos se produzcan a gran distancia de donde se consumen o utilizan. Según Hoekstra (2018), el 22 % del uso del agua en el mundo se destina a la producción de productos de exportación. En consecuencia, grandes volúmenes de "agua virtual"[4] viajan a través del mundo, lo que implica que un porcentaje variable de la huella hídrica de consumo de los países se encuentra fuera de su propio territorio (la "huella externa"). Es evidente que el comercio internacional aporta beneficios económicos a los países exportadores, pero el ahorro de agua en los países importadores corre el riesgo de aumentar el estrés hídrico en los países exportadores. En 2010, el agotamiento de las aguas subterráneas a nivel mundial, incorporado a la producción de alimentos, se estimó en 141 km³/año, de los cuales 26 km³/año se exportaron (Dalin et al., 2017).

[4] El término "agua virtual" fue introducido por Allan (1998, 2003) para indicar el agua necesaria para producir productos agrícolas y otros productos básicos. El comercio internacional implica flujos de agua virtual entre países.

1.7 Las aguas subterráneas en el contexto de las agendas y acuerdos globales

1.7.1 Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO

Entre los principales logros del Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) centrados especialmente en las aguas subterráneas se encuentran la promoción mundial de la cartografía hidrogeológica (Gilbrich y Struckmeier, 2014), el establecimiento de una iniciativa mundial sobre acuíferos transfronterizos (Iniciativa sobre la Gestión de Recursos de Acuíferos Transnacionales, o ISARM), el Programa Mundial de Cartografía y Evaluación Hidrogeológica (WHYMAP) y la creación del Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (CIEAS). El objetivo principal de la octava fase del PHI (PHI-VIII 2014-2021) era traducir el conocimiento científico en la acción necesaria para la seguridad hídrica.

Aunque solo una de las metas de los ODS hace referencia explícita a las aguas subterráneas, no menos de 53 metas parecen estar interrelacionadas con las aguas subterráneas

1.7.2 La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU son un llamamiento a la acción de todos los países —pobres, ricos y de renta media— para promover la prosperidad y proteger el planeta. Los 17 ODS fueron adoptados por todos los Estados Miembros de la ONU en 2015, como parte de la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* que define un plan de 15 años con 169 metas para alcanzar los ODS (UNDESA, s.f.). Aunque solo una de las metas de los ODS hace referencia explícita a las aguas subterráneas (meta 6.6), no menos de 53 metas parecen estar interrelacionadas con las aguas subterráneas, incluyendo —pero sin limitarse a— todos los objetivos relacionados con los ODS 6, 12 y 13. En la mayoría de los casos, existe una sinergia entre la consecución de la meta y las tendencias o aspiraciones relativas a las aguas subterráneas ("vínculos de refuerzo"), pero en algunos casos son conflictivos o de carácter mixto (Guppy et al., 2018). Las aguas subterráneas son un recurso clave para alcanzar los objetivos de la Agenda 2030, lo que implica que se requiere una experiencia adecuada en materia de aguas subterráneas y un conocimiento hidrogeológico local para su implementación exitosa (Velis et al., 2017; AIH, 2017). Hay razones de peso para definir "indicadores del estado de las aguas subterráneas" adicionales para varias metas del ODS 6, ya que las aguas subterráneas son parte integral de estas, pero no se han tratado adecuadamente hasta ahora (AIH, 2017).

Figura 1.4
Los Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: UNDESA (s.f.).

1.7.3 Agua, saneamiento e higiene (WASH)

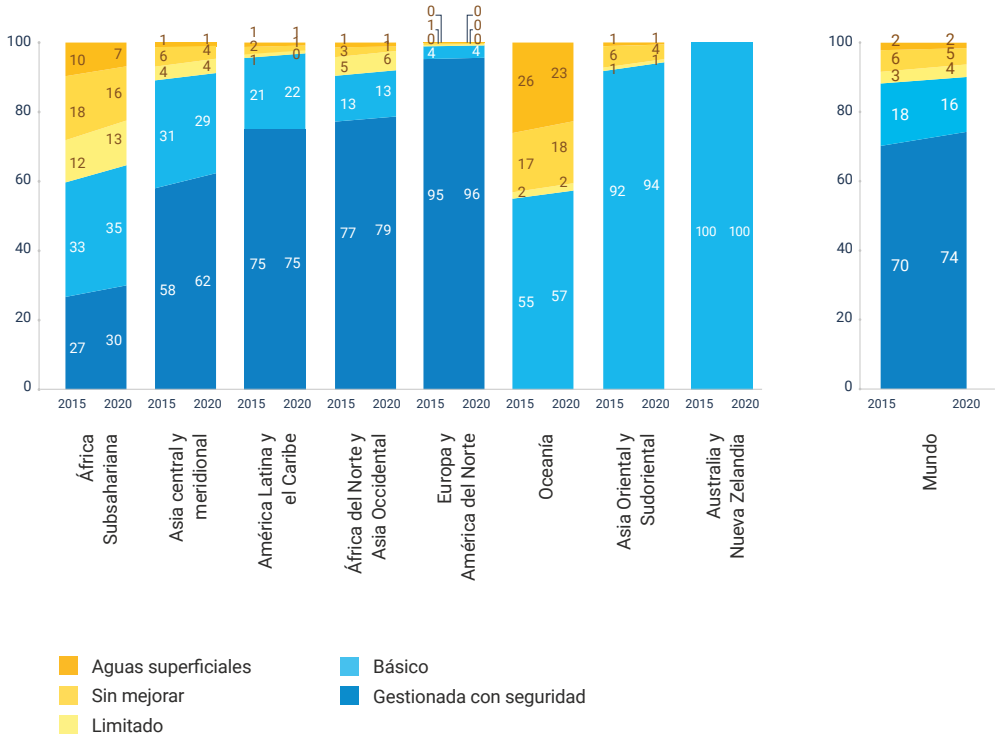
Informar sobre la mejora del acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene en todo el mundo es una de las misiones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), en colaboración con otras muchas organizaciones. Su Programa Conjunto de Monitoreo (PCM) para el agua, el saneamiento y la higiene ha informado sobre los progresos nacionales, regionales y mundiales en materia de agua potable, saneamiento e higiene desde 1990. La figura 1.5 muestra la situación y los avances en la cobertura de agua potable regional y mundial durante el periodo 2015-2020. El

porcentaje de la población mundial que utiliza servicios de agua potable gestionados de forma segura aumentó del 70 % al 74 %, pero las diferencias entre las regiones y también dentro de ellas son considerables. Hay estadísticas similares para los servicios de saneamiento: el uso de servicios de saneamiento gestionados de forma segura aumentó del 47 % al 53 % de la población mundial durante 2015-2020. El PCM informa además de que, en 2020, el 71 % de la población mundial disponía de instalaciones básicas para el lavado de manos con agua y jabón en el hogar (OMS/UNICEF, 2021). Estas últimas instalaciones han cobrado importancia desde el estallido de la pandemia de COVID-19, ya que el lavado de manos está indicado para reducir fuertemente la transmisión del virus (Brauer et al., 2020).

El PCM no especifica la parte de las aguas subterráneas en los servicios WASH y su progreso, pero sin duda es considerable.

Figura 1.5

Cobertura de agua potable regional y mundial, 2015-2020 (%)



Nota: Cinco regiones de los ODS tenían estimaciones de servicios de agua potable gestionados de forma segura en 2020.

Fuente: Adaptado de OMS/UNICEF (2021, fig. 2 y 3, p. 8).

1.8 Retos relacionados con las aguas subterráneas

La capacidad de los sistemas de aguas subterráneas para ofrecer diversos servicios (como se muestra en la figura 1.2) depende de sus propiedades, que varían geográficamente (véase el prólogo), y está influenciada dinámicamente por los procesos naturales y humanos en curso. Estos últimos dan lugar a numerosos retos relacionados con las aguas subterráneas en todas las partes del mundo, en particular en las áreas densamente pobladas. A continuación, se describen brevemente los principales tipos de estos retos. En otros capítulos de este informe se presentan más detalles y posibles respuestas, ya sea en un contexto temático (capítulos 3 a 7), regional (capítulo 8) o de gobernanza/gestión (capítulos 10 y 11). Para hacer frente a los desafíos es necesario comprender bien la cadena causal subyacente, desde las causas fundamentales (como el crecimiento de la población, el desarrollo económico y el cambio climático), pasando por las tensiones (por ejemplo, la extracción de aguas subterráneas, la afluencia de contaminantes), hasta los cambios en el estado de las aguas subterráneas (cantidad de agua subterránea, niveles/presiones del agua, calidad del agua) y sus repercusiones en los seres humanos, los ecosistemas y el medio ambiente.

1.8.1 Agotamiento de las aguas subterráneas a largo plazo

El agotamiento del almacenamiento de aguas subterráneas, acompañado de un descenso de los niveles de las aguas subterráneas, se produce cuando la descarga de aguas subterráneas

(es decir, la suma de la extracción de aguas subterráneas y la descarga "no forzada" o natural) supera la recarga de aguas subterráneas. Aunque la variabilidad del clima y el cambio climático también pueden desempeñar un papel (al influir en la recarga de las aguas subterráneas y en la demanda de agua), la mayoría de los casos de agotamiento del almacenamiento de aguas subterráneas a largo plazo son consecuencia de la extracción intensiva de aguas subterráneas. El agotamiento de las aguas subterráneas a largo plazo se observa en innumerables acuíferos, situados predominantemente en zonas semiáridas y áridas, donde a menudo constituye una importante amenaza para el uso sostenible de las aguas subterráneas para la irrigación. El ritmo de agotamiento del almacenamiento global de aguas subterráneas es considerable: para principios del presente siglo, las estimaciones se sitúan en su mayoría entre 100 y 200 km³/año (Bierkens y Wada, 2019).

Los impactos potenciales del descenso del nivel de las aguas subterráneas incluyen:

- los costes crecientes, la complejidad técnica y las exigencias energéticas de la extracción de aguas subterráneas;
- la creciente escasez de agua causada por pozos, zonas acuíferas o acuíferos enteros que se secan;
- la degradación de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas y otros servicios de las aguas subterráneas que no se prestan;
- hundimiento del terreno en áreas con sedimentos altamente compresibles u otras formaciones geológicas propensas a la deformación en respuesta a cambios en la presión del agua;
- la competencia entre sectores usuarios de aguas subterráneas o entre usuarios individuales de pozos; y
- un acceso cada vez más desigual a las aguas subterráneas (incluida la pérdida de equidad intergeneracional).

La contaminación de las aguas subterráneas es un proceso prácticamente irreversible: una vez contaminadas, las zonas del acuífero tienden a permanecer con agua contaminada

Los grandes sistemas acuíferos conocidos que se ven afectados por un importante agotamiento del almacenamiento a largo plazo son los de las llanuras indogangéticas, la llanura del norte de China, el valle central de California, las altas llanuras de los Estados Unidos y el sistema acuífero de Arabia. La mayor parte del agua subterránea extraída de estos sistemas acuíferos se utiliza para la agricultura de regadío.

El uso del suelo, las prácticas de uso del suelo, el drenaje artificial y la gestión de las aguas superficiales son otras actividades humanas que influyen en el almacenamiento de las aguas subterráneas.

1.8.2 Contaminación de las aguas subterráneas

La contaminación de las aguas subterráneas reduce la idoneidad de las aguas subterráneas extraídas para el consumo y otros usos humanos, al tiempo que puede afectar a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

Hay muchas fuentes de contaminación antropogénica de las aguas subterráneas: la mayoría de ellas están situadas en la superficie del terreno o cerca de ella (agricultura, hogares, alcantarillado, vertederos, industrias y otras fuentes urbanas, tanques de almacenamiento, carreteras, canales, tuberías, etc.), pero hay otras fuentes que inyectan contaminantes en el subsuelo a mayor profundidad por debajo de la superficie (pozos, explotación de petróleo y gas, minería, vertidos en el subsuelo y otras actividades humanas del subsuelo). La contaminación agrícola está muy extendida; es una fuente difusa (fuente no puntual) que suele incluir grandes cantidades de nitrato, pesticidas y otros productos agroquímicos.
En cambio, las industrias y los hogares suelen producir una contaminación puntual. La gama de contaminantes industriales es muy amplia (numerosas sustancias orgánicas e inorgánicas, microorganismos, radionúclidos) y varía según los tipos de productos industriales. Entre

Las zonas de aguas subterráneas dulces pueden volverse salobres o salinas de varias maneras

los contaminantes producidos por los hogares y que se encuentran en el alcantarillado, destacan los compuestos microbiológicos y los llamados "microcontaminantes emergentes" (por ejemplo, los PPCP[5] y los EDC[6]) (Lapworth et al., 2012).

Como ya se ha mencionado en el prólogo, además de los contaminantes antropogénicos, los contaminantes geogénicos (por ejemplo, arsénico y fluoruro) también pueden estar presentes en el subsuelo. La acción humana, como el bombeo de aguas subterráneas, puede contribuir a su liberación de la matriz rocosa y a su transporte por el subsuelo.

La contaminación de las aguas subterráneas es un proceso prácticamente irreversible: una vez contaminadas, las zonas del acuífero tienden a permanecer con agua contaminada. Dado que la mayoría de las fuentes antropogénicas de contaminación se encuentran en la superficie del suelo o cerca de ella, la contaminación se observa con mayor frecuencia en zonas de acuíferos poco profundos, en particular si no existe una capa protectora de baja permeabilidad. Sin embargo, debido al aumento constante de las actividades humanas en los dominios más profundos del subsuelo (desarrollo de hidrocarburos, fracturación hidráulica, almacenamiento en el subsuelo, etc.) la contaminación también está invadiendo zonas más profundas, aunque está algo menos extendida. La contaminación de las aguas subterráneas es un problema importante en casi todas las áreas caracterizadas por una alta densidad de población y/o una importante producción agrícola o industrial.

1.8.3 Salinización de las aguas subterráneas

Las zonas de aguas subterráneas dulces pueden volverse salobres o salinas de varias maneras. Uno de los mecanismos está relacionado con la inundación por agua de mar. El agua de mar que inunda las tierras costeras bajas tiende a infiltrarse en los acuíferos subyacentes, sustituyendo el agua dulce subterránea por agua salina. Esto ocurre de forma repentina, durante eventos excepcionales (mareas de tormenta o tsunamis), o gradualmente, junto con la lenta transgresión marina causada por el aumento del nivel del mar. En términos de extensión, solo un porcentaje muy pequeño del área terrestre de la Tierra está expuesto al riesgo de inundaciones marinas, pero estas áreas suelen estar comparativamente muy pobladas. Además, teniendo en cuenta las previsiones de aumento del nivel del mar, este fenómeno amenaza con privar a las islas bajas de topografía extremadamente plana (como los atolones del Océano Pacífico) de recursos de agua dulce suficientes para seguir siendo habitadas.

La extracción de agua subterránea es otro factor desencadenante de la salinización de las aguas subterráneas. Puede inducir la intrusión de agua de mar en áreas costeras, y puede hacer que el agua subterránea salobre o salina relativamente estancada comience a moverse en dirección vertical u horizontal, hacia la zona de agua subterránea dulce explotada. Ambos mecanismos constituyen importantes amenazas para los recursos de agua dulce subterránea, especialmente en las áreas costeras.

Otra causa importante de la salinización de las aguas subterráneas es la irrigación. Tras su aplicación, el agua de irrigación se almacena temporalmente en la zona superior del suelo, de donde la retiran los cultivos. Esta absorción de agua por parte de los cultivos es selectiva, en el sentido de que una parte de los sólidos disueltos se queda en el suelo. Estas sales se eliminan posteriormente, bien por las lluvias en los periodos más húmedos del año, bien por un excedente de agua de irrigación aplicado por el agricultor para evitar la salinización del suelo. Como resultado, el contenido de sólidos disueltos de los acuíferos no confinados poco profundos en las áreas de irrigación tiende a aumentar gradualmente, a menos que las disposiciones de drenaje desvíen el agua mineralizada a los cuerpos de agua superficiales. Este mecanismo de salinización de las aguas subterráneas se suma al aumento de los sólidos disueltos en las aguas subterráneas causado por los productos agroquímicos que percolan hacia abajo.

[5] Productos farmacéuticos y de cuidado personal.

[6] Compuestos alteradores endocrinos.

1.8.4 Cuestiones de prioridad, asignación y acceso

En ausencia de cualquier forma de control comunitario o gubernamental, es poco probable que se desarrolle una combinación óptima de servicios de aguas subterráneas en un área determinada, y que todos los habitantes compartan por igual los beneficios de las aguas subterráneas. Esto se debe a factores como la incompatibilidad entre los servicios de aguas subterráneas, la competencia entre los usuarios potenciales de aguas subterráneas, las características de acceso abierto y de uso común de las aguas subterráneas y la falta de igualdad de condiciones.

En muchas áreas, se observa que los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas sufren y se degeneran como consecuencia de la extracción intensiva e incontrolada de aguas subterráneas por parte de individuos o empresas en busca de beneficios económicos a corto plazo; que la mayor parte de las aguas subterráneas son extraídas por los segmentos más ricos de la población, mientras que las personas relativamente pobres y sin tierra (incluidos los refugiados y otros grupos migratorios) a menudo no tienen acceso a las aguas subterráneas o lo tienen muy limitado; que el desarrollo de las aguas subterráneas para el abastecimiento público de agua doméstica a menudo no tiene la prioridad suficiente y, por lo tanto, sigue siendo inadecuado; y que quienes disfrutan de los beneficios de la extracción de aguas subterráneas suelen ignorar las externalidades negativas asociadas, en detrimento de la sostenibilidad de los recursos y de las generaciones futuras. Estas cuestiones tienden a convertirse en retos candentes, sobre todo en las áreas con escasez de agua, por lo que deben abordarse en las políticas.

1.9 Oportunidades para aumentar los beneficios de las aguas subterráneas

Los impresionantes volúmenes de agua subterránea extraída y utilizada, así como la evidencia generalizada de los servicios de agua subterránea *in situ*, demuestran la enorme importancia de las aguas subterráneas para la humanidad y los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. Aunque las tasas actuales de extracción de agua subterránea son insostenibles en varias áreas y, por lo tanto, disminuirán tarde o temprano, también quedan varias oportunidades para aumentar los beneficios de las aguas subterráneas. A continuación, se describen estas oportunidades, que contribuirán a la consecución de los objetivos definidos a nivel local, nacional o supranacional (por ejemplo, la Directiva de Aguas Subterráneas de la Unión Europea o los ODS de las Naciones Unidas). La mayoría de estas oportunidades se centran en poner más agua subterránea a disposición de la sociedad humana, lo que es necesario para satisfacer la creciente demanda de agua impulsada principalmente por el crecimiento de la población y el cambio climático.

En contraste con los acuíferos explotados de forma intensiva, en varias regiones del mundo también hay acuíferos que se siguen explotando a tasas muy bajas, muy por debajo de las tasas máximas sostenibles

1.9.1 Aprovechar el potencial de las aguas subterráneas sin explotar

En contraste con los acuíferos explotados de forma intensiva, en varias regiones del mundo también hay acuíferos que se siguen explotando a tasas muy bajas, muy por debajo de las tasas máximas sostenibles. Estos acuíferos albergan un *potencial de aguas subterráneas no explotado*, disponible para ser aprovechado y utilizado. Todavía no se dispone de un inventario mundial de dichos acuíferos, pero la información disponible sugiere que muchos de ellos pueden encontrarse en regiones poco pobladas del África Subsahariana (MacDonald et al., 2012; Cobbing y Hiller, 2019), la mitad norte de Sudamérica, la Federación de Rusia y el Canadá, entre otros (Margat y Van der Gun, 2013). En algunas partes de estas regiones, las tasas de extracción se ven limitadas por la insuficiencia de medios financieros para una infraestructura técnica adecuada, más que por la baja demanda de agua o la escasa disponibilidad de aguas subterráneas.

1.9.2 Desarrollo de recursos hídricos subterráneos no convencionales

En condiciones de creciente escasez de agua, puede considerarse el desarrollo de recursos hídricos subterráneos no convencionales. Pueden complementar las escasas fuentes de agua dulce, pero su desarrollo suele ser menos atractivo que la extracción de aguas subterráneas convencionales debido a limitaciones de viabilidad técnica, medioambiental o financiera.

Uno de estos recursos no convencionales son las *aguas subterráneas salobres*, a menudo presentes a profundidades relativamente bajas. Las aguas subterráneas salobres pueden utilizarse directamente, sin ningún tipo de tratamiento, para fines como la acuicultura salobre, los sistemas de refrigeración, las operaciones en la industria del petróleo y el gas y, si el contenido

mineral no es demasiado elevado, la irrigación de cultivos tolerantes a la sal. Para los fines que requieren agua de menor mineralización, como el uso de agua potable, las aguas subterráneas salobres pueden mezclarse con agua dulce o desalinizarse. Especialmente en la región árabe y en las partes más secas de los Estados Unidos, existe mucho interés en desarrollar el agua subterránea salobre (Stanton y Dennehy, 2017; Dawoud, 2019). Las a*guas subterráneas frescas profundas* (definidas aquí como las aguas subterráneas presentes en acuíferos cuya cima está a más de 500 m de profundidad) solo se explotan en raras ocasiones para el abastecimiento de agua, por lo que pueden clasificarse como un recurso hídrico subterráneo no convencional. Es una opción interesante si el acuífero profundo correspondiente se recarga considerablemente. Sin embargo, es probable que la mayoría de los acuíferos profundos solo contengan recursos hídricos subterráneos no renovables, lo que impide un desarrollo sostenible de las aguas subterráneas. Más bien, estos recursos podrían aprovecharse temporalmente como recurso de emergencia de amortiguación durante periodos excepcionalmente secos, cuando otras fuentes de agua escasean (Van der Gun et al., 2012).

La presencia excepcionalmente amplia de grandes volúmenes de agua subterránea, combinada con la función amortiguadora única del recurso, ofrece un gran potencial para la seguridad del abastecimiento de agua en la adaptación al cambio climático

Ya en la antigüedad, las *aguas subterráneas dulces de alta mar* eran un fenómeno conocido y en algunos lugares se utilizaban manantiales submarinos de agua dulce para beber (Taniguchi et al., 2002). Los inventarios recientes han demostrado que en muchas partes del mundo existen aguas subterráneas dulces o salobres submarinas, ya sea en zonas de descarga submarina de sistemas acuíferos que se recargan en las tierras vecinas (Taniguchi et al., 2002; Zhou et al., 2019), o como masas de agua subterránea no renovable procedentes de épocas geológicas anteriores (Post et al., 2013; véase también la figura 7 del prólogo de este informe). Según las referencias citadas, la tasa de descarga global agregada y los volúmenes almacenados son considerables. Sin embargo, la explotación de estos recursos hídricos subterráneos no convencionales no es fácil y probablemente sea cara.

1.9.3 Ampliar el desarrollo de la energía geotérmica

Tal y como se describe en el capítulo 7, las aguas subterráneas ofrecen diferentes oportunidades para el desarrollo de la energía geotérmica. A pesar de los progresos realizados en los últimos años, esta rama del desarrollo energético está todavía en sus inicios. Hay un amplio margen para ampliar el desarrollo de la energía geotérmica en todo el mundo, lo que no solo aumentará los beneficios globales obtenidos de las aguas subterráneas, sino que también contribuirá de forma significativa a la transición hacia una energía más limpia y la neutralidad del carbono.

1.9.4 Ampliar la reposición antropogénica de la reserva de agua subterránea

La recarga gestionada de acuíferos (MAR) es una intervención técnica eficaz que aprovecha la capacidad de almacenamiento natural disponible en el subsuelo (véase el cuadro 7.1 y la sección 11.5). El exceso de agua que de otro modo se perdería se almacena temporalmente y se pone a disposición para un uso beneficioso en un momento posterior. La aplicación del MAR se ha multiplicado por 10 en los últimos 60 años, pero todavía hay un amplio margen para una mayor expansión, desde los 10 km³/años actuales hasta probablemente unos 100 km³/año (Dillon et al., 2019). El MAR se encuentra entre las intervenciones de gestión de aguas subterráneas más eficaces.

1.9.5 Adaptación al cambio climático y mitigación de catástrofes

La presencia excepcionalmente amplia de grandes volúmenes de agua subterránea, combinada con la función amortiguadora única del recurso, ofrece un gran potencial para la seguridad del abastecimiento de agua en la adaptación al cambio climático (véase el capítulo 7). Esto proporciona un fácil acceso generalizado y la posibilidad de un uso fiable cuando las fuentes de agua superficial fallan (por ejemplo, durante periodos prolongados de sequía).

La capacidad de los recursos hídricos subterráneos para amortiguar los cambios y choques a corto plazo también puede ayudar a mitigar los impactos de las catástrofes y emergencias antropogénicas y naturales, como los accidentes industriales, las sequías, las inundaciones, los terremotos y los deslizamientos de tierra, cuando los sistemas de abastecimiento de agua superficial se ven directamente afectados (Vrba y Verhagen, 2011).

Capítulo 2

Aspectos jurídicos e institucionales de la gobernanza de las aguas subterráneas

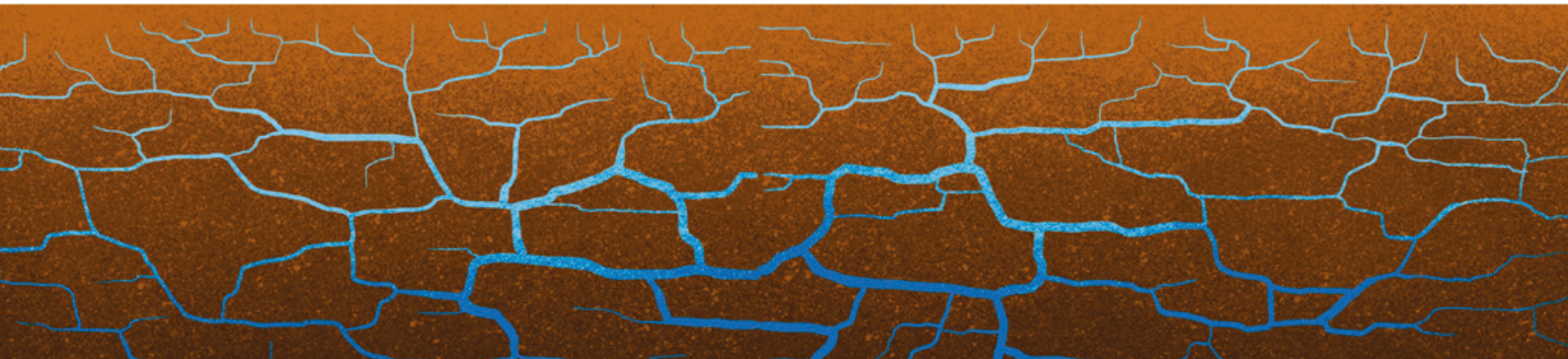
UNDP
Jenny Grönwall* y Marianne Kjellén

UNESCO-PHI
Alice Aureli, Stefano Burchi, Mohamed Bazza** y Raya Marina Stephan**

Con contribuciones de Gabriel Eckstein (Texas A&M University School of Law), Lesha Witmer (WfWP), Margreet Zwarteveen (IHE Delft), Aurélien Dumont (UNESCO-PHI), Danielle Gaillard-Picher (GWP), Rio Hada (ACNUDH), Rebecca Welling (UICN) y Maki Tsujimura (Universidad de Tsukuba).

* Encargado por el Fondo para la Gobernanza del Agua, acogido por el SIWI.

** Afiliado a AIDA, en nombre de la UNESCO.



En este capítulo se definen los conceptos vinculados de gobernanza y gestión de las aguas subterráneas, explicando en qué se diferencian. A continuación, se describen los instrumentos jurídicos vigentes y los aspectos institucionales de la gestión y la gobernanza de las aguas subterráneas.

2.1 Gobernanza y gestión de las aguas subterráneas

La gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas abordan tanto la extracción como la asignación, la eficiencia del uso y la protección de la calidad. Aunque a menudo se utilizan indistintamente, este informe distingue entre ambos conceptos (véanse los cuadros 2.1 y 2.2, respectivamente). Los procesos de *gobernanza* de las aguas subterráneas establecen las condiciones para la gestión, la planificación y la aplicación de políticas en materia de aguas subterráneas, y las hacen posibles. Los principios para una "buena" gobernanza del agua incluyen el acceso equitativo, la responsabilidad, la transparencia, la participación de los interesados, la inclusión, etc. La *gestión* de las aguas subterráneas está orientada a la acción: se centra en las actividades de aplicación práctica y en el "meollo" de las operaciones cotidianas, y hace hincapié en los resultados de las decisiones (Linton y Brooks, 2011).

La gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas pueden suponer un reto debido a la naturaleza común de la mayoría de los recursos subterráneos, junto con las lagunas de información y la diversidad de las partes interesadas y sus intereses (Ross, 2016). Los sistemas acuíferos (el medio rocoso o sedimentario saturado, y el agua contenida en la zona saturada de la formación) actúan como "anfitriones" del recurso, proporcionando servicios ecosistémicos como el almacenamiento natural (infraestructura verde) (Naciones Unidas, 2021; Puri y Villholth, 2018; AGNU, 2009). Las realidades hidrogeológicas, socioeconómicas y político-institucionales

Cuadro 2.1 Definición de la gobernanza de las aguas subterráneas

Se han dedicado muchos esfuerzos a identificar las características fundamentales de la gobernanza de las aguas subterráneas. El esfuerzo más exhaustivo lo ha llevado a cabo el proyecto "*Gobernanza de las aguas subterráneas - Un marco global para la acción*" (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a, 2016b, 2016c). En él se define la gobernanza de las aguas subterráneas de la siguiente manera:

"*La gobernanza de las aguas subterráneas comprende la promoción de una acción colectiva responsable para garantizar el control, la protección y la utilización socialmente sostenible de los recursos hídricos subterráneos y los sistemas acuíferos en beneficio de la humanidad y los ecosistemas dependientes. Esta acción se ve facilitada por un marco propicio y unos principios rectores*" (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c, p. 17).

A partir de esta definición, la gobernanza tiene un conjunto de cuatro *componentes* o disposiciones esenciales:

1) un **marco institucional** caracterizado por la representación y el liderazgo, las organizaciones y la capacidad, y el compromiso y la participación de las partes interesadas;
2) un **marco jurídico completo**;
3) sistemas de **conocimiento** y una **conciencia** más generalizada sobre los temas
4) **políticas, estructuras de incentivos y planes** alineados con una gobernanza eficaz.

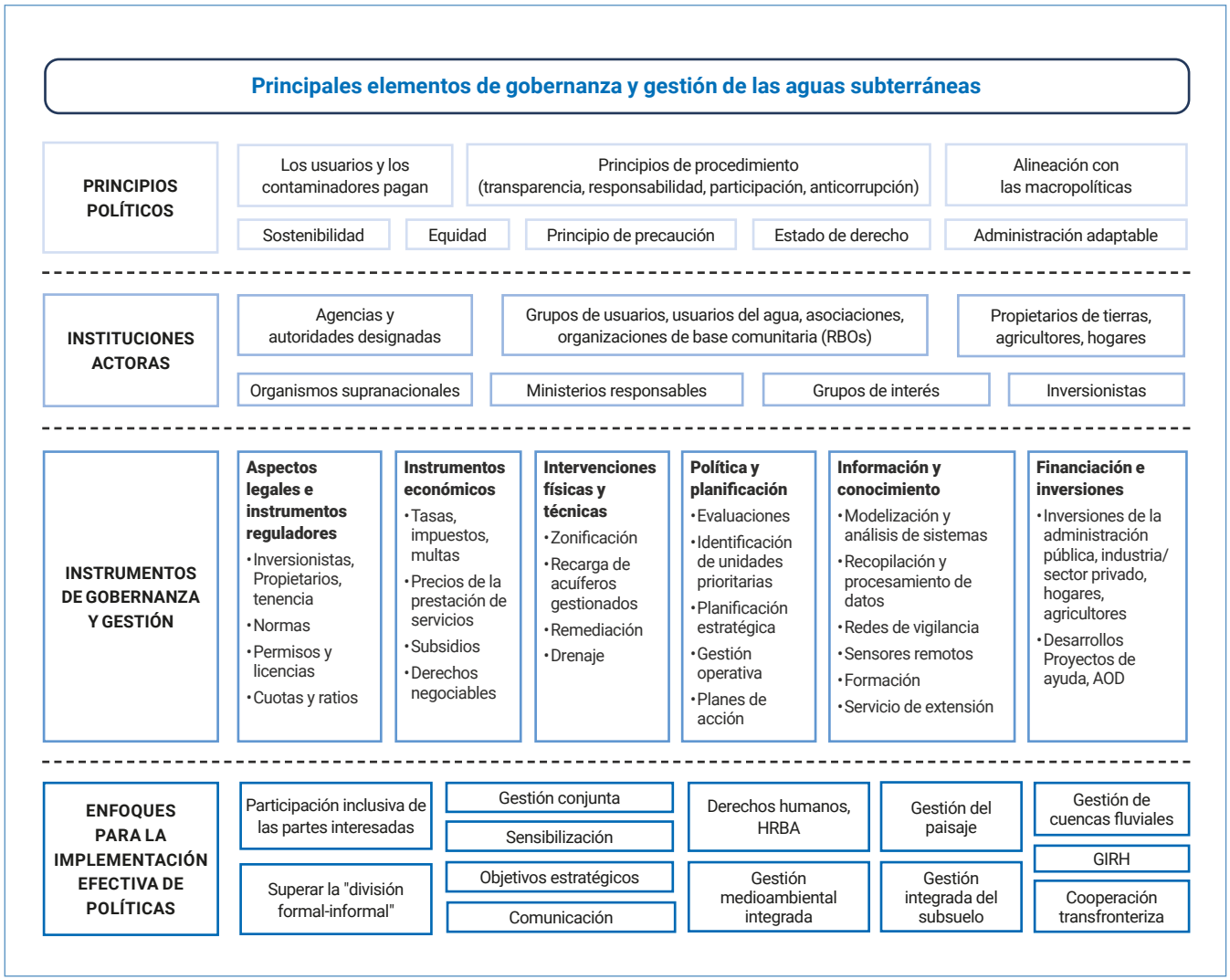
Los **principios rectores** de la gobernanza de las aguas subterráneas son:

- gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas;
- Gestión conjunta de la cantidad y la calidad de los recursos hídricos subterráneos;
- La cogestión del espacio del subsuelo y de los recursos del subsuelo, que comprende la regulación de todas las actividades y funciones situadas en el espacio del subsuelo para garantizar un uso armonizado y evitar daños indeseables e irreversibles;
- la integración "vertical" en la planificación y la gestión entre las autoridades locales, distritales/provinciales y federales, así como a nivel internacional, según proceda; y
- (horizontal) la coordinación política de otros sectores que afectan o se ven afectados por las aguas subterráneas.

de los sistemas acuíferos deben considerarse junto con su uso y gestión. El desfase temporal y la invisibilidad de los recursos hídricos subterráneos se suman a la complejidad: los impactos negativos sobre las aguas subterráneas pueden pasar desapercibidos durante años, y los límites físicos del acuífero son invisibles tanto para los usuarios como para los responsables de la toma de decisiones. En consecuencia, los riesgos y problemas asociados a las aguas subterráneas y los acuíferos no suelen abordarse de forma proactiva.

La gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas se producen en el entorno político más amplio de un país o una cuenca, y están relacionadas con los principios políticos y la planificación, los aspectos legales y la aplicación. La figura 2.1 sugiere cómo las ideas generales y los principios políticos se traducen, en parte a través de leyes y reglamentos, en instrumentos de gestión. Sin embargo, las metodologías y los enfoques de aplicación son un filtro o vehículo fundamental para los resultados de las intenciones políticas.

Figura 2.1 Principales elementos de la gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas, desde los principios políticos hasta los enfoques de aplicación



Fuente: Autores.

Dado que las aguas subterráneas suelen percibirse como un recurso privado (es decir, estrechamente vinculado a la propiedad de la tierra y, en algunas jurisdicciones, tratadas como si fueran de propiedad privada), la regulación y la gobernanza y gestión de arriba abajo son difíciles. En la práctica, las decisiones relativas a los pozos individuales son ejercidas principalmente por los propietarios (de la tierra), y a menudo es difícil para los gobiernos cuantificar, asignar y regular la extracción y el uso de las aguas subterráneas, especialmente si sus recursos son limitados. El corolario es que, en casi todas partes, la gobernanza y la

gestión de las aguas subterráneas deben incluir a los actores públicos y privados, así como a las comunidades locales. Al mismo tiempo, los gobiernos deben asumir plenamente su papel de custodios de los recursos en vista de los aspectos de bien común/bien público de las aguas subterráneas. Una mayor integridad y unas políticas que mejoren el acceso de los pequeños propietarios y de las mujeres tienen más posibilidades de contribuir al bien común y de lograr un desarrollo sostenible.

Cuadro 2.2 Definición de la gestión de las aguas subterráneas

El Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas (2016c, p. 17) definió la gestión de las aguas subterráneas como "*... las actividades llevadas a cabo por los agentes con mandato para desarrollar, utilizar y proteger de forma sostenible los recursos hídricos subterráneos*".

La gestión comprende medidas, intervenciones, acciones y actividades que pueden ser prácticas, técnicas y tangibles en diversos grados, y que tienen como objetivo "*controlar la extracción de aguas subterráneas y prevenir la degradación de la calidad de las aguas subterráneas, normalmente con el objetivo de garantizar el suministro sostenible de agua dulce y preservar las condiciones ambientales y ecosistémicas deseadas que dependen de las aguas subterráneas*". Las actividades de gestión técnica incluyen la perforación y el mantenimiento de pozos, la instalación de tecnologías de ahorro de agua, etc. (véase el capítulo 11).

2.2 Instrumentos jurídicos

La legislación relativa a los recursos hídricos subterráneos define derechos vinculantes y ejecutables, e identifica derechos y obligaciones que posteriormente se ponen en práctica a través de decisiones de gestión, incluyendo el control y la ejecución. Por ejemplo, la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (Parlamento Europeo/Consejo, 2000) y su Directiva de Aguas Subterráneas (Parlamento Europeo/Consejo, 2006) han desencadenado un gran número de actividades de gestión.

Las leyes y los reglamentos que incorporan las metas sociales y los objetivos políticos (véase el capítulo 10), y que establecen un marco regulador y habilitador para alcanzar esas metas, son componentes fundamentales de la gobernanza de las aguas subterráneas. También son fundamentales para la gestión de las aguas subterráneas. Los marcos jurídicos estables también permiten a los gobiernos y a los usuarios de las aguas subterráneas planificar la gestión de los recursos (véase el capítulo 10) a largo plazo y hacer frente a intereses contrapuestos, incluidos los del medio ambiente y los de las generaciones futuras (Smith et al., 2016).

Las leyes y reglamentos nacionales dictan el acceso a las aguas subterráneas, así como las actividades humanas que afectan a su calidad

Los marcos jurídicos deben incluir la protección de las zonas de descarga y recarga y del área que rodea los pozos de abastecimiento de agua, así como normas de rendimiento sostenible y controles de extracción, y reglamentos de uso conjunto. Tales marcos requerirían el intercambio de datos para facilitar procesos importantes, entre otras cosas, el equilibrio de los intereses en competencia o en conflicto entre las partes interesadas, la reducción/eliminación de las desigualdades en el acceso y el beneficio del recurso, y la coordinación con los usos del suelo urbano y rural para la gestión de todo el espacio del subsuelo (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c).

Las leyes y reglamentos nacionales dictan el acceso a las aguas subterráneas, así como las actividades humanas que afectan a su calidad (véase la sección 2.2.2). Otros instrumentos jurídicos pertinentes son los que:

a) Proporcionan acceso al agua para las necesidades básicas, como una cuestión de derechos humanos. Los derechos humanos al agua y al saneamiento, así como el derecho a un medio ambiente seguro, limpio, saludable y sostenible, difieren de los derechos al agua en que no son temporales ni están sujetos a la aprobación del Estado, y en que no pueden ser retirados. La Asamblea General de las Naciones Unidas y el Consejo de Derechos Humanos reconocen que el acceso equitativo al agua potable segura y limpia y al

saneamiento son derechos humanos (AGNU, 2010; UNHRC, 2010). Como tal, los recursos hídricos subterráneos deben ser protegidos como parte del derecho humano a un medio ambiente seguro, limpio, saludable y sostenible, que fue reconocido recientemente por el Consejo de Derechos Humanos (UNHRC, 2021). En los lugares en los que los servicios de agua son inexistentes o inadecuados, la dependencia de los hogares y las comunidades de las aguas subterráneas es varias veces mayor, lo que repercute en las obligaciones de los Estados de respetar, proteger y cumplir el derecho al agua potable en relación con la protección de los recursos. El papel del Estado va desde aconsejar a los usuarios finales que protejan "sus" recursos de aguas subterráneas hasta apoyar a los hogares cuyos pozos se han secado debido a la sequía recurrente (Grönwall y Danert, 2020).

En la mayoría de las jurisdicciones actuales, la propiedad pública o gubernamental de las aguas subterráneas es la norma

b) Permiten el acceso a las aguas subterráneas para los medios de vida y los usos productivos a pequeña escala de las comunidades tradicionales, en cumplimiento del derecho consuetudinario. Sin embargo, las normas formales pueden ignorar el derecho consuetudinario, con el resultado de que los usuarios quedan sin protección legal ante los titulares de derechos de agua formales (Hodgson, 2016). Las normas consuetudinarias siguen desempeñando un papel importante, por ejemplo, en lo que respecta a que los recursos hídricos subterráneos se perciben como pertenecientes a la comunidad, al tiempo que se rechaza el concepto de derechos individuales. En gran parte de África y Asia, los derechos consuetudinarios sobre el agua están intrínsecamente vinculados a la tierra y están integrados en los sistemas de tenencia de la misma (Mechlem, 2016; Meinzen-Dick y Nkonya, 2007). Sin embargo, las normas consuetudinarias relativas a los recursos hídricos pueden ser injustas o incluso discriminatorias, y van en contra de los intereses de las mujeres, los niños y las minorías (Hodgson, 2016); cuando a las mujeres y los grupos minoritarios se les niega la propiedad formal de la tierra, también pueden verse privados de los derechos sobre las aguas subterráneas. La gobernanza responsable de la tenencia de la tierra, la pesca y los bosques está inextricablemente vinculada al acceso y la gestión de otros recursos naturales, como las aguas subterráneas (FAO, 2012).

c) Regulan los usos del suelo que sean perjudiciales para los procesos naturales de recarga y descarga de las aguas subterráneas y para la función de apoyo al medio ambiente de las aguas subterráneas en relación, en particular, con los humedales y los oasis.

d) Regulan la formación y el funcionamiento de las asociaciones de usuarios de aguas subterráneas para las responsabilidades de asignación, control y vigilancia en el nivel de aguas subterráneas comunes.

El derecho internacional del agua identifica los derechos y obligaciones de los Estados soberanos en relación con los ríos, lagos, cuencas y acuíferos que están divididos por una línea fronteriza internacional, la forman o la subyacen (en el caso de las aguas subterráneas). Recientemente ha empezado a ocuparse específicamente de los acuíferos y las aguas subterráneas; los países han celebrado un puñado de tratados y acuerdos con respecto específicamente a los acuíferos y las aguas subterráneas transfronterizas (véase el capítulo 12).

2.2.1 Derechos de agua: de los derechos de propiedad privada a los derechos administrativos

En la mayoría de las jurisdicciones actuales, la propiedad pública o gubernamental de las aguas subterráneas es la norma, y la extracción y el uso de las aguas subterráneas se basan en derechos administrativos como permisos, licencias o concesiones individuales que, en muchas jurisdicciones, están limitadas en el tiempo y calificadas en cuanto a los volúmenes y las tasas de extracción (Salman y Bradlow, 2006; Nelson y Quevauviller, 2016; Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c; Burchi, 2018a). Sin embargo, en algunas jurisdicciones con poblaciones considerables, como la India, el Pakistán, Filipinas y más de la mitad de los estados de los Estados Unidos, los derechos de las aguas subterráneas están vinculados a la propiedad de la tierra y las aguas subterráneas se consideran propiedad privada (Closas y Molle, 2016; Tarlock y Robinson, 2019).

El Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas ha subrayado la importancia de llevar el recurso al dominio público, a pesar de los desafíos legales y prácticos que esto puede suponer, permitiendo así al Estado asignar derechos de uso y regular las extracciones en línea con los objetivos sociales de sostenibilidad, equidad y eficiencia (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c). La transición de las aguas subterráneas del dominio privado al público, aunque sea difícil en vista de las connotaciones políticas, puede lograrse con éxito (como ha ocurrido en jurisdicciones como la Argentina, los estados australianos de Nueva Gales del Sur y Victoria, Alemania, Italia, Marruecos, Sudáfrica, Tanzanía, Uganda y Zimbabwe) a través de la legislación o de los pronunciamientos de los más altos tribunales (Burchi, 1999, 2012, 2018a; Burchi y Nanni, 2003; Salman y Bradlow, 2006). En España, en cambio, el intento de pasar de la propiedad privada a la pública de las aguas subterráneas decretado por la Ley de Aguas de 1985 quedó varado finalmente, a pesar de una sentencia favorable del Tribunal Supremo, y los propietarios privados anteriores a 1985 pueden seguir disfrutando de derechos de usufructo. Sin embargo, los nuevos derechos se asignan en régimen de propiedad pública. Esto ilustra los problemas para conseguir la aceptación de estas transiciones de propiedad (Closas y Molle, 2016). En algunas jurisdicciones, las aguas subterráneas se regulan conjuntamente con las aguas superficiales, incluidos los ríos. En otras, forma parte de leyes marco. Cada vez son más los países que refuerzan su marco jurídico en relación con las aguas subterráneas, equiparándolas a los regímenes de aguas superficiales, protegiendo la cantidad y la calidad, e implicando a las partes interesadas para equilibrar los intereses privados y públicos (Mechlem, 2016). El cuadro 2.3 muestra un ejemplo de Australia, donde se introdujeron asignaciones "basadas en acciones" y derechos de extracción para gestionar las extracciones de aguas subterráneas. El uso de este tipo de regulación de la extracción de recursos puede equilibrar mejor la función de apoyo al hábitat y al medio ambiente de las aguas subterráneas y los acuíferos con los usos productivos y otras necesidades (Burchi, 2018a; Smith et al., 2016).

Cuadro 2.3 Cambio de derechos de extracción de agua "basados en el volumen" a "basados en la cuota" en Nueva Gales del Sur (Australia)

El estado australiano de Nueva Gales del Sur introdujo un régimen de acceso a granel en virtud de la Ley de Gestión del Agua (2000). La cantidad de agua subterránea extraída de los acuíferos ha pasado de ser una asignación volumétrica a una cuota variable en las aguas subterráneas disponibles de un determinado acuífero. Las licencias de extracción pertinentes constan de dos partes: un "componente de participación", que da derecho al titular de la licencia a una parte de las aguas subterráneas disponibles en el acuífero; y un "componente de extracción", que da derecho al titular de la licencia a extraer aguas subterráneas del acuífero en momentos, tasas y lugares determinados. El primero es el eje de este sofisticado régimen de gestión y gobernanza, y se determina sobre la base de las normas de reparto del agua (incluso de las aguas superficiales) y de los planes de reparto del agua negociados de forma participativa en los planes decenales de gestión de los acuíferos (véase el capítulo 10) (Burchi, 2018a).

Cabe señalar que en algunos casos existen conflictos entre los derechos de las aguas subterráneas y los derechos de las aguas superficiales, por ejemplo, en el caso de un arroyo que se está secando debido al intenso bombeo de aguas subterráneas en las cercanías, y viceversa. Un enfoque de gestión conjunta es prometedor para tratar conjuntamente los derechos de aguas subterráneas y superficiales, como se ha hecho en Nueva Gales del Sur, en Australia (cuadro 2.3).

La emisión y el vertido ilegales de sustancias en las masas de agua o en el suelo, o el tratamiento ilegal de las aguas residuales, de forma que causen daños o riesgos importantes para los sistemas de aguas subterráneas y/o la salud humana, pueden considerarse una infracción o un delito

2.2.2 Regulación de la contaminación

Las fuentes puntuales de contaminación —el vertido industrial de aguas residuales (en particular, los pozos de inyección), la manipulación de residuos sólidos que pueden afectar a los recursos de aguas subterráneas y las alcantarillas municipales— pueden regularse mediante permisos, así como mediante normas generales de efluentes y/o de calidad del agua ambiental. El vertido directo de residuos peligrosos o tóxicos en las aguas subterráneas se ha prohibido en algunas jurisdicciones (Burchi, 2018a). La contaminación no puntual procedente de fuentes difusas o indistintas requiere medidas de prevención: regulación de los usos del suelo y/o imposición de mejores prácticas agrícolas y medioambientales. Al igual que en el caso de la contaminación puntual, estas medidas incluyen: la prohibición o limitación de determinadas actividades contaminantes y de uso del agua; la limitación del uso de pesticidas, herbicidas y fertilizantes (especialmente para reducir la acumulación de nitrógeno y fósforo); la restricción de determinadas pautas de cultivo; la reducción de la intensidad del pastoreo de animales; la recuperación de tierras y la gestión del drenaje (Mechlem, 2016).

La emisión y el vertido ilegales de sustancias en las masas de agua o en el suelo, o el tratamiento ilegal de las aguas residuales, de forma que causen daños o riesgos importantes para los sistemas de aguas subterráneas y/o la salud humana, pueden considerarse una infracción o un delito. Pueden estipularse sanciones y penas por vertidos sin permiso o en violación de uno, en virtud del derecho penal, civil o administrativo. Sin embargo, los esfuerzos de aplicación y el enjuiciamiento de los contaminadores suelen ser un reto debido a la naturaleza invisible de las aguas subterráneas.

2.3 Aspectos institucionales

La gobernanza de las aguas subterráneas tiene lugar a múltiples escalas y niveles geográficos, incluso a escala regional (como la Unión Europea) y transfronteriza. En cambio, la gestión de las aguas subterráneas se produce más a menudo a nivel micro y meso. El acceso a las aguas subterráneas está determinado por una serie de disposiciones sociales/institucionales, organizativas, financieras y técnicas, así como por reglas, prácticas y normas comúnmente aceptadas. Es en los niveles micro y meso donde debe centrarse la atención para atender las necesidades de los pobres (Cleaver et al., 2005).

Existe una diversidad de partes interesadas/actores en las instituciones relacionadas con las aguas subterráneas, que representan a los sectores público y privado, a las autoridades o comités (regionales) del agua, a los servicios públicos, a los organismos de cuenca, a las comunidades, a los grupos informales y a la sociedad en general. Parte de la función de estas instituciones es aplicar las políticas y las leyes, traducir las decisiones en acciones y garantizar que se lleven a cabo los reglamentos, los procedimientos de gobernanza y el cumplimiento de los mandatos (Smith et al., 2016) sobre la base de la información y los conocimientos adquiridos sobre los sistemas de aguas subterráneas.

Los organismos gubernamentales suelen tener el mandato de realizar actividades de gobernanza y gestión de las aguas subterráneas a varios niveles, pero en la práctica su papel puede variar considerablemente, desde un enfoque regulador descendente hasta una posición permisiva, de "laissez-faire" (Kemper, 2007). Las funciones asignadas o permitidas (o el enfoque) de las partes interesadas también pueden ser muy diferentes. Por ejemplo, las normas e instituciones locales pueden influir en la división del trabajo y las funciones, que a su vez determinan el abastecimiento y la asignación del agua. Además, las organizaciones comunitarias pueden estar plagadas de facciones, estar segregadas por sexos y ser excluyentes (Cleaver et al., 2005). Cuando los usuarios de aguas subterráneas actúan como individuos o comunidades (incluido el autoabastecimiento en áreas urbanas, así como los planes de irrigación dirigidos por los agricultores), puede haber pocas instituciones formales, si es que hay alguna, a través de las cuales pueda extenderse la gobernanza.

La actuación de los organismos públicos varía en la práctica desde prácticamente inactivos hasta proactivos y eficaces, dependiendo del marco habilitador (incluida la normativa); del nivel de concienciación sobre la importancia de las aguas subterráneas y del compromiso político; de la asignación presupuestaria y, en consecuencia, de la capacidad de gestión; del liderazgo; y/o de los mandatos. Un factor adicional son las presiones comerciales y políticas para sobreexplotar las aguas subterráneas, junto con la situación política general y la posición del gobierno a los ojos de la población local (incluida la confianza mutua o la falta de ella). Una unidad gubernamental nacional puede garantizar tanto la integración vertical entre el nivel nacional y el local, como la cooperación horizontal entre los distintos niveles y en la interfaz con otros sectores. A nivel de cuenca hidrográfica o de sistema acuífero, las organizaciones de las partes interesadas pueden desempeñar un papel importante en la coordinación de la planificación y la gestión de las aguas subterráneas. Dado que las aguas subterráneas se perciben (a menudo de forma incorrecta) como un recurso local, las organizaciones descentralizadas (incluidos los municipios) tienen un papel fundamental. Sin embargo, un acuífero puede extenderse por debajo de más de una cuenca hidrográfica, lo que complica la gobernanza de las cuencas hidrográficas y los acuíferos y la gestión integrada de los recursos hídricos. Los gobiernos deben esforzarse por buscar la participación sistemática de las partes interesadas con el objetivo de crear mecanismos permanentes de participación de las partes interesadas. Esto puede ser en forma de asociaciones de usuarios de agua y otros foros (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c). Según el Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas (2016c), la visión de un "Marco de Acción Mundial" implica instituciones eficaces con capacidad para mirar al futuro y planificar, para ser inclusivas y legítimas a los ojos de las partes interesadas, y para llegar a compromisos creíbles y verificables, con los siguientes componentes:

- Un diseño organizativo sólido con la capacidad adecuada para la elaboración de políticas y la administración pública del uso de los recursos y la protección de la contaminación;
- mecanismos de compromiso y participación permanente de las partes interesadas para fomentar actitudes y acciones socialmente responsables sobre las aguas subterráneas como recurso de uso común;
- procedimientos de coordinación y cogestión intersectorial que permitan abordar adecuadamente las cuestiones relativas a las aguas subterráneas en las políticas y prácticas de los sectores vinculados; y
- instituciones para la gestión de los recursos hídricos subterráneos que atraviesan las fronteras intranacionales e internacionales (cuando sea pertinente).

Las instituciones, por sí solas, no son suficientes para gobernar adecuadamente las aguas subterráneas/acuíferos intra e internacionales. Deben ir acompañadas de políticas nacionales (y a veces subnacionales) y leyes que guíen a estas instituciones en su trabajo.

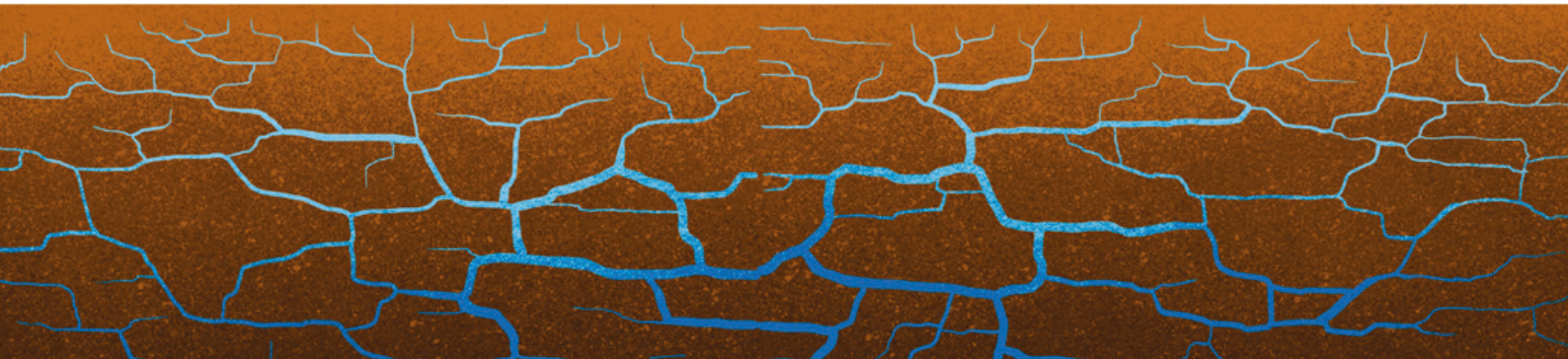
Los organismos de cuenca rara vez contemplan las aguas subterráneas, en parte por la falta de conocimientos y capacidad de evaluación de los acuíferos y en parte por la histórica separación institucional de las aguas superficiales y subterráneas. Como consecuencia, la planificación de las cuencas fluviales queda incompleta. Sin embargo, en varias partes del mundo se ha iniciado la cooperación, lo que sugiere la aparición de algunas buenas prácticas, basadas en los enfoques utilizados en la gestión de las cuencas fluviales transfronterizas (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c).

Capítulo 3

Aguas subterráneas y agricultura

FAO
Matthew England

IWMI
Karen Villholth



3.1 Introducción

Este capítulo ofrece una visión general del papel de las aguas subterráneas en la agricultura, el sector que más utiliza el recurso a nivel mundial. A medida que el crecimiento de la población y de los ingresos impulsa la demanda de una producción de alimentos más intensiva y de mayor valor, para la que las aguas subterráneas son muy adecuadas, la agricultura de regadío, la ganadería y los usos industriales relacionados, incluida la elaboración de alimentos, dependen cada vez más de este recurso (FAO, 2020).

3.2 Uso de las aguas subterráneas en el sector agrícola

3.2.1 Importancia de las aguas subterráneas para la agricultura

Las aguas subterráneas son un recurso fundamental para la agricultura de regadío, la ganadería y otras actividades agrícolas, incluida la transformación de alimentos. Las extracciones mundiales de agua subterránea en 2018 se estimaron en aproximadamente 978 km³ al año para todos los sectores, incluida la agricultura (Aquastat, s.f.; Eurostat, s.f.; Margat y Van der Gun, 2013). Aproximadamente el 70 % de las extracciones de agua subterránea a nivel mundial, y aún más en las regiones áridas y semiáridas (Margat y Van der Gun, 2013), se utilizan en la producción agrícola de alimentos, fibras, ganado y cultivos industriales (FAO, 2020). Se estima que el 38 % de las tierras equipadas para la irrigación se abastecen de agua subterránea (Siebert et al., 2013). En un contexto más amplio, la agricultura de regadío sigue representando el 70 % de las extracciones de agua dulce (FAO, 2020), y se estima que el 90 % de toda la evaporación del agua (Hoogeveen et al., 2015). El uso de agua para el procesamiento de alimentos también es significativo, hasta un 5 % del uso global de agua (Boretti y Rosa, 2019). Estas cifras ponen de manifiesto el carácter globalmente intensivo en agua de la producción de alimentos.

Las aguas subterráneas son un recurso fundamental para la agricultura de regadío, la ganadería y otras actividades agrícolas, incluida la transformación de alimentos

La extracción de aguas subterráneas ha desempeñado un papel importante en la aceleración de la producción de alimentos a partir de la década de 1970 (FAO, 2020; Shah et al., 2007), especialmente en áreas semiáridas y áridas con precipitaciones y aguas superficiales limitadas. Al mismo tiempo, ha sostenido las economías locales y regionales que dependen de las aguas subterráneas para su sustento, crecimiento económico y seguridad alimentaria.

Para satisfacer las demandas mundiales de agua y agricultura para 2050, incluido un aumento estimado del 50 % de los alimentos, los piensos y los biocombustibles en relación con los niveles de 2012 (FAO, 2017), es de vital importancia aumentar la productividad agrícola mediante la intensificación sostenible de la extracción de aguas subterráneas, disminuyendo al mismo tiempo las huellas hídricas y ambientales de la producción agrícola, lo que puede lograrse, por ejemplo, mediante la agroecología (Snapp et al., 2021) y una mejor política alimentaria e instrumentos económicos (FAO, 2021).

Para comprender las diversas y dinámicas repercusiones del uso de las aguas subterráneas para la agricultura en todo el mundo, Shah et al. (2007) distinguen entre cuatro tipos de socioecologías:

- sistemas agrícolas áridos, como en Oriente Medio y el Norte de África, donde las aguas subterráneas también son cada vez más demandadas para usos no agrícolas de mayor valor;
- sistemas agrícolas industriales, como los de Australia, Europa y el oeste de los Estados Unidos, donde las aguas subterráneas sustentan la agricultura de precisión[7] comercial y atraen recursos financieros relativamente altos para su gestión;

[7] La agricultura de precisión comprende el uso de herramientas de tecnología de la información y la comunicación, incluidos los sistemas de posicionamiento global, los satélites, los drones, los sensores y las imágenes aéreas que proporcionan a los agricultores información específica del lugar para tomar decisiones de gestión (Lowenberg-DeBoer y Erickson, 2019). La determinación de las condiciones del suelo y de los cultivos, al tiempo que se minimizan los impactos sobre la vida silvestre y el medio ambiente, está en la raíz de la agricultura de precisión. Aunque se concentran en los países de altos ingresos, algunas herramientas de precisión tienen un gran potencial en los países de bajos ingresos. Muchas de estas aplicaciones se han limitado a la agricultura a gran escala, pero también hay oportunidades para los pequeños agricultores (FAO, 2020).

- sistemas agrícolas de pequeñas explotaciones, como en el sur y cada vez más en el sureste de Asia, así como en la llanura del norte de China, donde la irrigación con aguas subterráneas es el principal sustento de entre 1 000 y 1 200 millones de agricultores, en su mayoría pobres; y
- pastoreo extensivo apoyado en aguas subterráneas, como en gran parte del África Subsahariana y América Latina.

En las regiones en las que existe una fuente perenne y fiable de aguas subterráneas poco profundas, incluso en áreas que antes eran de secano, las aguas subterráneas han sido y siguen siendo una fuente importante para los pequeños agricultores (Villholth, 2013a; Shah, 2009; Giordano, 2006). Representan una fuente de agua relativamente accesible, local, a la demanda y perenne para las prácticas agrícolas, lo que se traduce en una reducción de la pobreza, una mayor seguridad alimentaria y una mejora de los medios de vida. Los datos de Asia de hace dos décadas indican que la proliferación del acceso a las aguas subterráneas promovió una mayor equidad interpersonal, interclasista, de género e interregional en el acceso a la irrigación en comparación con los grandes proyectos de riego por canales (Shah et al., 2007; Deb Roy y Shah, 2003; Van Koppen et al., 2002). Los estudios realizados en África, Asia y América Latina muestran que, cuando los agricultores pobres intentan mejorar sus medios de vida mediante la agricultura o la ganadería a pequeña escala, es habitual que se utilicen aguas subterráneas y pequeñas bombas, que benefician especialmente a las mujeres (Villholth, 2013a; Shah et al., 2007; Van Koppen, 1998).

3.2.2 Comparación regional de la irrigación con aguas subterráneas

El área de tierras equipadas para irrigación (incluyendo control total, humedales equipados y riego por aspersión) en todo el mundo se ha más que duplicado desde la década de 1960, pasando de 139,0 Mha en 1961 a 325,1 Mha en 2013 (tabla 3.1). La variación regional en la extensión del área de irrigación es pronunciada. Asia representa el 72 % de la superficie mundial equipada para la irrigación, predominantemente en el Sur y el Este de Asia, y el 41 % de su área cultivada es de regadío. El África Subsahariana es la que tiene un menor desarrollo de la irrigación: la zona de regadío representa el 3,4 % del área cultivada regional, mientras que en Asia occidental supone el 41 %. Las regiones que dependen en gran medida de las aguas subterráneas para la irrigación son América del Norte y Asia del Sur, donde el 59 % y el 57 % del área equipada utilizan aguas subterráneas, respectivamente, mientras que en el norte de África es el 35 % y en el África Subsahariana solo el 5 % (véase la sección 8.1.3).

3.2.3 Comparación de la irrigación con aguas subterráneas entre países

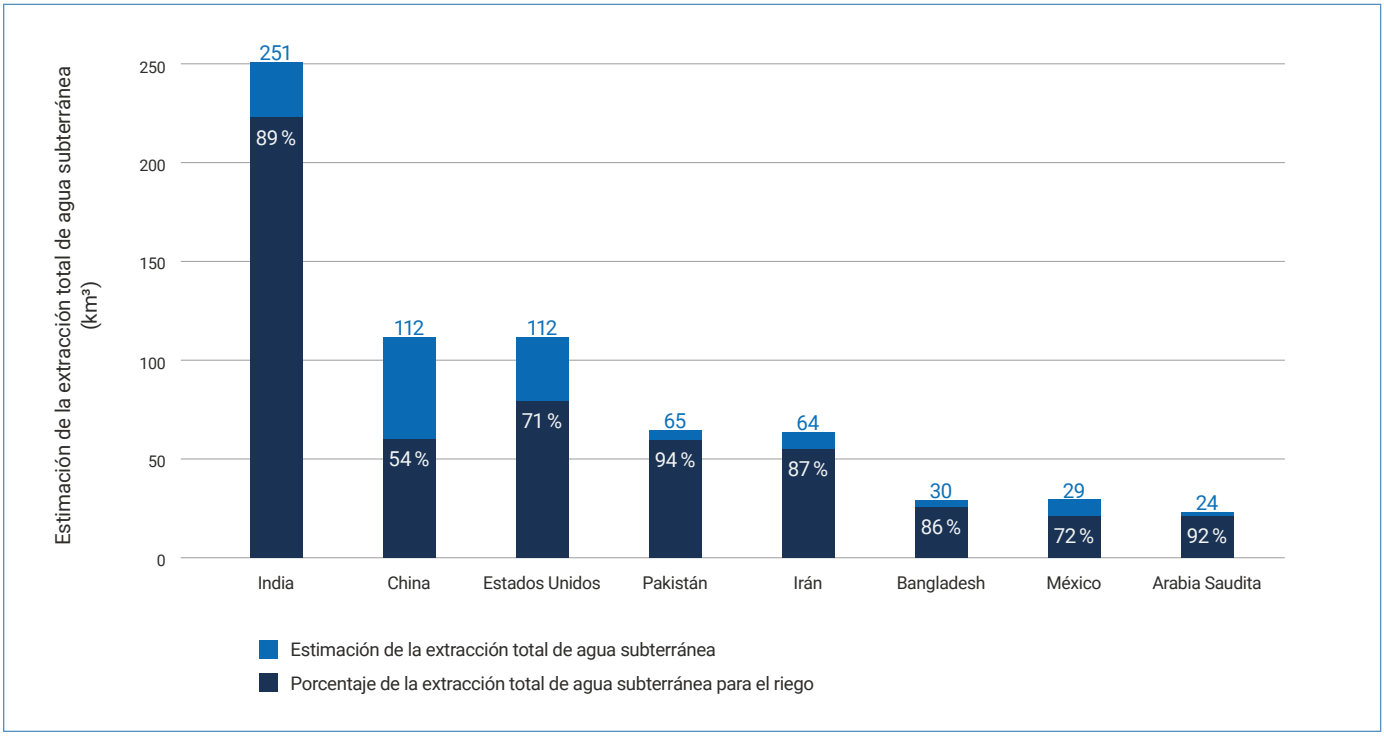
Los países con mayor área de irrigación son China (73 Mha), la India (70 Mha), los Estados Unidos (27 Mha) y el Pakistán (20 Mha) (Aquastat, s.f.). La proporción de la extracción total de agua subterránea utilizada para la irrigación varía significativamente en estos países. La India, que es el mayor usuario de aguas subterráneas del mundo, con una extracción estimada de 251 km^3 al año, utiliza el 89 % de su extracción de aguas subterráneas para la irrigación. China depende relativamente menos de las aguas subterráneas, con una media estimada del 54 % de la extracción total de aguas subterráneas destinada a la irrigación, pero con importantes disparidades geográficas, siendo la Llanura del Norte de China (véase el apartado 8.4.4) la que más depende de las aguas subterráneas en comparación con las regiones del sur (Liu et al., 2010). Otros países, como Bangladesh, Irán, México, el Pakistán, la Arabia Saudita y los Estados Unidos, también dependen en gran medida de las aguas subterráneas para la irrigación, con cantidades de extracción de aguas subterráneas para la irrigación que van del 71 al 94 % (Margat y Van der Gun, 2013) (figura 3.1).

Tabla 3.1 Áreas de irrigación por región y a nivel global, incluyendo la cuota de agua subterránea

Continente y región	Área total equipada para la irrigación desde aguas superficiales o subterráneas (Mha) (Faostat 1961-1996; Aquastat 1997-2013)		Área de irrigación como % del área total cultivada (Faostat)		Irrigación de aguas subterráneas (2013) (Aquastat)	
Año	**1961**	**2013**	**1961**	**2013**	**Área equipada (Mha)**	**% de área total de irrigación**
África	**7,4**	**15,6**	**4,4**	**5,8**	**2,9**	**19,2**
África del Norte	3,9	7,4	17,1	25,6	2,5	34,6
África Subsahariana	3,5	8,2	2,4	3,4	0,4	5,4
América	**22,7**	**52**	**6,7**	**13,1**	**23,7**	**45,5**
América Central y Caribe	17,4	1,7	6,7	13	0,6	33,8
América del Norte	0,6	34,3	5,5	14,9	20,1	58,7
América del Sur	4,7	16	6,8	10,5	3	18,5
Asia	**95,6**	**232,6**	**19,6**	**40,9**	**89,7**	**38,7**
Asia Central	9,6	13,2	16,2	28,5	1,1	8
Asia Oriental	7,2	73,9	13,4	56	21,3	28,9
Asia Meridional	36,3	98,0	19,1	45,7	55,5	56,6
Asia Sudoriental	34,5	22,8	29,7	20,7	0,6	4,6
Asia Occidental	8	24,7	11,7	40,6	11,2	45,2
Europa	**12,3**	**21,4**	**3,6**	**7,3**	**7,1**	**14**
Europa del Este y Federación de Rusia	8,7	4,8	5,8	3,6	0,25	10,1
Europa Occidental y Central	3,6	16,6	1,9	13,5	6,8	40,7
Oceanía	**1,1**	**3,2**	**3,2**	**6,8**	**0,8**	**24,9**
Australia y Nueva Zelandia	1,1	3,2	3,2	6,9	0,8	24,9
Islas del Pacífico	0,001	0,004	0,2	0,6	0,0004	10
MUNDO	**139,1**	**324,8**	**10,2**	**20,6**	**124,1**	**38,4**

Fuente: Datos de Aquastat (s.f.) y Faostat (s.f.).

Figura 3.1 Estimación de la extracción total de aguas subterráneas y el porcentaje destinado a la irrigación para los países seleccionados en 2010



Fuente: Basado en datos de Margat y Van der Gun (2013).

3.2.4 El alcance del uso conjunto del agua

El uso conjunto[8] de aguas subterráneas y superficiales en la agricultura es importante. Suele apoyar la intensificación dentro de las áreas de irrigación de aguas superficiales existentes, como en el sur de Asia, donde permite los cultivos perennes y el control de la salinidad (Shah, 2009). La evolución del uso conjunto no suele estar gestionada ni planificada, sino que es un mecanismo de adaptación de los agricultores cuando los sistemas de aguas superficiales establecidos no consiguen garantizar el acceso al agua dulce perenne. Hay pocos informes coherentes sobre el uso conjunto (Siebert et al., 2010), pero los datos del censo en los Estados Unidos (Dieter et al., 2018), China y la India (Evans y Dillon, 2018; Ministerio de Recursos Hídricos de la India, 2017) indican una expansión continua.

3.2.5 Contribución económica de las aguas subterráneas a la agricultura

La contribución económica de las aguas subterráneas en la agricultura se ha estimado en unos 210-230 000 millones de dólares al año en todo el mundo, con una productividad bruta de 0,23-0,26 dólares por m^3 extraído (Shah et al., 2007). La productividad del agua, en términos de rendimiento de los cultivos por unidad de agua aplicada, suele ser mayor, hasta un factor de dos, para las aguas subterráneas que para las superficiales. Esto se debe principalmente a que las aguas subterráneas están disponibles a demanda, a su proximidad a los campos y al hecho de que normalmente se autogestionan. Esto permite a los agricultores invertir más en otros insumos para los cultivos, como fertilizantes, plaguicidas y semillas, haciendo que sus actividades agrícolas sean más atractivas, más lucrativas y menos arriesgadas (Bierkens et al., 2019; Smilovic et al., 2015; Shah, 2007). Sin embargo, la contribución económica global y la productividad del agua pueden parecer bajas en comparación con otros sectores que utilizan el agua, debido a una combinación de consumo de agua relativamente alto por unidad de producción y a los bajos precios de los productos agrícolas. En el contexto del crecimiento económico y el aumento de la urbanización, esto hace que a menudo la agricultura tenga que renunciar al agua para los usos urbanos e industriales, debido a su valor añadido generalmente más alto por unidad de uso del agua (Molle y Berkoff, 2009).

3.2.6 Aguas subterráneas para el ganado

Los volúmenes de agua subterránea utilizados para el agua potable del ganado[9] son pequeños en comparación con los volúmenes utilizados para la irrigación de cultivos forrajeros para el ganado (Shah et al., 2007). La producción de forraje de regadío representa el 98 % del agua (superficial y subterránea) utilizada para el ganado, y el 2 % restante del agua se utiliza para beber y refrigerar (Mekonnen y Hoekstra, 2012). A nivel mundial, se calcula que se utilizan 264 km^3 de agua superficial y subterránea al año para la producción de forraje, lo que equivale a una quinta parte del total de agua agrícola consumida y a menos de un tercio del agua utilizada para los cultivos alimentarios (Heinke et al., 2020).

Los pastizales bajo praderas y pastos permanentes gestionados por el hombre, en su mayoría de secano, cubren casi 33 millones de km^2 de la superficie de la Tierra, un 70 % estimado de toda la tierra agrícola (Faostat, s.f.). El número total de cabezas de ganado se ha triplicado con creces, pasando de 7 300 millones de unidades en 1970 a 24 200 millones de unidades en 2011 (FAO, 2018a). La intensificación de la producción ganadera está asociada a una concentración de la demanda de alimentos y agua, especialmente en la ganadería industrial, a menudo asociada a la intensificación de la presión sobre la tierra y los recursos hídricos *in situ*, por ejemplo, en el cultivo de forraje de regadío en sistemas de pastoreo cero (IPES-Food, 2018).

---

[8] El uso conjunto del agua se refiere al uso combinado de aguas superficiales y subterráneas para satisfacer la demanda de agua de los cultivos (Shah et al., 2006).

[9] El ganado se utiliza en un sentido amplio para abarcar a todos los animales domésticos, independientemente de su edad, ubicación o propósito de cría. Los animales no domesticados quedan excluidos de esta definición a menos que se mantengan o críen en cautividad. El ganado incluye cuadrúpedos grandes y pequeños, aves de corral, insectos (abejas) y larvas de insectos (gusanos de seda) (FAO, 2018a).

Muchos pastizales áridos y semiáridos dependen totalmente del acceso a las aguas subterráneas para mantener el agua potable para el ganado. Las estructuras de los pozos de agua subterránea fomentan ratios de población superiores a la capacidad de carga de los pastizales en términos de vegetación natural para el pastoreo, y también concentran el ganado alrededor de los pozos. La sostenibilidad medioambiental de los pastizales puede verse gravemente alterada por la introducción de pozos de sondeo con bombas motorizadas (Shah et al., 2007). En Somalia y el norte de Kenya, los pozos de sondeo han mejorado la seguridad del agua, pero también han fomentado el exceso de ganado, lo que ha provocado disputas por los derechos de agua y pastos, así como la exclusión de comunidades vulnerables (Gomes, 2006).

El pastoreo desempeña un papel crucial en el mantenimiento de los medios de vida en gran parte del África Subsahariana (Giordano, 2006). Aunque la extracción de aguas subterráneas puede ser menos intensiva en los pastizales ganaderos, la degradación de la tierra debida al ganado puede tener un impacto significativo en la recarga de las aguas subterráneas y en la calidad de las mismas (Meglioli et al., 2013).

3.3 Impacto de la agricultura en la cantidad de aguas subterráneas

3.3.1 Agotamiento de las aguas subterráneas atribuido a la irrigación

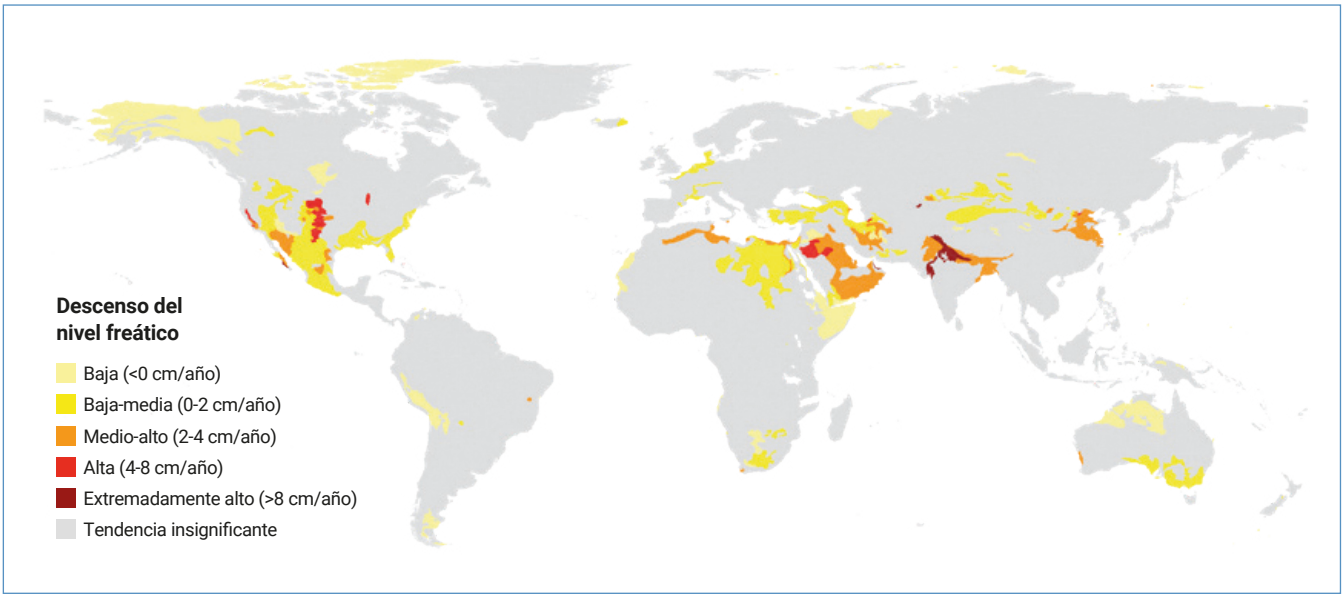
El agotamiento de las aguas subterráneas suele atribuirse a las extracciones agrícolas. El agotamiento conduce a una multitud de externalidades, incluyendo la desecación de los humedales y cursos de agua dependientes de las aguas subterráneas a través de la reducción de los flujos de base (véase el capítulo 6) y la compactación de las capas de tierra comprimible, con el consiguiente hundimiento de la tierra, la migración hacia abajo de las aguas subterráneas de baja calidad, y la intrusión salina en los acuíferos y los sistemas de aguas superficiales a lo largo de las llanuras costeras.

Las observaciones terrestres y los datos satelitales han demostrado, o han hecho plausible, que numerosos acuíferos están siendo explotados a ritmos que inducen un rápido agotamiento y las externalidades sociales y ambientales asociadas. Esto incluye varios de los 37 principales sistemas acuíferos del mundo (Konikow, 2011; Gleeson et al., 2012; Scanlon et al., 2012a; Richey et al., 2015; Gong et al., 2018; Shamsudduha y Taylor, 2020) (figura 3.2). Las altas tasas de extracción para la agricultura de regadío se concentran en las regiones áridas y semiáridas, donde el crecimiento de la población y la expansión de las áreas de regadío han provocado un rápido crecimiento de la demanda de agua. La explotación de las aguas subterráneas se ha visto impulsada por factores relacionados con el abastecimiento, así como su capacidad de proporcionar una irrigación flexible y acorde a la demanda para apoyar una agricultura creadora de riqueza (Shah et al., 2007; Gleeson et al., 2012) y la fácil disponibilidad de bombas, tecnologías de perforación y energía baratas, a menudo respaldadas por el apoyo gubernamental y los programas de subvención. También han contribuido los factores de atracción de la demanda, derivados de la necesidad de suministrar más alimentos a las crecientes poblaciones urbanas y rurales.

El agotamiento incesante de las aguas subterráneas en las áreas agrícolas se está convirtiendo en un problema cada vez más preocupante a nivel regional y mundial

El agotamiento más notable debido a las extracciones agrícolas se produce en los acuíferos continentales asociados a las llanuras y los márgenes costeros. El agotamiento localizado en acuíferos aluviales, costeros, deltaicos e insulares menores (que no se muestran en la figura 3.2) también puede atribuirse parcialmente a las extracciones agrícolas, lo que provoca escasez y contaminación de las aguas subterráneas, así como intrusión salina, que amenazan el abastecimiento de agua potable y limitan la producción agrícola (Margat y Van der Gun, 2013). Los acuíferos que están desvinculados de la recarga contemporánea, en particular los situados en áreas áridas dependientes de las aguas subterráneas, presentan casos especiales y particularmente alarmantes de agotamiento de las aguas subterráneas, ya que el agua subterránea almacenada se elimina permanentemente mientras el acuífero no recibe ninguna o insignificante recarga natural bajo el clima actual (Bierkens y Wada, 2019) (cuadro 3.1). Estos acuíferos no renovables, que reciben una tasa de recarga insignificante en la escala de

Figura 3.2 Descenso del nivel freático en una selección de los principales acuíferos del mundo



Nota: El descenso del nivel freático indica el descenso medio anual del nivel freático durante el periodo de estudio (1990-2014).

Fuente: WRI (2019). Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

tiempo del ser humano, requieren estrategias a largo plazo para el agotamiento planificado, en las que son esenciales las medidas alternativas para garantizar el abastecimiento básico de agua, al tiempo que se transforma la economía en una menos intensiva en agua. El horizonte temporal en el que se pueden alcanzar esos objetivos es un parámetro de planificación fundamental, pero está asociado a una gran incertidumbre, ya que la capacidad absoluta de almacenamiento y la viabilidad económica de la extracción de acuíferos finitos siguen siendo inciertas (Foster y Loucks, 2006). También es probable que muchas partes de los acuíferos renovables estén sometidas a un agotamiento irreversible, ya que su rellenado a partir de la recarga natural, o incluso de la recarga mejorada, es inviable. Esto puede deberse a la compactación y hundimiento de los acuíferos, o a que el rellenado natural de los acuíferos sería imposible debido al largo tiempo que se necesitaría, por no hablar de los recursos hídricos externos necesarios para rellenarlos artificialmente.

El agotamiento incesante de las aguas subterráneas en las áreas agrícolas se está convirtiendo en un problema cada vez más preocupante a nivel regional y mundial, ya que amenaza con socavar la seguridad alimentaria, el abastecimiento básico de agua, la integridad del medio ambiente y la capacidad de recuperación del clima. Este enojoso asunto ve un progreso limitado, que requiere una mayor capacidad de gestión y gobernanza en múltiples niveles integrados y en enfoques intersectoriales (OCDE, 2016) (véanse los capítulos 2, 11 y 12).

Los modelos de aguas subterráneas que incorporan los cambios en el uso del suelo y las estimaciones de las extracciones y la recarga se utilizan para hacer un seguimiento del agotamiento de las aguas subterráneas (Konikow, 2013). La verificación de la escala y la magnitud de las tendencias de agotamiento mediante la teledetección por medio del seguimiento de los cambios de almacenamiento de agua en la corteza terrestre, a través de la misión satelital Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) de la NASA, sigue siendo un reto (Famiglietti, 2014). Esto se debe, en gran medida, a la resolución gruesa de las anomalías gravitatorias utilizadas para inferir los cambios en el almacenamiento de agua (Vishwakarma et al., 2021). Las estimaciones modelizadas sugieren que, entre 2000 y 2009, el agotamiento global de las aguas subterráneas para todos los usos fue del orden de 113 km³/año (Döll et al., 2014), mientras que

Cuadro 3.1 Agotamiento de las aguas subterráneas en Egipto

Un avance notable en la última década es la proliferación de pozos de sondeo de gran capacidad y eficiencia, capaces de acceder a aguas subterráneas a cientos de metros de profundidad. Egipto comenzó el desarrollo intensivo de las aguas subterráneas para la irrigación en la década de 1960 a través del proyecto New Valley, aprovechando los recursos de aguas subterráneas no renovables del sistema acuífero de arenisca de Nubia en el desierto occidental del país (Powell y Fensham, 2016). Los proyectos y planes posteriores han acelerado el ritmo de expansión de la irrigación abastecida por la extracción intensiva de agua subterránea. Por ejemplo, el proyecto de Desarrollo del Sur de Egipto, 1997-2017, incluía la creación de 216 000 ha de área de irrigación en el área de Toshka, en el sureste del Desierto Occidental. El proyecto utilizaba agua superficial del río Nilo. Entre 1997 y 2006, el nivel de las aguas subterráneas descendió hasta 13,8 m en algunas partes del acuífero. Se prevé que los nuevos planes de irrigación de otras 10 500 hectáreas únicamente con aguas subterráneas a través de 50 pozos de sondeo provoquen un nuevo descenso de los niveles de las aguas subterráneas en 15 m (Sharaky et al., 2018). Las expresiones superficiales críticas del acuífero, en términos de manantiales y oasis artesanales del desierto, que han servido de apoyo a antiguas civilizaciones y medios de vida, se ven ahora comprometidas como resultado de esta intensificación del uso del agua y de la tierra (Powell y Fensham, 2016).

otros modelos sugieren volúmenes del orden de 304 km³/año para 2010, de los cuales aproximadamente el 75 % se atribuyó a la agricultura (Dalin et al., 2017; Wada, 2016). En la práctica, la cuantificación del agotamiento del almacenamiento de los acuíferos a escala global sigue siendo conjetural, ya que las condiciones de límite, recarga y fuga siguen siendo dinámicas e inciertas. Sin embargo, los modelos incluyen cada vez más las cabezas piezométricas medidas como un valioso indicador de los cambios en el almacenamiento, lo que proporciona más certeza en las estimaciones del agotamiento de los acuíferos locales y regionales (Haacker et al., 2016).

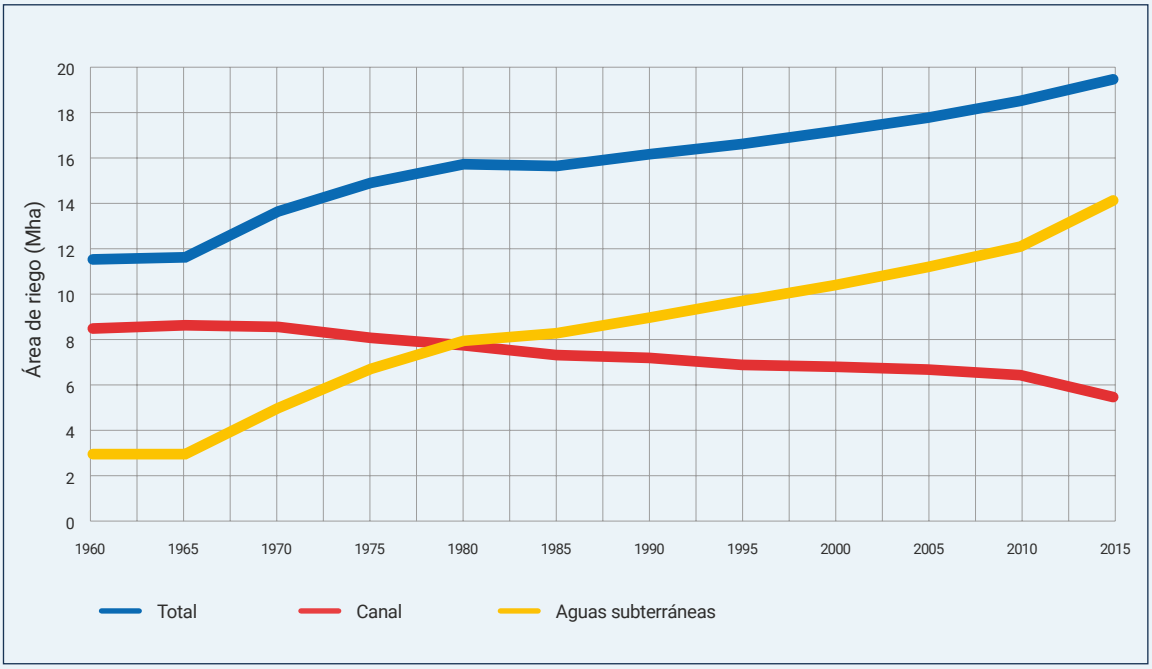
Cada vez se reconoce más que el agua virtual incorporada a los productos agrícolas y su redistribución global a través del comercio internacional es fundamental para comprender y gestionar los niveles de extracción de agua sostenible a nivel mundial (capítulo 1). Se estima que alrededor del 11 % (o 25 km³/año) del agotamiento de las aguas subterráneas a nivel mundial está integrado en el comercio internacional de cultivos (Dalin et al., 2017), apoyando la seguridad alimentaria y el crecimiento económico, pero también contribuyendo significativamente al agotamiento a gran escala de los acuíferos superpuestos por las tierras productivas. El trigo, el maíz, el arroz, la caña de azúcar, el algodón y los forrajes son los principales cultivos que contribuyen al agotamiento de las aguas subterráneas. Estos cultivos también son objeto de un intenso comercio, lo que indica una huella hídrica muy insostenible[10] (de la que las aguas subterráneas constituyen una gran parte) debido a la exportación intensiva de cultivos para el consumo de alimentos, forraje y fibra por parte de los seres humanos y el ganado. (Mekonnen y Gerbens-Leenes, 2020). Cinco países representan alrededor del 70 % de la huella hídrica insostenible: China, India, Irán, Pakistán y Estados Unidos. Del total de la huella hídrica insostenible, el 90 % corresponde a cultivos alimentarios y forrajeros, mientras que el 10 % corresponde a cultivos de fibras, caucho y tabaco (Mekonnen y Gerbens-Leenes, 2020).

[10] La huella hídrica se considera "insostenible" si está por encima del agua azul renovable disponible y viola los requisitos de flujo ambiental (Mekonnen y Gerbens-Leenes, 2020).

Cuadro 3.2 Tierras agrícolas de regadío con agua superficial y capa freática poco profunda: el caso del Pakistán

El acuífero de la cuenca del Indo en el Pakistán tiene almacenado al menos ochenta veces el volumen de agua dulce que contienen las tres mayores presas del país. Sin embargo, el país está al borde de una grave crisis de aguas subterráneas (Lytton et al., 2021). El Pakistán es el cuarto mayor usuario de aguas subterráneas, responsable en 2010 del 6,6 %, y en 2017 del 6,4 % de la extracción mundial de aguas subterráneas (Margat y Van der Gun, 2013; Aquastat, s.f.), mientras que ocupa el 4,6 % del área total regada con aguas subterráneas del mundo (Bhutta y Smedema, 2007). El uso extensivo de las aguas subterráneas en el país comenzó en la década de 1960, cuando se instalaron grandes pozos de drenaje en el marco de los Proyectos de Control y Recuperación de la Salinidad (SCARP), financiados por el gobierno, para controlar los problemas de anegamiento y salinidad en 2,6 Mha de las tierras de regadío, especialmente en la provincia de Punjab (Qureshi, 2020). Con el tiempo, los agricultores adoptaron cada vez más el uso de aguas subterráneas poco profundas como forma de ampliar las áreas de regadío, la producción de cultivos y los ingresos, al tiempo que hacían frente a las sequías. Un acceso más seguro al agua contribuyó a aumentar el rendimiento de los cultivos entre un 50 % y un 100 %. En 1980, el área regada con aguas subterráneas había superado a la superficie regada con aguas superficiales (véase el gráfico siguiente), mientras que una parte importante de las tierras cultivadas se riegan de hecho de forma conjunta, combinando ambas, en parte para controlar la salinidad generalmente más alta de las aguas subterráneas. En resumen, el Pakistán ha pasado en un periodo de 60 años de ser un país dependiente de las aguas superficiales a ser un país dependiente de las aguas subterráneas, y de ser un país excedentario en aguas subterráneas a ser un país con importantes problemas de sobreexplotación de las aguas subterráneas, agravados por los crecientes problemas de salinidad debidos al uso de aguas subterráneas de mala calidad para la irrigación. Aproximadamente el 21 % del área de irrigación está afectada por la salinidad, lo que amenaza la seguridad alimentaria del país, ya que las tierras de irrigación son responsables de más del 90 % de su producción total de cereales (Qureshi, 2020).

Evolución histórica de las áreas regadas con aguas subterráneas y superficiales en el Pakistán



Fuente: Qureshi (2020, fig. 4, p. 6).

3.4 Tierras agrícolas con capas freáticas poco profundas

Las capas freáticas poco profundas pueden presentar tanto oportunidades como limitaciones para el cultivo. Por un lado, las capas freáticas poco profundas pueden ser problemáticas para la agricultura debido al riesgo de anegamiento resultante de las lluvias o de la irrigación en áreas con un drenaje natural o artificial inadecuado. Esto puede conducir a una salinización progresiva del suelo, especialmente en las regiones secas. Por otro lado, las capas freáticas controladas y poco profundas pueden ser favorables para la agricultura, ya que garantizan la disponibilidad continua de agua para optimizar el rendimiento de los cultivos, incluso durante periodos secos prolongados. Los pequeños agricultores de toda África y Asia dependen de las aguas subterráneas estacionales y perennes para sus cultivos (Pavelic et al., 2013; Pavelic et al., 2012; Shah, 2009).

Mientras que la mayoría de las áreas áridas y semiáridas habitadas del mundo, incluidas las áreas que solían tener una buena dotación de agua (cuadro 3.2), están experimentando un agotamiento de las aguas subterráneas en la actualidad, las pruebas muestran que otras regiones, por ejemplo el norte de Europa, bajo los escenarios climáticos actuales se enfrentan a una acumulación neta de aguas subterráneas, estacionalmente o durante varios años, a través de periodos más largos de precipitaciones sostenidas superiores a las normales, lo que puede conducir a anegamientos e inundaciones. Esto puede provocar importantes problemas para la agricultura y exige una gestión proactiva de las aguas subterráneas poco profundas, como en el Reino Unido (Macdonald et al., 2008). Los Países Bajos son naturalmente propensos a las inundaciones y gestionan constantemente los niveles de agua subterránea mediante el drenaje y el bombeo artificial (Zeeberg, 2009). En amplias zonas de los Países Bajos, las capas freáticas poco profundas han sido controladas artificialmente durante siglos, manteniendo las capas freáticas cerca de los niveles óptimos para los cultivos y la vegetación. Del mismo modo, otros países de baja altitud, como Dinamarca, dependen de un extenso drenaje artificial de baldosas subterráneas en regiones con suelos arcillosos, que controla los niveles de agua subterránea y mantiene las condiciones del suelo y de los cultivos viables, al tiempo que protege las infraestructuras, incluidas las carreteras (Kidmose et al., 2013).

3.5 Impacto de la agricultura en la calidad de las aguas subterráneas

3.5.1 Impacto de la agricultura en la calidad de las aguas subterráneas

Se estima que la contaminación agrícola ha superado a la contaminación de los asentamientos y las industrias como el principal factor de degradación de las aguas interiores y costeras (FAO, 2018a). Los principales contaminantes procedentes de la agricultura son los nutrientes, los pesticidas, las sales, los sedimentos, el carbono orgánico, los patógenos, los metales y los residuos de medicamentos. El nitrato, procedente de los fertilizantes químicos y orgánicos, es el contaminante antropogénico más prevalente en las aguas subterráneas a nivel mundial (FAO, 2018a), lo que conduce notablemente a la eutrofización de las aguas superficiales (Smolders et al., 2010). En la Unión Europea, el 38 % de las masas de agua están sometidas a una presión significativa por la contaminación agrícola (WWAP, 2015); en los Estados Unidos, la agricultura es la principal fuente de contaminación de los ríos; y en China, la agricultura es responsable de una gran proporción de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por nitrógeno (FAO, 2013).

Los tipos de plaguicidas que se utilizan habitualmente en la agricultura son insecticidas, herbicidas y fungicidas (Schreinemachers y Tipraqsa, 2012). Cuando se aplican o eliminan de forma inadecuada, pueden contaminar el suelo y los recursos hídricos con carcinógenos y otras sustancias tóxicas, mientras que sus productos de degradación pueden ser peligrosos para la biosfera terrestre y acuática, así como para la salud humana (Tang et al., 2021; Sharma et al., 2019). El mercado mundial de plaguicidas tiene un valor de más de 35 000 millones de dólares al año (FAO, 2018a). La contaminación con microcontaminantes orgánicos, como los plaguicidas, en las áreas agrícolas

Los datos sugieren que las leyes y reglamentos para prevenir o limitar la contaminación difusa de las aguas subterráneas procedente de la agricultura, y especialmente su aplicación, son generalmente débiles

está menos documentada en las economías emergentes. Sin embargo, en los casos en los que se han investigado estas cuestiones en entornos socioeconómicos vulnerables con agricultura intensiva, los resultados han mostrado la presencia de contaminantes en concentraciones excesivas (Wentworth et al., 2021), lo que indica un peligro emergente para el medio ambiente y la salud de importancia crítica.

La acumulación excesiva de sal en las aguas subterráneas a través del drenaje salobre y la intrusión de agua de mar (Mateo-Sagasta y Burke, 2010) ha aumentado con la expansión de la irrigación, exacerbada aún más por el cambio climático. La irrigación puede movilizar las sales acumuladas en los suelos de las tierras secas, que luego son transportadas por el agua de drenaje a los acuíferos y otras masas de agua receptoras (FAO, 2018a). Se han notificado importantes problemas de salinidad del agua en tierras agrícolas en la Argentina, Australia, China, la India, el Pakistán, el Sudán, los Estados Unidos y muchos países de Asia Central (FAO, 2018a; Shahid et al., 2018; Thorslund y Van Vliet, 2020). Las estimaciones indican que entre el 20-23 % y el 25-33 % del área mundial de tierra cultivada y de irrigación, respectivamente, son salinas y se ven obstaculizadas en términos de productividad agrícola (Shahid et al., 2018; Jamil et al., 2011), principalmente en las regiones áridas y semiáridas. El uso de antibióticos para la ganadería intensiva ha aumentado con la creciente demanda mundial de carne (Manyi-Loh et al., 2018). En gran medida no está regulado en los países en desarrollo, siendo China el principal productor y consumidor registrado de antibióticos dentro de la ganadería (Maron et al., 2013). Aunque los antibióticos protegen a los animales de las infecciones, también generan bacterias resistentes a los antibióticos que pueden ser patógenas para los humanos y que son muy difíciles de tratar (Prestinaci et al., 2015). Suelen transmitirse al medio ambiente, incluidas las aguas subterráneas, a través de los residuos animales. Se ha documentado una prevalencia generalizada de bacterias resistentes a los antibióticos a nivel mundial (Manyi-Loh et al., 2018), y se ha informado de la contaminación de las aguas subterráneas en China (Xiao et al., 2016), Kenya (Wahome, 2013), Sudáfrica (Carstens, 2013) y los Estados Unidos (Li et al., 2015).

3.5.2 Impactos económicos, sanitarios y medioambientales

Se calcula que los costes ambientales y sociales mundiales de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas derivada de la agricultura superan los miles de millones de dólares anuales (OCDE, 2012a). En los Estados Unidos, se calcula que la contaminación por plaguicidas de las aguas subterráneas y la eutrofización del agua dulce tienen un coste de entre 1 600 y 2 200 millones de dólares al año, respectivamente (Pimentel, 2005; Dodds et al., 2009). El coste anual global de la degradación de la tierra inducida por la sal en las áreas de irrigación se estima en 27 300 millones de dólares por la pérdida de producción de cultivos (Qadir et al., 2014).

La contaminación de las aguas subterráneas procedente de la agricultura tiene efectos negativos directos sobre la salud humana. Por ejemplo, los niveles elevados de nitratos en el agua pueden provocar metahemoglobinemia (síndrome del bebé azul) en los bebés (Majumdar, 2003; Knobeloch et al., 2000). Mientras que las normas de calidad del agua para los contaminantes suelen ser más estrictas en cuanto a la protección de la salud humana que del medio ambiente, el nitrato es un ejemplo en el que los niveles requeridos para proteger las masas de agua de la eutrofización son más bajos que para la metahemoglobinemia (Hinsby et al., 2008). La acumulación de plaguicidas en el agua y en la cadena alimentaria, con efectos nocivos demostrados en los ecosistemas y en la salud humana, llevó al Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes a prohibir determinados plaguicidas persistentes (como el DDT y muchos organofosforados) en 2001 (Tang, 2013). Sin embargo, varios plaguicidas prohibidos se siguen utilizando en los países menos desarrollados, causando efectos agudos y probablemente crónicos en la salud (Ngowi et al., 2012).

3.5.3 Control de la contaminación en el sector agrícola

Los datos sugieren que las leyes y reglamentos para prevenir o limitar la contaminación difusa de las aguas subterráneas procedente de la agricultura, y especialmente su aplicación, son generalmente débiles (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a). Se ha avanzado más en la legislación y la regulación de las aguas subterráneas que en su aplicación y cumplimiento efectivos, lo que representa un obstáculo importante para la gestión sostenible de las aguas subterráneas. En muchos países, las regulaciones son deficientes o el incumplimiento es generalizado, y la contaminación de las aguas subterráneas continúa en gran medida sin control. Los intentos de regular la contaminación difusa mediante multas por contaminación no han funcionado, ya que es difícil identificar a los contaminadores (OCDE, 2017a). Cada vez se emplean más instrumentos económicos para controlar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Entre ellos se encuentran los impuestos, la "retirada de tierras" (la conversión de terrenos agrícolas a usos naturales) y los pagos para limitar la producción o la intensidad del uso de la tierra. Los impuestos incluyen el pago de los contaminadores, los impuestos ambientales específicos y los impuestos sobre las tecnologías, productos e insumos que tienen consecuencias ecológicas adversas (por ejemplo, los pesticidas), según el nivel de peligro, o, a la inversa, las subvenciones a las tecnologías respetuosas con el medio ambiente. Los enfoques conocidos para reducir la contaminación, como los "principios de quien contamina paga" son posibles, a través de impuestos verdes sobre los pesticidas y fertilizantes, por ejemplo, pero no se aplican a menudo, tienen un precio demasiado bajo para actuar como disuasión, o tienen impactos distributivos no deseados, ya que los agricultores pobres se verán más afectados por esos impuestos (OCDE, 2011; 2017a).

Cuadro 3.3 Energía e irrigación en el África Subsahariana

El África Subsahariana se caracteriza por su escasa infraestructura energética y sus bajos niveles de acceso a la electricidad, que se correlacionan con los bajos niveles de desarrollo agrícola, incluido el desarrollo de las aguas subterráneas. En marcado contraste, el continente tiene uno de los niveles más altos a nivel mundial de disponibilidad de energía solar (AIE, 2019a). La agricultura es en gran parte de secano, pero como resultado del crecimiento de la población y el cambio climático, existe una clara necesidad de ampliar la producción de alimentos para garantizar la seguridad alimentaria y aumentar la resiliencia. Los recursos hídricos subterráneos en toda la región están generalmente infrautilizados, por lo que existe un gran potencial para ampliar de forma sostenible la agricultura de regadío a pequeña escala si se pueden superar las limitaciones de asequibilidad y de otro tipo (Altchenko y Villholth, 2015). El coste de los SPIS a pequeña escala se ha reducido considerablemente en los últimos años y están empezando a entrar en el mercado, sobre todo en África Oriental, donde los distribuidores y las cadenas de abastecimiento están mejor desarrollados (Efficiency for Access, 2019). Las bombas accionadas por diésel son más baratas de comprar, pero más costosas de hacer funcionar que los dispositivos de energía solar, y generan altas emisiones de gases de efecto invernadero. Se prevé que la combinación de abastecimiento de energía para las bombas pequeñas en toda la región dependerá de factores como la elección de los cultivos por parte de los agricultores y el precio futuro del diésel y las tecnologías solares adecuadas (Xie et al., 2021). Con el aumento de la demanda, será necesario mejorar la gobernanza y la cogestión de las aguas subterráneas y la energía para garantizar un uso sostenible de los recursos.

Se considera que una combinación de medidas de control de la contaminación, incluyendo la regulación, los incentivos económicos, así como la información, las campañas de concienciación y la divulgación de datos, funciona con mayor eficacia que las regulaciones por sí solas (OCDE, 2008). Las políticas que abordan la contaminación del agua en la agricultura deberían formar parte de un marco global de política agrícola y del agua a escala nacional, de cuenca hidrográfica y de acuífero. Las políticas para promover la información y la concienciación para cambiar el comportamiento de los agricultores e incentivar la adopción de las mejores prácticas de gestión (FAO, 2018a) para la agricultura son importantes para prevenir la contaminación en la fuente (Liu et al., 2018). Por ejemplo, la evaluación comparativa puede promover un cambio de comportamiento entre los agricultores al mostrarles cómo se desempeñan en comparación con otros agricultores, en términos de aplicación de fertilizantes y pesticidas. También se aboga por promover la responsabilidad social de las empresas dentro del sector privado (FAO, 2018a).

3.6 Vínculos entre las aguas subterráneas y la energía en la irrigación

La extracción de aguas subterráneas y el uso de la energía están estrechamente relacionados. La electrificación rural ha sido uno de los principales motores del desarrollo de las aguas subterráneas en la India (Shah, 2009; Smith y Urpelainen, 2016). La concentración del desarrollo de las aguas subterráneas es notable cuando las redes eléctricas rurales se extienden a áreas que, de otro modo, dependerían de la generación de diésel o de la energía eólica, como se evidencia en Etiopía, Kenya y Sudáfrica (Villholth, 2013a). A la inversa, las empresas de suministro eléctrico pueden enfrentarse a importantes pérdidas de ingresos cuando el descenso de los niveles de aguas subterráneas y el aumento de los costes de irrigación conducen a una disminución del bombeo, como se ha puesto de manifiesto en el centro de los Estados Unidos (Rhodes y Wheeler, 1996).

Los avances en la tecnología solar han sido testigos del desarrollo de Sistemas de Irrigación con Energía Solar (SPIS), adoptados a escala para dar servicio a las operaciones agrícolas. Estos van desde operaciones comerciales a gran escala, por ejemplo, en Australia, hasta pequeños agricultores en áreas con aguas subterráneas relativamente poco profundas, especialmente en lugares remotos que producen cultivos de alto valor, como en el Afganistán (FAO, 2018b). La proliferación de los SPIS, ya sea como soluciones conectadas a la red o fuera de ella, puede atribuirse a la disminución del costo de los paneles solares en la última década, además de los programas de subsidios gubernamentales, que han hecho de esta tecnología una opción viable, en particular para los pequeños agricultores (FAO, 2018b). Los SPIS proporcionan energía fiable, asequible y climáticamente inteligente para la irrigación (cuadro 3.3). Sin embargo, existe el riesgo de un uso insostenible del agua si la implementación de los SPIS no se gestiona y regula adecuadamente (FAO, 2018b). Una vez instalados los sistemas, no hay coste por unidad de energía y, por tanto, no hay incentivo financiero para que los agricultores ahorren electricidad para el bombeo de aguas subterráneas. Por lo tanto, los SPIS pueden conducir a una extracción excesiva de aguas subterráneas, y a una baja eficiencia de aplicación en el campo. En algunos casos, los agricultores venden agua a sus vecinos con un beneficio, lo que aumenta las extracciones generales de aguas subterráneas (FAO, 2018b; Closas y Rap, 2017). La relación entre los subsidios energéticos y el bombeo de aguas subterráneas para la irrigación están bien establecidos, por ejemplo, con evidencia de la India (Scott y Sharma, 2010) (cuadro 3.4), Irán (Jamali Jaghdani y Kvartiuk, 2021) y México (Scott, 2013).

Cuadro 3.4 Aguas subterráneas y energía en la India

La India es el mayor usuario de aguas subterráneas del mundo. Tiene un calado anual de unos 251 km³, el 89 % del cual se utiliza para la irrigación (Margat y Van der Gun, 2013 – figura 3.1), extraído a través de unos 20 millones de pozos y pozos tubulares. Se calcula que el 60 % del área de regadío de la India se abastece de aguas subterráneas (Shah, 2009). La irrigación basada en aguas subterráneas fue fundamental para el éxito de la Revolución Verde en la India a partir de la década de 1960. Sin embargo, se ha puesto de manifiesto que el aumento de la producción agrícola de regadío ha conducido progresivamente a un importante descenso de los niveles de agua subterránea en algunas partes del país, especialmente en el noroeste y el sur peninsular de la India (Shah, 2009). En la actualidad, la crisis del agua en la India puede atribuirse en gran medida a la expansión de la irrigación de aguas subterráneas, una trayectoria marcada por la política alimentaria y de electricidad de la India desde finales de la década de 1970. La política alimentaria que garantiza alimentos baratos a los consumidores dicta la necesidad de mantener bajos los precios de los insumos, incluido el nivel de las tarifas eléctricas para el bombeo de aguas subterráneas. La reducción de las tarifas eléctricas o la gratuidad de la electricidad para la agricultura, como existe en muchos estados indios, junto con la garantía de compra de cultivos por parte del Estado o del gobierno, animan a los agricultores a cultivar cosechas intensivas en agua, como la caña de azúcar, incluso en regiones semiáridas con escasa recarga natural. Esto es responsable de un agotamiento sin precedentes de las aguas subterráneas en amplias zonas de la India (Mukherji, 2020).

La extracción excesiva de aguas subterráneas en la India se debe a la falta de coherencia entre las políticas de agua, energía y alimentos. Por lo tanto, las soluciones a los problemas de las aguas subterráneas de la India deben situarse en un contexto más amplio del nexo agua-energía-alimentación (Shah et al., 2012). En muchos estados de la India se ha intentado la gestión indirecta de las aguas subterráneas a través de políticas eléctricas. Esto ha ido desde la medición de las conexiones eléctricas agrícolas y el cobro a los agricultores de tarifas casi comerciales para la irrigación (por ejemplo, en el estado de Bengala Occidental - Mukherji et al., 2009); hasta el racionamiento de la electricidad a los agricultores a un número limitado de horas en un día, hecho posible por la bifurcación de los alimentadores eléctricos en alimentadores agrícolas y domésticos (por ejemplo, en los estados de Gujarat, Karnataka y Punjab - Shah et al., 2008; Mukherji, 2017).

Ambas medidas, la tarificación y el racionamiento de la electricidad, pretenden reducir la demanda de agua subterránea dando señales de precio y escasez, respectivamente (Sidhu et al., 2020). Más recientemente, la preocupación por las elevadas emisiones de carbono derivadas del bombeo de aguas subterráneas en la India y por la creciente carga de subvenciones que soportan las utilidades de la electricidad, ha llevado a poner en marcha proyectos piloto de Sistemas de Irrigación por Energía Solar (SPIS). Los SPIS conectados a la red se promueven para incentivar a los agricultores a bombear menos agua subterránea mientras venden la electricidad a la red en lugar de usarla para bombear agua subterránea (Shah et al., 2018), pero todavía no hay pruebas de si los SPIS conectados a la red realmente reducen el bombeo de agua subterránea. Las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del bombeo de aguas subterráneas en relación con el total de las emisiones nacionales derivadas del uso de la energía van desde el 0,5 % en China (Wang et al., 2012) y el 3,6 % en México (Scott, 2013) hasta el 8-11 % en la India (Rajan et al., 2020). Para agravar la situación, el metano incrustado en las aguas subterráneas anóxicas profundas, liberado a medida que las aguas subterráneas se bombean a la superficie, también puede sumarse a este presupuesto (Kulongoski y McMahon, 2019).

Capítulo 4

Aguas subterráneas para los asentamientos humanos

IWA
Stephen Foster

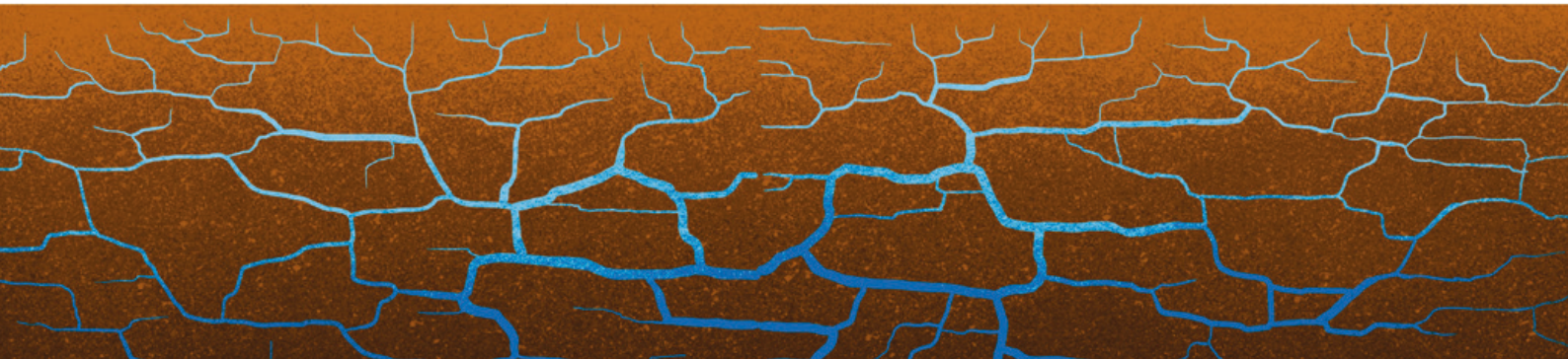
UN-Hábitat
Pireh Otieno

RWSN*
Kerstin Danert

AIH
Alan MacDonald**

* Ask for Water GmbH en nombre de la Red Rural de Abastecimiento de Agua (RWSN).

** Afiliado al British Geological Survey.



4.1 Introducción

4.1.1 Alcance del tema

El capítulo ofrece una visión general del abastecimiento de agua subterránea para usos domésticos (incluida el agua potable) en entornos urbanos y rurales, y está íntimamente relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 3 y 6 de las Naciones Unidas para 2030. El abastecimiento de agua puede ser proporcionado por empresas de servicios públicos, operadores comerciales, hogares individuales y organizaciones comunitarias. Aunque la mayor parte del agua urbana suele ser suministrada por las empresas de servicios públicos, el autoabastecimiento urbano privado a partir de aguas subterráneas ha crecido notablemente en muchas ciudades de países en desarrollo. El papel de las aguas subterráneas en el abastecimiento de agua en las zonas rurales es otro de los puntos principales del capítulo, en el que se señala que los pozos[11] de agua son a menudo la única fuente fiable de agua potable en las aldeas durante todo el año. El capítulo también examina los peligros del uso de las aguas subterráneas y el problema de la contaminación de las aguas subterráneas debido a un saneamiento urbano y rural inadecuado.

4.1.2 Breve evolución histórica

Desde los primeros tiempos, la humanidad ha satisfecho su necesidad de agua de buena calidad a partir de fuentes subterráneas (Margat y Van der Gun, 2013). Los manantiales, la manifestación superficial de las aguas subterráneas, desempeñaron un papel fundamental en el desarrollo social, y los primeros pozos de agua se hundieron inicialmente en partes de Asia, Oriente Medio y Etiopía a profundidades de hasta 50 metros.

Durante el siglo XX se produjo un gran auge en la construcción de pozos de agua para el abastecimiento urbano. Los grandes avances en la perforación de pozos de agua, la tecnología de bombeo, el acceso a la energía y los conocimientos geológicos permitieron una perforación más rápida de pozos profundos y la extracción de mayores cantidades de agua. Los pozos poco profundos, instalados con tecnología asequible y equipados con bombas manuales, se desarrollaron para el abastecimiento comunitario en áreas rurales. Las aguas subterráneas se convirtieron así en un recurso natural clave para el bienestar humano y el desarrollo económico, pero que seguía siendo ampliamente incomprendido, infravalorado, mal gestionado e inadecuadamente protegido (AIH, 2015).

4.1.3 Datos sobre la extracción de aguas subterráneas

Se calcula que las extracciones mundiales de agua subterránea superaron los 900 km³/año en 2010, y que los pozos y manantiales proporcionan alrededor del 36 % del abastecimiento de agua potable (Döll et al., 2012; Margat y Van der Gun, 2013). La dependencia de las aguas subterráneas de innumerables ciudades parece intensificarse, de manera que se cree que casi el 50 % de la población urbana mundial se abastece hoy en día de fuentes de agua subterránea (Foster et al., 2020a). En el caso de la Unión Europea (UE) y los Estados Unidos, las aguas subterráneas proporcionan el abastecimiento público de agua a 310 y 105 millones de personas, respectivamente. Sin embargo, las estadísticas nacionales completas sobre el bombeo de aguas subterráneas para los asentamientos humanos son irregulares (tabla 4.1).

El valor social de las aguas subterráneas no debe medirse únicamente por las extracciones volumétricas. Esto se debe a que el uso de las aguas subterráneas aporta importantes beneficios económicos y sanitarios, posibilidades de escalar la demanda, alta fiabilidad en caso de sequía, generalmente buena calidad que requiere un tratamiento mínimo (AIH, 2015), y el tiempo que ahorran las mujeres y las niñas en los lugares donde son las principales encargadas de recoger el agua. Sin embargo, las altísimas tasas de crecimiento de la población urbana están generando una demanda de abastecimiento de agua y saneamiento sin precedentes, lo que supone un enorme reto para la planificación urbana.

[11] El término pozo de agua se utiliza aquí de forma genérica para abarcar todas las formas de pozos excavados, pozos, pozos de sondeo, pozos entubados, galerías y pozos de sondeo utilizados para la extracción de agua.

Tabla 4.1 Datos de países seleccionados sobre la extracción de aguas subterráneas urbanas

País	Población (millones)	Población urbana (millones)	Suministro de agua de utilidad (Mm^3/año)	Suministro de agua subterránea de utilidad (Mm^3/año) y proporción	Ciudades seleccionadas con mayor uso de agua subterránea
Brasil	209,3	178,2	16 740 **	3 164 (19 %)	Natal, Ribeirão Preto, São Luís do Maranhão
Chile	16,4	14,7	1 267	498 (39 %)	Santiago, Coquimbo, Concepción
Costa Rica	4,9	4,0	652	522 (80 %)	San José, Puntarenas, Liberia
México	129,2	102,1	14 230 *	7 000 (49 %)	Ciudad de México, Mérida, San Luis Potosí, León
Paraguay	6,4	3,9	362 *	272 (75 %)	Asunción, Villarica
Estados Unidos	324,5	270,7	58 390 *	21 001 (36 %)	Miami, Tampa, Phoenix, Oklahoma
Côte d'Ivoire	24,3	12,2	321 **	?	Abiyán, Bouaké
Etiopía	105,0	21,3	810 *	?	Addis Abeba, Dire Dawa
Kenya	49,7	13,2	495 **	?	Mombasa, Nakuru
Senegal	15,9	7,4	98 *	?	Dakar, San Luis
Tanzanía	42,9	9,9	328 **	?	Dodoma, Arusha, Tanga
Zambia	17,1	7,3	290 **	60 (21 %)	Lusaka, Kabwe
India	1339,2	455,3	56 000 **	13 328 (24 %)	Lucknow, Chennai, Chandigarh, Indore
Pakistán	197,0	70,9	9 650 **	2 934 (30 %)	Islamabad, Lahore, Rawalpindi, Multan
China	1409,5	817,5	79 400 *	7861 (10 %)	Tianjin, Beijing, Handan, Shenyang
Indonesia	964,0	145,2	23 800 **	21 420 (90 %)	Yakarta, Semarang, Yogyakarta
Viet Nam	95,5	33,4	1 206 *	555 (46 %)	Ciudad de Ho Chi Minh, Da Nang, Hanoi
Bangladesh	164,7	59,3	3 600 **	2 603 (72 %)	Dhaka, Khulna, Chattogram
Dinamarca	5,8	5,1	230	230 (100 %)	Copenhague, Odense, Aarhus, Aalborg
Francia	67,0	53,9	1 774	1 064 (60 %)	París, Caen, Limoges, Le Mans, Poitiers
Alemania	83,1	64,1	1 606	1 188 (74 %)	Hamburgo, Berlín, Múnich, Hannover
Hungría	9,7	7,0	257	244 (95 %)	Budapest, Miskolc
Italia	60,3	42,6	1 391	1 210 (87 %)	Roma, Milán, Turín, Perugia
Países Bajos	17,4	15,8	489	298 (61 %)	Utrecht, Eindhoven, La Haya
Polonia	37,2	22,8	576	357 (62 %)	Varsovia, Wrocław, Poznań, Cracovia
Reino Unido	66,8	55,5	3 558	1 245 (35 %)	Portsmouth, Hull, Cambridge, Brighton

Nota: ** / * el autoabastecimiento privado de aguas subterráneas es un problema importante o significativo, respectivamente.

Fuente: Basado en gran medida en los datos de UNICEF/OMS (2019) para 2017, que a menudo subestiman la extracción de aguas subterráneas y no proporcionan datos sobre el uso privado de pozos de agua *in situ*.

4.2 Abastecimiento de agua urbana

4.2.1 Sistemas públicos

Las aguas subterráneas presentan numerosas ventajas como base para el desarrollo del abastecimiento de agua por parte de las utilidades públicas (tabla 4.2), con su calidad natural típicamente alta que solo requiere una desinfección de precaución antes de entrar en los sistemas de distribución (cuadro 4.1).

Los centros urbanos subyacentes y/o rodeados por acuíferos de alto rendimiento suelen tener mejores niveles de servicio público de agua y precios de agua más bajos —debido al potencial de ampliar la producción de abastecimiento de agua de forma incremental en respuesta a la creciente demanda a un costo modesto (AIH, 2015)—. Por lo tanto, la mayoría de los asentamientos ubicados en entornos hidrogeológicos favorables tendrán inicialmente una dependencia significativa de las aguas subterráneas para su abastecimiento de agua (figura 4.1) y una seguridad de abastecimiento de agua significativamente mayor durante sequías prolongadas o incidentes de contaminación de aguas superficiales (Foster et al., 2018).

Tabla 4.2 Resumen de los beneficios de las fuentes de agua subterránea para las empresas de servicios de agua

Activos de aguas subterránea	Beneficios del abastecimiento de agua
• Distribución generalizada, con acceso directo en muchos distritos periféricos • La calidad natural es generalmente excelente y requiere un tratamiento mínimo (excepto cuando se ve afectada por la contaminación antropogénica o por la contaminación natural - Foster et al., 2020b)	• El desarrollo suele implicar poco capital y pocos costes recurrentes (excepto en algunos entornos hidrogeológicos), que pueden escalonarse en casos de aumento de la demanda
• Enormes depósitos naturales que pueden utilizarse para el almacenamiento de agua a largo plazo • Amortiguan la variabilidad de las lluvias, a diferencia de las fuentes de agua superficiales	• Alto nivel de seguridad en el abastecimiento de agua en episodios de sequía y contaminación fluvial

Fuente : Foster et al. (2020a).

Cuadro 4.1 Un ejemplo de gestión exitosa de la extracción de aguas subterráneas urbanas en Hamburgo (Alemania)

Hamburgo tiene una población de unos 2,2 millones de habitantes a los que abastece una utilidad municipal de agua. En 1964, tras una larga transición, cambió el agua de río filtrada por el agua subterránea para su abastecimiento. En la actualidad, explota unos 470 pozos de agua que bombean unos 120 millones de m³/año del acuífero aluvial poco profundo y de una formación más profunda. Nueve de las áreas de captación correspondientes tienen el estatus legal de zonas de protección de aguas subterráneas, pero tres están situadas fuera de la jurisdicción de la ciudad y su protección tiene que negociarse con las autoridades vecinas. En algunos casos, han surgido conflictos, ya que el acuífero poco profundo es vulnerable a la contaminación agrícola e industrial, mientras que el acuífero más profundo está amenazado por la salinización procedente de los domos salinos adyacentes.

La utilidad del agua mantiene su propia red de unos 1 400 pozos de control, que proporcionan una imagen completa y dinámica de la calidad de las aguas subterráneas. Los datos se almacenan en un sistema de información digital, que también contiene datos sobre el nivel de las aguas subterráneas. En colaboración con la agencia geológica gubernamental, se ha elaborado un modelo numérico de aguas subterráneas que cubre 4 500 km² con más de 3 000 pozos de producción y se ha calibrado con más de 7 000 sondeos de control. Se utiliza para la toma de decisiones de gestión de los pozos, las solicitudes de derechos de agua, la interacción con la extracción de aguas subterráneas industriales, el perfeccionamiento de las áreas de protección de las aguas subterráneas y el control de cualquier contaminación grave.

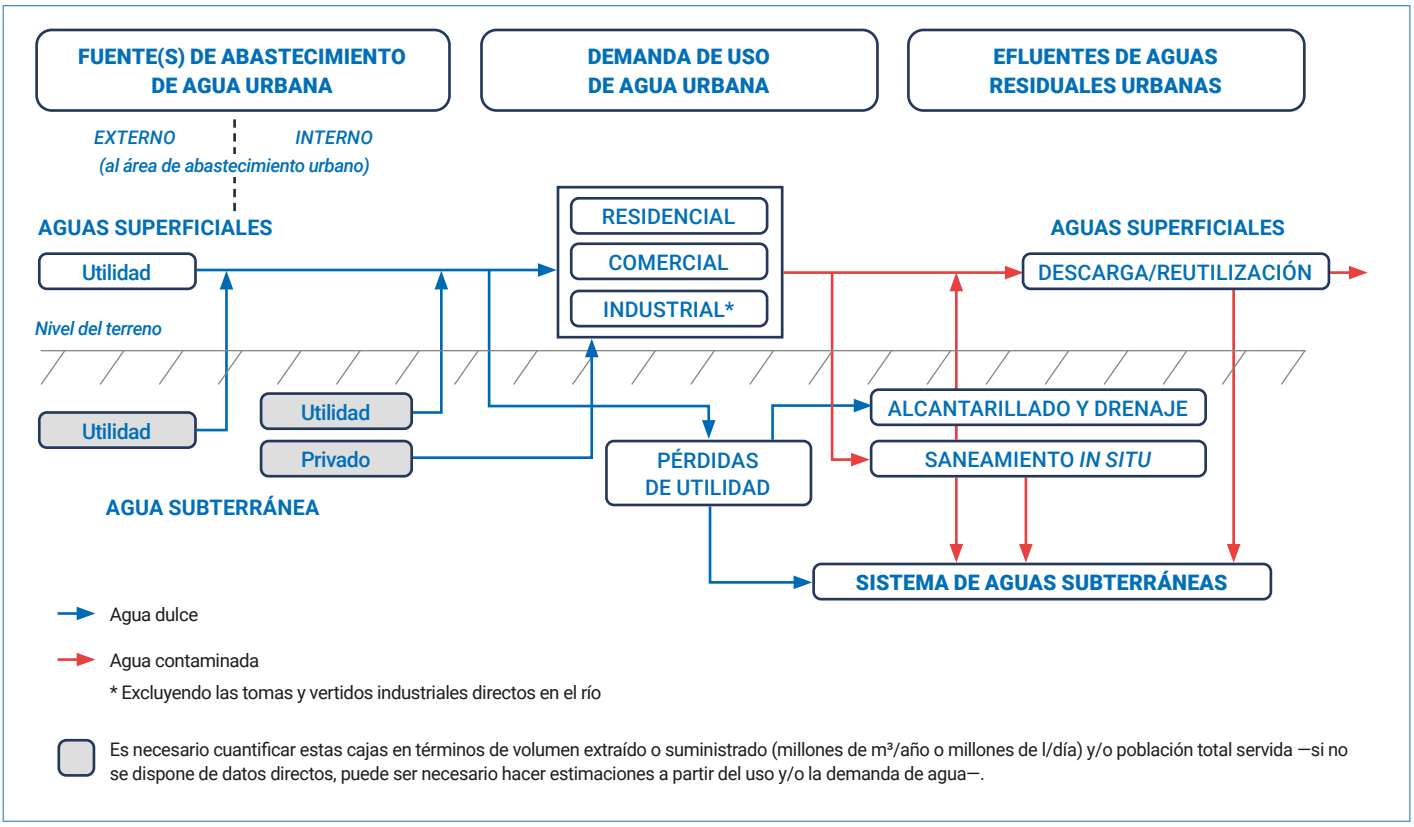
Fuente: Foster et al. (2020a).

Las aguas subterráneas presentan numerosas ventajas como base para el desarrollo del abastecimiento de agua por parte de las utilidades públicas

Indirectamente, las aguas subterráneas contribuyen a la reducción de la pobreza urbana al permitir que las empresas de servicios de agua desarrollen fuentes a un coste mucho menor y permitan reducir las tarifas de conexión. Sin embargo, muchos pobres urbanos viven en asentamientos periurbanos, que no están planificados y carecen de estatus legal, y los planificadores de las ciudades suelen impedir el suministro de infraestructuras públicas (servicios de electricidad y agua) a dichas áreas (AIH, 2015).

Viendo hacia el futuro, la presencia generalizada de recursos hídricos subterráneos permitirá un rápido desarrollo de los pozos de utilidad como "centro" de los nuevos sistemas descentralizados de prestación de servicios de agua para los distritos urbanos exteriores de rápido desarrollo con poblaciones de 20 000-50 000 habitantes (AIH, 2015). Dichos sistemas podrían minimizar los costes de infraestructura, el uso de energía y las pérdidas de agua, siendo los pozos de agua profundos generalmente muy adecuados para ser sus fuentes de agua. Para reducir las cargas contaminantes del subsuelo procedentes del saneamiento *in situ*, la construcción de pozos de agua debería combinarse con la separación/recuperación de la orina para que sirva de abono y la recuperación de las heces para la generación de energía (es decir, valorar las aguas residuales como un recurso). Además, será necesario un esfuerzo especial sobre el terreno para controlar otras fuentes de contaminación de las aguas subterráneas urbanas (como las gasolineras, los pequeños talleres de automóviles, los talleres mecánicos y las tintorerías).

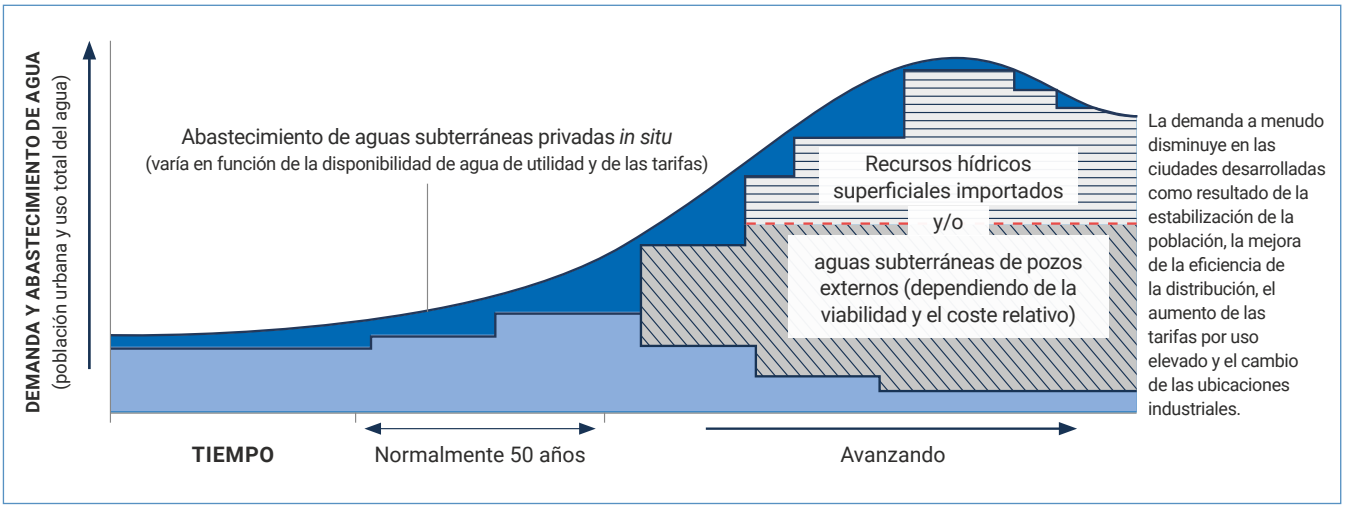
Figura 4.1 Resumen esquemático de las fuentes de agua urbanas y su uso e interacción



Fuente: Adaptado de Foster e Hirata (2012, fig. 1, p. 22).

Dentro de los límites de las grandes ciudades, a menudo no hay suficientes aguas subterráneas disponibles para satisfacer la demanda de agua de forma sostenible (figura 4.2). Cuando hay acuíferos de alto rendimiento en el interior inmediato, el desarrollo de "campos de pozos externos" es una opción atractiva, en comparación con la importación a larga distancia de recursos hídricos superficiales. El área de captación de estos campos de pozos debe protegerse contra la contaminación y la sobreexplotación mediante controles del uso del suelo y la regulación de los pozos de agua, respectivamente.

Figura 4.2 Tendencia típica de la evolución del abastecimiento urbano de agua



Fuente: Adaptado de Foster e Hirata (2012, fig. 2, p. 22)..

La gestión del uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales puede mejorar la seguridad del abastecimiento de agua, y se ha aplicado con éxito en una amplia gama de ciudades, como Lima

La presencia de grandes acuíferos en las proximidades de las ciudades puede aumentar la capacidad de recuperación del abastecimiento de agua urbana, ya que proporcionan un "amortiguador natural" contra la variabilidad de los caudales de los ríos y de los niveles de los embalses de superficie, como resultado del gran volumen de agua subterránea almacenada (Foster et al., 2020a; 2020c). El agua almacenada en los acuíferos también está protegida de forma natural contra las pérdidas por evapotranspiración y es menos vulnerable a la contaminación que las aguas superficiales. La gestión del uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales puede mejorar la seguridad del abastecimiento de agua, y se ha aplicado con éxito en una amplia gama de ciudades, como Lima (cuadro 4.2). Un proyecto reciente en Delhi capta el exceso de caudal del río monzón para recargar el acuífero que abastece de agua potable a la ciudad, lo que constituye otra forma de uso conjunto.

En el Brasil, por ejemplo, las ciudades que se abastecen únicamente de aguas superficiales tenían casi el doble de probabilidades de verse afectadas por la gran sequía de 2013-2017 que las que tenían un uso significativo de aguas subterráneas (Foster et al., 2020a). En 70 ciudades y pueblos de la India, las aguas subterráneas proporcionan un 48 % del abastecimiento urbano de agua (Alam y Foster, 2019), pero en Chennai (cuadro 4.3), por ejemplo, la seguridad del abastecimiento de agua se ha visto socavada por la excesiva explotación de los acuíferos. El prejuicio inherente de algunos funcionarios de las empresas de suministro de agua por el desarrollo y la explotación de grandes embalses de agua superficial puede hacer que no se haga un uso estratégico de los recursos locales de agua subterránea, lo que fue un factor agravante en la reciente crisis de abastecimiento de agua de Ciudad del Cabo (Olivier y Xu, 2019).

4.2.2 Autoabastecimiento privado y comunitario

El término autoabastecimiento se utiliza para referirse a las inversiones en abastecimiento de agua financiadas por los propios usuarios (Foster et al., 2010b; Oluwasanya et al., 2011; Foster e Hirata, 2012; Coulibaly et al., 2014). En las economías en desarrollo, la mayoría de los autoabastecedores utilizan aguas subterráneas y comparten su suministro con los vecinos (Sutton y Butterworth, 2021), y el autoabastecimiento a partir de aguas subterráneas ofrece una solución rápida en las áreas en las que es técnicamente factible para quienes pueden permitírselo.

Cuadro 4.2 Plan de uso conjunto para conservar un acuífero crítico en Lima

Lima se extiende a través de los abanicos de afloramiento hiperáridos de los ríos Rímac y Chillón. La recarga de las aguas subterráneas procede de la infiltración en el lecho del río (recientemente potenciada), de la filtración de los canales de irrigación, del exceso de riego de las tierras agrícolas y de recreo (que se reduce) y de las fugas de las tuberías de abastecimiento de agua y del alcantarillado. En la década de 1960-1980, la ciudad creció rápidamente hasta superar los 8 millones de habitantes y su demanda de agua aumentó a más de 2 000 Ml/día en 1997. Las obras hidráulicas del río Rímac se ampliaron hasta alcanzar una capacidad de 860 Ml/día, aunque la producción máxima no es posible en momentos de extrema concentración de sólidos en suspensión o en periodos de sequía. Del total del abastecimiento de agua en 1997, 1 050 Ml/día procedían de aguas subterráneas (incluidos 720 Ml/día de 380 pozos de utilidad), con el consiguiente descenso del nivel freático de 1 a 5 m/año, lo que provoca costosos efectos secundarios.

Se realizaron importantes estudios para optimizar el uso conjunto mediante la micromedición concertada del uso del agua doméstica para reducir el despilfarro, la reducción de la extracción de aguas subterráneas en áreas críticas definidas, transferencias adicionales de aguas superficiales andinas al río Rímac de hasta 260 Ml/día, la mejora de la flexibilidad de la distribución del agua para permitir que la mayoría de los usuarios se abastezcan de cualquiera de las dos fuentes y la mejora de la recarga del lecho fluvial en más de 6 km del río Rímac. Los acuerdos institucionales permitieron a la utilidad del agua actuar en nombre del gobierno. El éxito del plan de uso conjunto queda patente en la recuperación de entre 5 y 30 m de la capa freática entre 1997 y 2003 (tras un descenso de entre 10 y 40 m en los 10 años anteriores), y en la reducción de la extracción de agua por parte de la empresa de servicios públicos de 265 Mm^3/año en 1997 a 135 Mm^3/año en 2009, al tiempo que se mantiene la capacidad de una mayor producción a corto plazo.

Fuente: Adaptado de Foster et al. (2010a, cuadro B, p. 10).

Las inversiones en pozos de agua privados desbloquean una importante financiación para el acceso al abastecimiento de agua, y las pruebas documentadas, así como el reconocimiento de este fenómeno son cada vez mayores (Foster et al., 2010b; Grönwall, 2011; Butterworth et al., 2013; Sutton, 2017, Grönwall y Danert, 2020). Sin embargo, el uso privado de las aguas subterráneas tiende a pasar por debajo del radar de las estadísticas oficiales de abastecimiento de agua en el país (Danert y Healy, 2021), o el fenómeno no es reconocido en absoluto por el gobierno (AIH, 2015).

El uso de pozos de agua privados para el autoabastecimiento urbano ha "proliferado" en los últimos años, especialmente en el sur de Asia, América Latina y el África Subsahariana (Foster et al., 2010b; Grönwall et al., 2010; Alam y Foster, 2019). Esta práctica normalmente comienza como una "estrategia de supervivencia" ante un abastecimiento de agua por tuberías irregular o inadecuado, y luego continúa a perpetuidad como una "estrategia de reducción de costes" para evitar el pago de tarifas de agua más altas. Se trata de una forma probada de desbloquear la inversión de los hogares en el acceso al agua.

Los costes de construcción de pozos de agua privados en la mayoría de los entornos hidrogeológicos oscilan entre los 2 000 y los 20 000 dólares, pero son considerablemente más elevados (30 000-45 000 dólares) cuando se necesitan pozos profundos (de 200-300 m). En este último caso, la propiedad de pozos de agua privados seguirá siendo el dominio de los ricos y no es una propuesta "a favor de los pobres". Aunque esta práctica reduce la presión sobre el abastecimiento de las empresas de servicios públicos de agua, también puede tener graves repercusiones en los flujos de caja y los ciclos de inversión de las empresas (Foster et al., 2018). Es evidente la necesidad de regular de alguna manera el autoabastecimiento de los pozos de agua urbanos y, sin un control regular de la calidad, siempre será arriesgado, pero, no obstante, los usuarios parecen estar superficialmente satisfechos con sus suministros.

Cuadro 4.3 Las aguas subterráneas ayudan a sobrevivir en las graves crisis de abastecimiento de agua en Chennai (India)

Chennai tiene una población de 8,6 millones de habitantes y tuvo que enfrentarse a una aguda crisis de abastecimiento de agua en 2017-2019 cuando sus principales embalses casi se secaron como consecuencia de una persistente sequía. En junio de 2019, sus reservas combinadas se habían reducido al 0,1 % de la capacidad total de almacenamiento y la utilidad del agua solo podía abastecer 520 Ml/día, principalmente de aguas subterráneas locales, frente a una demanda total de 830 Ml/día. La ciudad cuenta con más de 420 000 pozos de agua privados, pero el nivel freático ha descendido considerablemente en grandes áreas, provocando la intrusión de agua salada debido a la sobreexplotación del acuífero a largo plazo y a la escasa recarga en los últimos monzones.

Estas presiones han obligado a Chennai a desplegar unos 5 000 camiones cisterna con una capacidad de 9 000 l cada uno, que realizan entre 5 y 6 viajes al día para abastecer de agua subterránea a las áreas rurales circundantes a la utilidad del agua, con un total de 200-300 Ml/día. Sin embargo, una historia local de mala gestión de los recursos hídricos ha alimentado los conflictos entre las poblaciones urbanas y rurales.

Fuente: Alam y Foster (2019).

El uso de pozos de agua privados para el autoabastecimiento urbano ha "proliferado" en los últimos años, especialmente en el sur de Asia, América Latina y el África Subsahariana

La investigación sobre el autoabastecimiento urbano a partir de aguas subterráneas ha revelado que:

- En la India, se calcula que 340 millones de habitantes dependen principalmente de fuentes de autoabastecimiento de aguas subterráneas (Sutton y Butterworth, 2021), y muchas ciudades de tamaño medio dependen en gran medida del autoabastecimiento doméstico de aguas subterráneas, que puede suponer entre el 40 y el 60 % del suministro de agua (Alam y Foster, 2019);
- El autoabastecimiento doméstico de aguas subterráneas en el Brasil asciende a cerca del 35 % del abastecimiento total de São Paulo en condiciones de sequía (a pesar de no estar reconocido por las autoridades y de que la ciudad no está subyacente a un acuífero importante) y a nivel nacional existen al menos 2,5 millones de pozos de agua privados que representan entre 6 y 7 veces la inversión anual en abastecimiento de agua por parte de los organismos gubernamentales (Foster et al., 2020a).

El caso de Nigeria es especialmente significativo, ya que su población urbana es muy numerosa y crece rápidamente, y sus niveles de autoabastecimiento son elevados. En 2009, se calcula que unos 38-43 millones del total de la población urbana (75-80 millones) dependían de pozos de agua privados, a pesar de que la cobertura del abastecimiento público también se ha ampliado. Solo en la ciudad de Lagos, alrededor del 20 % de los 18-20 millones de habitantes se abastecen de agua de utilidad, mientras que cerca del 50 % posee pozos de sondeo privados y otro 30 % obtiene agua de estas fuentes (Healy et al., 2017).

Los asentamientos informales de chabolas y las comunidades periurbanas más pobres solo pueden acceder a las aguas subterráneas en aquellos casos en los que:

- Las organizaciones comunitarias utilizan el capital social y las conexiones políticas para conseguir que los programas gubernamentales financien los pozos de agua no reticulados;
- las organizaciones no gubernamentales proporcionan pozos de agua no reticulados a los puestos de recogida; o
- se pueden construir pozos excavados de bajo coste para explotar capas freáticas excepcionalmente poco profundas, con la desventaja de ser mucho más vulnerables a la contaminación fecal y química (Grönwall, 2016; Lapworth et al., 2017).

Además, los asentamientos de personas marginadas y desplazadas, tanto de forma temporal como permanente, requieren una mención especial. Estos asentamientos suelen tener una alta densidad de población, pero se sitúan entre la categoría urbana y la rural. La construcción de pozos de agua bien diseñados es vital en estos casos. Buenos ejemplos son las ciudades turcas que reciben un gran número de refugiados sirios y los campos de refugiados rohinyás en Bangladesh. Estas áreas de asentamiento se abastecen de agua de pozos profundos construidos por organismos de ayuda o de socorro (cuadro 4.4).

4.2.3 Impulsores y tendencias del uso de la agua en zonas urbanas

Los impulsores actuales del uso de las aguas subterráneas urbanas son la aceleración de las tasas de urbanización, el aumento del uso de agua per cápita, el aumento de las temperaturas ambientales y la reducción de la seguridad de la captación de los ríos debido a la contaminación del agua y al cambio climático, y el coste relativamente bajo de la construcción y el funcionamiento de los pozos de agua (AIH, 2015). Otra práctica que requiere ser mencionada es la importación de abastecimientos privados en camiones cisterna a las áreas urbanas desde pozos de agua que se encuentran principalmente en áreas rurales vecinas.

En el África tropical, la tendencia regional es que la tasa de mejora del abastecimiento urbano de agua ha disminuido de hecho entre 1990 y 2015 (Banerjee et al., 2008). La población urbana que permanece "sin servicio" con abastecimiento de agua mejorado puede dividirse útilmente (Oluwasanya et al., 2011) en:

- aquellos (70-80 %) que viven físicamente cerca de la infraestructura existente pero que no quieren o no pueden conectarse, ya sea por los costes prohibitivos de la conexión o por la inseguridad de la tenencia en su lugar de residencia;
- aquellos (20-30 %) que viven fuera del área de la infraestructura existente, donde el coste de capital para que la utilidad del agua amplíe su cobertura es demasiado alto, dada la escasa perspectiva de recuperación de los costes de capital a menos que se garantice el abastecimiento subvencionado; y
- el resto, cuya continuidad y fiabilidad del abastecimiento de agua de utilidad son tan escasas que tienen que recurrir regularmente a soluciones alternativas (como la costosa agua embotellada o los poco fiables camiones cisterna).

4.3 Abastecimiento de agua en zonas rurales

4.3.1 Mejoradas las fuentes de agua de las aldeas

La naturaleza de las aguas subterráneas las hace muy adecuadas para el abastecimiento disperso de agua a las poblaciones que viven en áreas rurales, y a menudo son la forma más rentable de proporcionar un abastecimiento seguro de agua a las aldeas. Esto es especialmente cierto en el África Subsahariana y en el sur de Asia, donde la población rural es numerosa, pero está dispersa. Las aguas subterráneas seguirán siendo la fuente predominante de agua doméstica para la población rural de los países en desarrollo (Foster et al., 2008).

Los pozos de agua comunitarios con bomba manual comenzaron a adoptarse en la década de 1980, durante el Decenio Internacional del Agua Potable y el Saneamiento de las Naciones Unidas, y condujeron a un aumento constante del acceso al agua potable para la población rural de los países de bajos ingresos (Arlosoroff et al., 1987).

Los volúmenes de agua necesarios para satisfacer la demanda de las aldeas rurales son pequeños y pueden suministrarse fácilmente mediante pozos de pequeño diámetro, pozos excavados o a veces manantiales, con extracción de agua mediante bombas manuales o pequeños equipos de bombeo motorizados de baja capacidad (0,2-1,0 l/seg). Este tipo de abastecimiento de agua no suele estar reticulado a las viviendas, aunque existe una tendencia generalizada a querer perforar y explotar pozos de agua privados en sus propias instalaciones. El abastecimiento de agua con bomba manual puede extraerse de la mayoría de los tipos de roca con los conocimientos adecuados, pero el abastecimiento reticulado para pueblos grandes (> 1,0 l/seg) puede ser más difícil de desarrollar.

Cuadro 4.4 Un pozo profundo proporciona agua limpia a los refugiados rohinyás en Bangladesh

En los últimos años, aproximadamente un millón de refugiados rohinyás han emigrado a un asentamiento cerca de Cox's Bazaar, justo al norte de la frontera de Myanmar con Bangladesh. A pesar de la elevada pluviosidad local, el suministro de agua potable a estos desplazados es difícil, ya que los acuíferos poco profundos del área están contaminados por los excrementos humanos. El reto se superó perforando un pozo de agua profundo que explota el acuífero de arenisca de Tipam a una profundidad de 100-300 m. La energía para bombear el agua se genera con 187 paneles solares. Tras una cloración preventiva, el agua se almacena en 6 depósitos de 95 000 litros cada uno, para su distribución por gravedad a los habitantes.

Fuente: OIM (2019).

El uso de las aguas subterráneas incluye tanto las denominadas "fuentes mejoradas" de terminación sanitaria adecuada como un gran número de fuentes no mejoradas (tabla 4.3), cuya calidad microbiológica corre un riesgo importante por la entrada directa de aguas superficiales contaminadas. La proporción de fuentes mejoradas está aumentando constantemente, debido en gran medida a la aplicación de las orientaciones proporcionadas a través de la Red de Abastecimiento de Agua Rural[12].

Un estudio reciente realizado en Etiopía, Malawi y Uganda reveló que más del 90 % de los abastecimientos rurales de agua subterránea tenían una calidad inorgánica que los hacía aptos para el consumo, aunque hay áreas geológicas concretas en las que los niveles elevados de arsénico y fluoruro suponen un peligro. Una de las mayores ventajas de las aguas subterráneas es su resistencia a las variaciones climáticas. Las aguas subterráneas no dependen de los últimos 1-2 años de lluvia, sino que integran las precipitaciones a lo largo de años y décadas. La investigación sobre el rendimiento de los abastecimientos rurales de agua subterránea en Etiopía durante la reciente sequía de 2015-2016 descubrió que los pozos de sondeo equipados con bombas manuales superaban a cualquier otro abastecimiento de agua (MacDonald et al., 2019).

4.3.2 Estadísticas del uso rural

Las estadísticas sobre el uso de las aguas subterráneas en las zonas rurales se derivan en gran medida de las estimaciones de la población rural y del uso doméstico de agua per cápita para el abastecimiento no reticulado. Mientras que en el norte de Europa las utilidades de agua proporcionan abastecimiento reticulado a muchos pueblos, no existen tales servicios en las áreas rurales de la mayoría de los países del mundo, y las aguas subterráneas desempeñan un papel fundamental para satisfacer esta demanda de agua de forma fiable.

Los pozos de agua privados también desempeñan un papel importante en el abastecimiento para uso doméstico en todo el mundo (Healy et al., 2020). Por ejemplo, en Malí hay más de 170 000 pozos familiares tradicionales privados y se calcula que en Etiopía, Malawi y Zambia, más del 85 % de los hogares dependen de pozos privados para su abastecimiento de agua potable (Sutton y Butterworth, 2021).

4.3.3 Retos para el futuro

El abastecimiento de agua subterránea de las comunidades rurales no está exento de problemas. Investigaciones recientes en Etiopía, Malawi y Uganda han demostrado que menos del 50 % de los pozos de agua funcionaban de forma fiable y que alrededor del 25 % estaban contaminados con patógenos (MacDonald et al., 2019). Las razones son complejas e incluyen problemas de ingeniería y diseño, junto con un mantenimiento y una gestión deficientes del servicio de agua a largo plazo.

[12] www.rural-water-supply.net/en/.

Tabla 4.3

Escala de servicios de agua potable con uso de aguas subterráneas

Categoría	Definición	Ejemplos de fuentes
Fuente privada mejorada	• Agua potable inmediatamente disponible procedente de una fuente de agua mejorada • Libre de contaminación fecal y química prioritaria	• Pozo privado de buena terminación sanitaria en las instalaciones del hogar • Abastecimiento de agua reticulado/en tuberías desde un pozo protegido
Fuente comunitaria básica	• Agua potable comunitaria de una fuente mejorada • Tiempo de recogida inferior a 30 minutos para un viaje de ida y vuelta, incluido el tiempo de espera	• Pozo o manantial de buena terminación sanitaria cerca de los hogares
Fuente limitada	• Agua potable de una fuente mejorada • Tiempo de recogida superior a 30 minutos para un viaje de ida y vuelta, incluyendo las colas	• Pozo distante y congestionado o manantial de terminación sanitaria adecuada
Fuente no mejorada	• Agua potable de fuentes no protegidas	• Manantial o pozo excavado sin protección

Fuente: Basado en OMS/UNICEF (2017).

Las aguas subterráneas son la única forma viable y asequible de ampliar el acceso básico al agua a las poblaciones rurales no atendidas en gran parte del mundo

Las nuevas soluciones pasan por dar prioridad al mantenimiento de los servicios existentes, aumentar la calidad de los materiales y mejorar el diseño y la construcción mediante la concienciación y la creación de capacidades. Se calcula que la contaminación persistente de los abastecimientos rurales de agua subterránea con agentes patógenos afecta a un 30 % del total de las instalaciones. Aunque el tratamiento de desinfección es posible, rara vez es factible en las aldeas. La coexistencia del saneamiento *in situ* y el abastecimiento de aguas subterráneas es un grave problema para las fuentes poco profundas, sobre todo en los pueblos más densamente poblados. La calidad inadecuada de la construcción de los pozos es un problema generalizado, que permite la entrada directa de aguas superficiales contaminadas (Danert et al., 2020).

Las aguas subterráneas son la única forma viable y asequible de ampliar el acceso básico al agua a las poblaciones rurales no atendidas en gran parte del mundo.

Aún así, el 11 % de la población mundial carece de acceso a los servicios básicos de agua (UNICEF/OMS, 2019) y la prestación de servicios sostenibles de agua subterránea a estas personas es una prioridad importante. El pozo poco profundo equipado con una bomba manual de poca profundidad todavía tiene un papel importante que desempeñar en la rápida ampliación de los servicios de agua de las aldeas, y debe ir acompañado de una mayor atención al mantenimiento. El objetivo final es el acceso de los hogares al agua, lo que supondría el paso gradual de las bombas manuales comunitarias a los sistemas reticulados, pero de nuevo basados principalmente en las aguas subterráneas. El uso de la energía solar para el bombeo tiene múltiples beneficios potenciales en términos de seguridad del agua y de cero emisiones netas. Pero este cambio depende de que los pozos de sondeo puedan abastecer de forma sostenible rendimientos más elevados (>100 m^3/d), lo que requerirá una inversión sustancial en la comprensión de la hidrogeología para la ubicación adecuada de los pozos de sondeo.

4.4 Preocupación por el medio ambiente

4.4.1 Amenazas para la sostenibilidad

Los principales retos para el uso sostenible de las aguas subterráneas para el abastecimiento urbano son:

- limitaciones absolutas de recursos en el caso de las grandes ciudades;
- la frecuente degradación de la calidad causada por: el inadecuado saneamiento *in situ*, el almacenamiento de hidrocarburos con fugas, la eliminación casual de efluentes industriales y municipales, y los vertederos incontrolados de residuos sólidos (AIH, 2015; Lapworth et al., 2017);
- una tendencia a la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos en las áreas urbanas en las que la empresa de suministro de agua es una de las principales extractoras, lo que puede ir acompañado de un hundimiento del terreno que afecte a la infraestructura urbana y a la intrusión de agua salada; y
- los asentamientos urbanos suelen desarrollarse en las llanuras costeras, y se prevé que la población de las zonas costeras de todo el mundo crezca hasta 1 000 millones en las próximas décadas. En las áreas costeras, la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos expone gravemente a los acuíferos a la intrusión de agua salina a gran escala, un fenómeno que se agravará aún más con el aumento del nivel del mar inducido por el cambio climático.

Los problemas medioambientales asociados a la explotación de las aguas subterráneas pueden dividirse en los relativos a:

- hundimiento del terreno debido a la compactación de los acuitardos y los materiales del acuífero, lo que provoca un grave asentamiento de los cimientos de los edificios y un mayor riesgo de inundación en las ciudades costeras, como consecuencia de la sobreexplotación y el descenso del nivel freático de los acuíferos urbanos (por ejemplo, en Bangkok y Beijing); e
- inundaciones de aguas subterráneas, que provocan la inundación o el levantamiento de estructuras enterradas (sótanos profundos, túneles de transporte, etc.), derivadas del rebote del nivel freático tras el cese del bombeo de aguas subterráneas de los acuíferos urbanos.

Los problemas más graves surgen en las áreas urbanas, donde la cobertura del alcantarillado principal es baja y la mayoría de los residuos fecales domésticos se vierten en letrinas de pozo

Otras cuestiones específicas, como la conservación de los cimientos de pilotes de madera, requieren una política destinada a mantener las capas freáticas urbanas en los acuíferos urbanos poco profundos dentro de un rango limitado especificado.

El aumento de la intensidad de las precipitaciones derivado del cambio climático ha dado lugar en algunas áreas a tasas excepcionales de infiltración de aguas subterráneas, así como a acuíferos permeables, lo que ha dado lugar a inundaciones subterráneas en áreas que anteriormente no habían experimentado este problema.

Por supuesto, existen problemas medioambientales más amplios derivados de la extracción intensiva de aguas subterráneas para cualquier fin. La reducción de los vertidos a los ríos como flujo de base, así como a los humedales dependientes, es uno de los principales.

4.4.2 Problemas de saneamiento y de drenaje en zonas urbanas

La urbanización modifica en gran medida el "ciclo de las aguas subterráneas", con algunos beneficios y numerosas amenazas. El saneamiento y el drenaje urbanos ejercen una gran influencia en las tasas de recarga de las aguas subterráneas y en su calidad.

A la hora de planificar el saneamiento y el drenaje urbanos es necesario tener en cuenta la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos y la vulnerabilidad a la contaminación. Cuando se utilicen sistemas de aguas subterráneas no confinadas para el abastecimiento urbano, también será importante dirigir el drenaje de las aguas pluviales de los tejados y las áreas pavimentadas hacia pozos de absorción para maximizar la recarga de las aguas subterráneas. Sin embargo, la transición del saneamiento *in situ* a los sistemas de

Cuadro 4.5 Dependencia importante de las aguas subterráneas, pero con importantes riesgos en Lusaka

Lusaka ha crecido rápidamente, pasando de 0,5 millones en 1978 a 2,8 millones en 2018. Durante mucho tiempo ha dependido del agua subterránea local para su abastecimiento. En 2018, la utilidad del agua operó 228 pozos de agua para proporcionar alrededor de 140 Ml/día, con una planta de tratamiento del río que proporciona otros 80 Ml/día. La utilidad del agua todavía está plagada de altas pérdidas de agua y una escasa recaudación de ingresos, pero ha tomado una "iniciativa a favor de los pobres" mediante la perforación de pozos independientes para abastecer a los quioscos de agua con una tarifa subvencionada de 0,25 dólares/m³ (40-70 % de la tarifa normal).

Además, hay miles de pozos de agua privados con una extracción total de hasta 300 Ml/día. En las áreas periurbanas de bajos ingresos, la mayoría de los hogares todavía dependen de pozos excavados poco profundos, donde la capa freática está a menos de 3 metros de profundidad, pero la formación de piedra caliza dolomítica que aprovechan (aunque de alto rendimiento) es muy vulnerable a la contaminación de las aguas residuales urbanas y los efluentes industriales. Las letrinas de pozo son la forma predominante de saneamiento y, en estas condiciones del terreno, constituyen un grave peligro para la calidad de las aguas subterráneas y son la causa de los frecuentes brotes de cólera. Están en marcha algunos proyectos a gran escala para ampliar la red principal de alcantarillado y la capacidad de tratamiento de las aguas residuales, pero en los barrios marginales periurbanos no planificados son difíciles y costosos de ejecutar.

Fuente: Adaptado de Foster et al. (2020c, cuadro 1, p. 126).

alcantarillado en las áreas urbanas establecidas no es muy factible en las ciudades en desarrollo porque la densa población ofrece poco espacio y el coste suele ser prohibitivo. Teniendo en cuenta estas limitaciones, el saneamiento *in situ* se acepta cada vez más como norma, y su diseño y gestión han mejorado para garantizar una manipulación y eliminación seguras de los lodos fecales (Peal et al., 2020).

El impacto de un saneamiento inadecuado o inapropiado en las aguas subterráneas varía mucho en función de la vulnerabilidad a la contaminación de los diferentes sistemas acuíferos y de los tipos de lodos fecales y residuos sólidos implicados.

Los problemas más graves surgen en las áreas urbanas, donde la cobertura del alcantarillado principal es baja y la mayoría de los residuos fecales domésticos se vierten en letrinas de pozo. Por lo general, afectará más a los marginados (las mujeres y las niñas suelen tener un riesgo desproporcionado de contraer enfermedades debido a los agentes patógenos y las toxinas como resultado de su exposición a las aguas residuales). En las ciudades de los países en desarrollo y en los asentamientos informales más grandes, la mayoría de la población total se abastece de saneamiento *in situ* (fosas sépticas, diversos tipos de letrinas y pozos negros, e incluso defecación al aire libre), lo que provocará una importante contaminación de los acuíferos poco profundos por nitratos, productos químicos comunitarios y productos farmacéuticos. En los acuíferos más vulnerables, también se producirá una contaminación por organismos patógenos. Esto está bien documentado en algunas ciudades (cuadro 4.5).

En los lugares del mundo en desarrollo en los que la cobertura de la red de alcantarillado constituye la mayor parte de la infraestructura de saneamiento, las disposiciones para la eliminación y reutilización de las aguas residuales siguen siendo ampliamente inadecuadas, con importantes riesgos de contaminación para los acuíferos aluviales periurbanos. Es urgente evitar la irrigación agrícola o recreativa con aguas residuales en las áreas de captación de los pozos públicos, a menos que se sometan a un tratamiento terciario.

Cuando la eliminación de los residuos sólidos se realiza mediante vertederos, y especialmente cuando estos están mal diseñados y operados, la carga de contaminación de las aguas subterráneas será localmente más variada y potencialmente más tóxica, si los vertederos no cuentan con revestimientos impermeables y gestión de efluentes.

Mientras que a nivel local pueden producirse tipos más graves de contaminación de las aguas subterráneas como consecuencia de una gestión inadecuada de las aguas residuales industriales, la contaminación procedente del sector doméstico y municipal es una amenaza mucho más extendida en aquellos contextos en los que predominan el saneamiento *in situ* y los vertederos de residuos sólidos.

Los problemas más graves surgen en las áreas urbanas, donde la cobertura del alcantarillado principal es baja y la mayoría de los residuos fecales domésticos se vierten en letrinas de pozo

4.4.3 Consumo de energía relacionado con las aguas subterráneas

El funcionamiento de las bombas de pozos de agua motorizadas es un importante consumidor de energía, y los costes de bombeo también empiezan a aumentar en acuíferos sobreexplotados con niveles freáticos en continuo descenso. Sin embargo, el consumo de energía de las bombas de pozos de agua sigue siendo modesto en comparación con las necesidades energéticas asociadas a las complejas plantas de tratamiento de agua y al trasvase a larga distancia de recursos hídricos superficiales. Así, siempre que la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos, disolventes y plaguicidas pueda reducirse al mínimo, la necesidad total de energía para el funcionamiento y la distribución de las fuentes de agua subterránea es mucho menor que la de las fuentes de agua de superficie (excepto cuando estas se alimentan por gravedad).

En los lugares donde la electrificación está generalizada, la fuente de energía más común para el bombeo de aguas subterráneas sigue siendo la electricidad, pero en el África Subsahariana y en algunas otras regiones se sigue dependiendo en gran medida de las bombas con motor diésel o de las bombas manuales. En los últimos años ha aumentado mucho el uso de paneles solares como fuente de energía para las bombas de agua subterránea, y es probable que esto continúe en el futuro.

El coste de la provisión de energía para el abastecimiento de aguas subterráneas urbanas se recupera normalmente con las tarifas del agua, normalmente con una subvención para los volúmenes mínimos sociales que se recupera a través de una tarifa más alta para volúmenes mayores (véase WWAP, 2019, capítulo 5).

4.5 Papel de las partes interesadas

Son varios los actores clave que intervienen en la captación de aguas subterráneas para el abastecimiento de los asentamientos humanos. Estos van desde los organismos nacionales responsables de los recursos hídricos subterráneos y del abastecimiento de agua, hasta los correspondientes municipios locales e incluso los propietarios individuales de pozos de agua.

Los organismos nacionales tienen la responsabilidad de garantizar:

- la regulación básica de la extracción de aguas subterráneas;
- una adecuada coordinación en materia de aguas subterráneas entre los agentes nacionales, los organismos de cuenca, las organizaciones locales de usuarios de aguas subterráneas y las organizaciones de ayuda/auxilio, según proceda;
- mecanismos eficaces para el control de las aguas subterráneas y la aplicación de la normativa;
- la coordinación horizontal con otros departamentos en materia de aguas subterráneas; y
- apoyo a los acuerdos operativos en los acuíferos transfronterizos.

Los organismos municipales locales deberán:

- velar por el funcionamiento del sistema local de permisos de agua;
- insistir en la necesidad de prestar atención al funcionamiento y mantenimiento de los pozos de agua;

- coordinar la gestión de los residuos sólidos y las aguas residuales para proteger las aguas subterráneas;
- consultar y apoyar a los grupos locales que trabajan en el saneamiento y la gestión de residuosl;
- comunicar a los agricultores la necesidad de prevenir la contaminación de las aguas subterráneas; y
- animar a los institutos de educación/formación profesional (incluidos los grupos de jóvenes) a incluir el abastecimiento de agua y la gestión de las aguas subterráneas en sus planes de estudio.

4.6 Observaciones finales

1) Es evidente que las aguas subterráneas desempeñan un papel importante en el abastecimiento de agua en las zonas urbanas, así como un papel fundamental en el suministro de agua a las aldeas rurales y a los asentamientos de personas desplazadas en todo el mundo, pero algunos factores tienden a hacer que este papel sea difícil de cuantificar con precisión. Entre las razones se encuentra el hecho de que actualmente no se diferencian claramente los tipos de fuentes de abastecimiento de agua en las bases de datos nacionales e internacionales, y el hecho de que la extracción privada de pozos de agua suele ser irregular o ilegal y queda fuera del radar de las bases de datos públicas.
2) Es urgente que los estudios sistemáticos de las aguas subterráneas urbanas se conviertan en un elemento rutinario de la planificación urbana a escala detallada, mitigar los conflictos innecesarios entre el uso público y privado de las aguas subterráneas, garantizar soluciones sólidas para el abastecimiento de agua de los asentamientos de personas desplazadas y evitar problemas medioambientales y sociales imprevistos y costosos relacionados con el abastecimiento de aguas subterráneas.
3) Las empresas de suministro de agua deben hacer un énfasis mucho mayor en la protección de sus fuentes críticas de pozos y manantiales mediante el fomento de las restricciones de uso del suelo (en los cultivos agrícolas y la construcción de viviendas) en sus zonas de captación de aguas subterráneas, en aras de la salvaguarda de la salud pública y la reducción del coste del abastecimiento de agua.
4) En relación con la sostenibilidad y el coste de las aguas subterráneas para el abastecimiento humano, son especialmente preocupantes los efectos de la sobreexplotación de las aguas subterráneas para la agricultura de regadío y la contaminación de las aguas subterráneas por la agricultura y la industria (véanse los capítulos 3 y 5). De igual importancia son los efectos de la contaminación debida a un saneamiento inadecuado o inapropiado que afecta a las propias fuentes de agua subterránea, así como los riesgos de contaminación causados por un diseño deficiente de los pozos de agua y/o una terminación inadecuada.
5) También es urgente promover la plena interacción y el seguimiento de las aguas subterráneas urbanas entre las principales partes interesadas: las empresas de suministro de agua, las agencias medioambientales y las autoridades municipales, así como las organizaciones locales de usuarios de aguas subterráneas. Las bases de datos resultantes de esta actividad conjunta de seguimiento deberían ser de libre acceso. Paralelamente, es necesario establecer marcos estables de colaboración a largo plazo entre las empresas de servicios de agua urbanos y los centros locales de investigación académica para mejorar la comprensión de los recursos de aguas subterráneas.

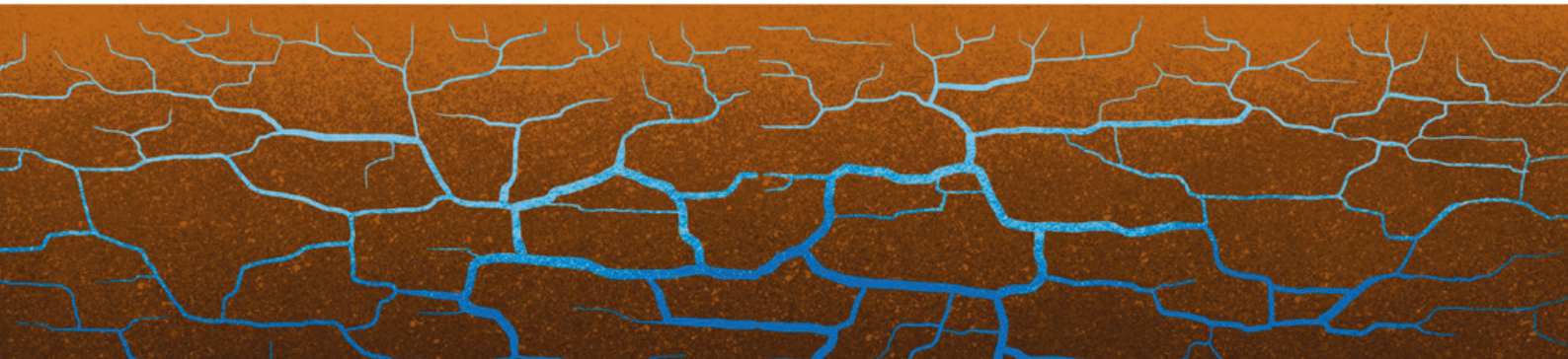
Es urgente que los estudios sistemáticos de las aguas subterráneas urbanas se conviertan en un elemento rutinario de la planificación urbana a escala detallada

Capítulo 5

Aguas subterráneas e industria

ONUDI
Helmut Krist y John Payne

Con contribuciones de Christian Susan (ONUDI), Cate Lamb y Laureen Missaire (CDP)



5.1 Contexto

Los sectores de la industria y la energía suelen ser muy conscientes de lo que les rodea a nivel del suelo y por encima de él. Cosas como los ríos, los lagos y la variabilidad del clima son perceptibles, al igual que los riesgos que pueden presentar para la viabilidad de las empresas. Sin embargo, las aguas subterráneas que se encuentran debajo suelen ser —literalmente— pasadas por alto. Este olvido es sorprendente, ya que estos sectores suelen depender del autoabastecimiento, que en muchos lugares tiene un componente de agua subterránea. Las aguas subterráneas son un recurso muy útil y a menudo infrautilizado para la industria, pero deben gestionarse de forma sostenible en colaboración con otras partes interesadas. Es un recurso clave para muchas industrias, y contribuye de este modo al empleo y al crecimiento económico.

Entre las industrias que extraen aguas subterráneas se encuentran la fabricación, la minería, el petróleo y el gas, la generación de energía, la ingeniería y la construcción. Entre las industrias que dependen en gran medida de las aguas subterráneas a través de las cadenas de abastecimiento se encuentran los sectores de la confección y de la alimentación y las bebidas. Sus extracciones combinadas pueden dar lugar a una mayor competencia/interacciones entre las distintas industrias, así como con otros sectores, comunidades y el entorno natural, con consecuencias a veces imprevistas, como el descenso extremo de las capas freáticas, la contaminación de las aguas subterráneas y el hundimiento del terreno (PNUMA, 2019).

5.2 Extracción y uso de aguas subterráneas en la industria

5.2.1 Cantidad

Las estadísticas relativas a la extracción y el uso del agua en la industria son notablemente escasas. La industria y la energía representan el 19 % de las extracciones mundiales de agua dulce (Aquastat, s.f.). Esta cifra se refiere al agua autoabastecida (que incluye las aguas subterráneas). Los datos también señalan grandes diferencias geográficas, ya que la extracción industrial varía entre el 5 % en África y el 57 % en Europa. Sin embargo, los datos de Aquastat no están desglosados en cuanto a las extracciones industriales de agua subterránea. Estos datos solo se pueden encontrar para algunos países industrializados con mayores ingresos. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (Dieter et al., 2018) muestra que para el uso industrial autoabastecido en los Estados Unidos la cantidad total de agua extraída ha disminuido significativamente desde 1985 hasta 2015 (figura 5.1), mientras que el agua superficial sigue siendo la principal fuente. Según otra estimación, las aguas subterráneas aportan el 27 % del agua extraída a nivel mundial para la fabricación (Döll et al., 2012)[13].

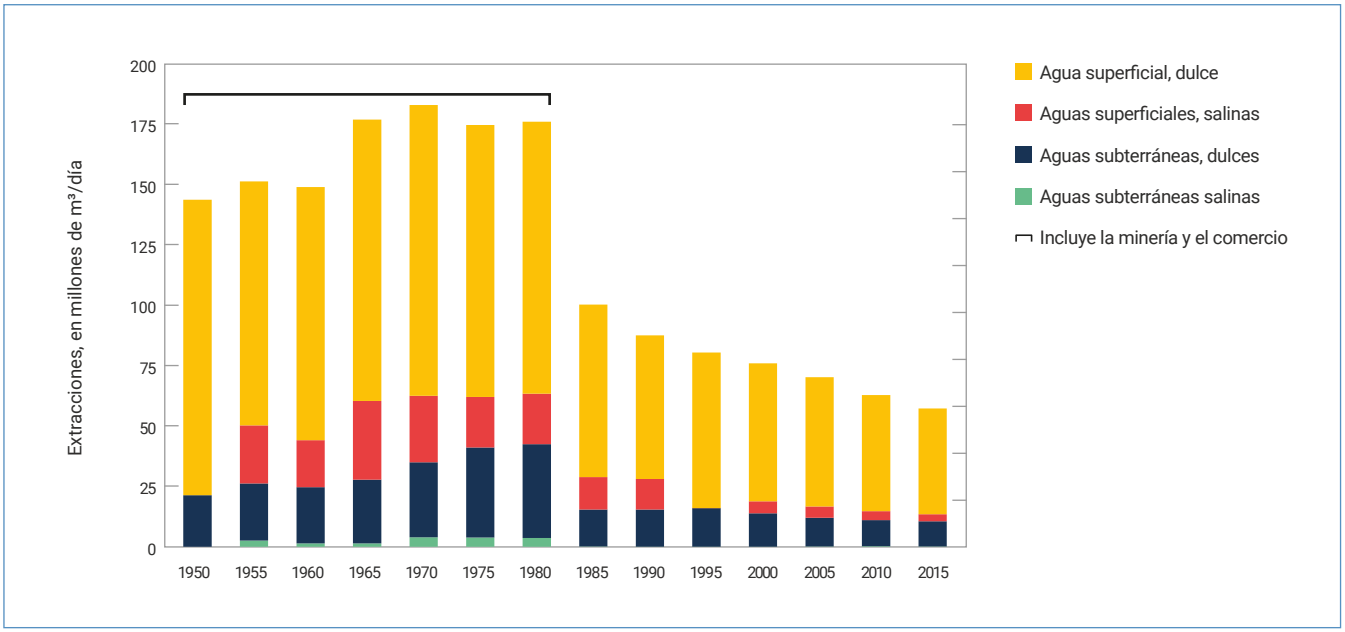
Los 15 países con las mayores extracciones anuales de agua subterránea estimadas en 2010 se muestran en la tabla 5.1, evidenciando claramente la amplia gama de extracciones de agua subterránea para la industria, que varía de un país a otro del 1 al 48 %.

Datos más recientes de 2015 (tabla 5.2) muestran muchos de los mismos países y sus cambios en la extracción absoluta de agua, con China e Indonesia superando con creces cualquier ahorro de otras naciones.

La menor disponibilidad de recursos hídricos subterráneos puede ser un factor limitante para el desarrollo industrial, ya que algunas industrias utilizan más agua subterránea que superficial. En algunos casos, las aguas subterráneas se utilizan para preservar los recursos hídricos superficiales para la población local —sobre todo en regiones con escasez de

[13] Según los datos inéditos del CDP de 2020, a nivel mundial, en todos los sectores, el 39 % de las empresas declararon haber reducido su extracción de agua subterránea en comparación con el año anterior (2019), el 30 % informó de que estaba más o menos igual, y el 24 % informó de que había aumentado su extracción. Esto incluye las extracciones de agua subterránea de fuentes no renovables y renovables para su funcionamiento directo (CDP, sin publicar).

Figura 5.1 Extracciones de agua industrial autoabastecida en los Estados Unidos



Fuente: Adaptado de Dieter et al. (2018, fig. 17F, p. 53).

Tabla 5.1 Quince países con las mayores extracciones anuales de agua subterránea estimadas (2010)

País	Población 2010 (en miles)	Extracción de aguas subterráneas			
		Estimación de la extracción de agua subterránea en 2010 (km³/año)	Desglose por sectores		
			Extracción de agua subterránea para irrigación (%)	Extracción de aguas subterráneas para uso doméstico (%)	Extracción de aguas subterráneas para la industria (%)
India	1 224 614	251,0	89	9	2
China	1 341 335	112,0	54	20	26
Estados Unidos	310 384	111,7	71	23	6
Pakistán	173 593	64,8	94	6	0
Irán	73 974	63,4	87	11	2
Bangladesh	148 692	30,2	86	13	1
México	113 423	29,5	72	22	6
Arabia Saudita	27 448	24,2	92	5	3
Indonesia	239 871	14,9	2	93	5
Türkiye	72 752	13,2	60	32	8
Federación de Rusia	142 985	11,6	3	79	18
Siria	20 411	11,3	90	5	5
Japón	126 536	10,9	23	29	48
Tailandia	69 122	10,7	14	60	26
Italia	60 551	10,4	67	23	10

Fuente: Margat y Van der Gun (2013).

Tabla 5.2
Los nueve países con mayor extracción anual de agua industrial (km^3/año)

País	2015	Cambio absoluto desde 1965
Estados Unidos	248,4	-55,5
China	133,5	+87,8
Federación de Rusia	39,6	-7,9
Canadá	33,1	-2,9
Alemania	32,6	-5,2
Indonesia	24,7	+24,3
Francia	21,6	-2,9
India	17,0	+1,8
Italia	16,3	+7,3

Fuente: Ritchie y Roser (2017), a partir de Aquastat

agua— para su abastecimiento diario de alimentos y bebidas. Algunos ejemplos son la industria de acabado textil en el Pakistán y otras regiones con escasez de agua. La industria de acabado textil de Karachi se enfrenta a una escasez extrema de agua de proceso, y las fuentes de agua subterránea disponibles anteriormente se han agotado. La aplicación de técnicas de vertido cero de líquidos (ZLD) es una posible solución para continuar el funcionamiento de los procesos de acabado textil.

En la industria, las aguas subterráneas se utilizan para muchos fines diferentes, como la fabricación, el procesamiento, el lavado, la dilución, la refrigeración y el transporte de productos

Otro ejemplo es el reto al que se enfrenta el desarrollo de una nueva fábrica de Tesla en Brandenburgo (Alemania). Debido a los limitados recursos de aguas subterráneas de la región, la utilidad regional del agua planteó la preocupación de cómo el proyecto podría afectar al abastecimiento de agua potable, lo que a su vez condujo a un debate sobre la disponibilidad regional de aguas subterráneas (IGB, 2020). Este ejemplo indica que la determinación de una asignación adecuada de las aguas subterráneas no es un problema limitado a los países en desarrollo.

5.2.2 Fabricación

Además, las aguas subterráneas son utilizadas por las instalaciones de fundición, las refinerías de petróleo y las industrias que fabrican productos químicos, alimentos y productos de papel (CDC, s.f.). Algunas operaciones industriales dependen en gran medida de las aguas subterráneas, mientras que otras, como la minería, también pueden provocar el desplazamiento o el agotamiento de las aguas subterráneas mediante el desagüe en otros ecosistemas, como los sistemas de aguas superficiales.

En 2020, de las 1 375 empresas manufactureras de todo el mundo que informaron al CDP (anteriormente Carbon Disclosure Project), más de la mitad (54 %) informó de que las aguas subterráneas procedentes de fuentes no renovables y renovables eran relevantes para sus operaciones directas. De ellas, el 46 % ha reducido sus extracciones de agua subterránea, el 32 % ha mantenido sus extracciones y el 21 % ha aumentado sus extracciones de agua subterránea en comparación con 2019 (CDP, sin publicar).

Agua de proceso

Diversos procesos industriales utilizan los recursos de aguas subterráneas cuando las aguas superficiales son limitadas en cantidad, pero también cuando la calidad es importante. Las aguas subterráneas suelen estar menos contaminadas que las superficiales y requieren menos tratamiento. Industrias como la textil y la confección, el cuero y la pasta y el papel tienen un elevado consumo específico de agua. Por ejemplo, el procesamiento en húmedo de 1 kg de tejido de algodón necesita entre 250 y 350 litros de agua (Kiron, 2014). La industria

del curtido tiene un uso específico de agua de 170-550 litros por piel (Schwarz et al., 2017). La extracción de agua en la producción europea de papel para la fabricación de pasta, papel y cartón fue de unos 3 700 millones de m³ en 2012 (SpotView, 2018), de los cuales el 90 % procedía de aguas superficiales, y el 8,5 % de fuentes subterráneas. Estas operaciones de procesamiento a menudo utilizan aguas subterráneas autoabastecidas: esto se observa no solo en los países en desarrollo, que a veces tienen un control inadecuado, sino también en los países industrializados como los Estados Unidos.

La industria textil es una gran consumidora de aguas subterráneas. En Bangladesh, por ejemplo, este sector se abastece de aguas subterráneas para sus diferentes unidades de la instalación de procesamiento en húmedo, por lo que necesita desesperadamente una gestión eficiente del agua (Haque et al., 2021). Casi todos los tintes, productos químicos especiales y productos químicos de acabado se aplican a los sustratos textiles a partir de baños de agua/procesos húmedos. Además, la mayoría de los pasos de preparación de los tejidos, como el desencolado, el descrudado, el blanqueo y la mercerización, utilizan sistemas acuosos y aguas subterráneas (Kiron, 2014).

Como muestra la tabla 5.3, los procesos de lana y tejidos de fieltro son las operaciones textiles que más agua consumen (el procesamiento de la lana tiene un uso medio de agua de unos 280 l/kg). Las cifras también muestran que el consumo de agua en esta industria varía mucho.

Tabla 5.3

Uso de agua en el procesamiento textil en los Estados Unidos. (en l/kg de producción)

Uso del agua en el procesamiento textil			
Subcategoría de procesamiento	**Uso del agua mínimo**	**Uso del agua medio**	**Uso del agua máximo**
Lana	110	285	660
Tejido	5	110	510
Tejer	20	80	380
Alfombra	8	45	160
Existencias/ hilos	3	100	560
No tejidos	2,5	40	80
Telas de fieltro	33	210	930

Fuente: Adaptado de US EPA (1996, tabla 2-33, p. 65).

Un ejemplo de una ciudad en la que la calidad y la cantidad de las aguas subterráneas se vieron afectadas negativamente por la rápida industrialización, un problema conocido especialmente en los países en desarrollo, es Tiruppur (India). La ciudad depende en gran medida de las actividades intensivas de procesamiento textil, pero también depende de las aguas subterráneas como principal fuente de agua potable. Las muestras indicaron que las aguas subterráneas están contaminadas con sales utilizadas en el procesamiento textil (Grönwall y Jonsson, 2017a).

Lavado y limpieza

Muchos procesos de producción necesitan una gran cantidad de agua para lavar y limpiar sus productos al final de la producción, con el fin de separar los residuos de los productos químicos de procesamiento. Estos productos químicos permanecen en el efluente y necesitan ser tratados para proteger el medio ambiente y la salud humana. Se carece de datos específicos sobre la cantidad de agua subterránea utilizada para el lavado y la limpieza en las distintas industrias.

Refrigeración

El uso de las aguas subterráneas para la refrigeración depende en gran medida de la ubicación y el tipo de industria, por lo que varía mucho de un país a otro. La energía primaria y la producción de electricidad son los mayores usuarios de agua industrial[14]. Los procesos de alta energía necesitan grandes cantidades de agua de refrigeración. Por ejemplo, las fundiciones de acero y metales utilizan 30 m³ de agua por tonelada de acero, mientras que las refinerías emplean 1,5 m³ de agua para procesar 1 m³ de crudo. En los Estados Unidos, el 15 % del agua de proceso utilizada en las refinerías procede de aguas subterráneas (Departamento de Energía de los Estados Unidos, 2016).

5.2.3 Bebidas y agua embotellada

Los sectores de las bebidas, el agua embotellada y el agua mineral son únicos en el sentido de que el agua subterránea es una materia prima que se convierte en el producto. Según los estudios de mercado, se espera que el sector crezca un 8 % anual (Facts & Factors, 2020). Las fuentes de agua mineral utilizadas para el consumo humano necesitan una atención especial, ya que estas cuencas y acuíferos deben ser protegidos contra cualquier tipo de contaminación microbiológica y química.

Las aguas subterráneas tienen un impacto significativo en la ingeniería y la construcción

Las grandes empresas internacionales de alimentación y bebidas compiten cada vez más y se disputan con las comunidades locales y los municipios la cantidad que pueden extraer sin agotar los recursos locales de agua subterránea y afectar al abastecimiento doméstico y de otro tipo. Por ejemplo, en la ciudad de Guelph (Canadá), los ciudadanos se manifestaron contra la renovación del permiso de extracción de agua para la planta embotelladora de Nestlé en la cercana Aberfoyle, que se abastece del mismo acuífero que alimenta el abastecimiento de Guelph. La consecuencia fue una moratoria del permiso (CBC, 2016). Una respuesta para resolver los próximos conflictos relacionados con los recursos comunes de agua subterránea puede ser la aplicación de la norma internacional de administración del agua (AWS, 2019).

Según los datos globales de CDP, en 2020, el 72 % de las empresas de bebidas que divulgaron información publicaron que las aguas subterráneas eran relevantes para sus operaciones. De ellas, el 26 % informó de que sus extracciones de aguas subterráneas eran más o menos las mismas que el año anterior (2019), el 42 % eran menores, el 18 % habían aumentado y el 8 % estaban en su primer año de mediciones (CDP, sin publicar).

5.2.4 Ingeniería y construcción

Las aguas subterráneas tienen un impacto significativo en la ingeniería y la construcción. Al igual que en el caso de la minería (véase el apartado 5.4), en el mejor de los casos es un inconveniente y en el peor, un problema importante (demasiadas aguas subterráneas en el lugar equivocado y en el momento equivocado) y, para estos segmentos de la industria, no es ni un activo ni un recurso oculto. Las construcciones subterráneas, como los túneles, suelen requerir un desagüe temporal o permanente. Las excavaciones profundas y los edificios con grandes áreas subterráneas, como los sótanos y los aparcamientos subterráneos, se enfrentan a los mismos retos, a menudo exacerbados por los grandes volúmenes que hay que retirar y también por las presiones de agua que son el resultado de las altas cabezas locales o regionales. A diferencia de la minería, que se produce principalmente en áreas más remotas, a menudo con aguas subterráneas relativamente intactas, la construcción se lleva a cabo comúnmente en áreas urbanas, donde las aguas subterráneas pueden estar ya contaminadas, lo que requiere un tratamiento en el momento del desagüe y antes del vertido. De hecho, la cuestión de dónde verter las cantidades de agua, a veces considerables, puede resultar difícil en las áreas pobladas e implicar la obtención de permisos y reglamentos.

[14] La Agencia Internacional de la Energía estima que la industria y la energía (energía primaria y producción de electricidad) representan alrededor del 10 % cada una de las extracciones totales de agua a nivel mundial (AIE, 2016a).

Además, tanto el desagüe temporal como el permanente pueden reducir considerablemente los niveles de las aguas subterráneas, afectar a su abastecimiento y aumentar los costes de explotación y mantenimiento. En la mecánica de suelos y la ingeniería de cimientos, las aguas subterráneas son una consideración vital. Según el principio de la tensión efectiva, la presencia de agua subterránea afecta a la resistencia del suelo y a las cargas que puede soportar. Además, las fluctuaciones del nivel de las aguas subterráneas (estacionales y, a veces, como consecuencia de la desecación) son especialmente importantes para afectar a la estabilidad de los taludes. A mayor escala, el agotamiento de los acuíferos y la disminución del nivel de las aguas subterráneas pueden provocar un grave hundimiento del terreno, como demuestra el conocido caso de Yakarta, donde se han observado tasas de hundimiento de 1 a 20-28 cm/año en algunos lugares (Abidin et al., 2011). Esto conlleva la necesidad de sustituir y reparar las infraestructuras y los edificios, todas ellas tareas de ingeniería y construcción. En otros lugares, los fenómenos kársticos producidos por la erosión subterránea de las rocas calcáreas (carbonatadas) a causa de las aguas subterráneas ácidas dejan cuevas y vacíos que pueden colapsar, provocando fallos en los edificios a nivel del suelo y la pérdida de vidas. Los socavones de Florida (Estados Unidos) son un buen ejemplo.

5.3 Industria, calidad de las aguas subterráneas y contaminación

5.3.1 Amenazas industriales para las aguas subterráneas

El vertido y la infiltración en el suelo de efluentes industriales no tratados o solo parcialmente tratados, mediante pozos de inyección, por ejemplo, pueden contaminar las aguas subterráneas y, en consecuencia, afectar a otros usos aguas abajo para la irrigación, el agua potable y diversas industrias. Los impactos negativos de la contaminación del suelo y la lixiviación de los vertederos industriales antiguos y no diseñados y de las minas heredadas pueden provocar riesgos significativos para el medio ambiente y la salud humana. Esto puede ocurrir incluso cuando la precipitación industrial de partículas en las emisiones atmosféricas aterriza en el suelo y es transportada posteriormente a las aguas subterráneas por la infiltración de la lluvia.

Los contaminantes industriales que se encuentran en las aguas subterráneas abarcan una amplia gama de parámetros físicos, químicos inorgánicos, químicos orgánicos, bacteriológicos y radiactivos. Algunos contaminantes comunes de las aguas subterráneas, las fuentes de contaminación asociadas y sus efectos se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Contaminantes comunes de las aguas subterráneas industriales por fuente

Fuente de contaminación	Tipo de contaminación
Gasolineras y garajes	Benceno, otros hidrocarburos aromáticos, fenoles, algunos hidrocarburos halogenados
Eliminación de residuos sólidos	Amonio, salinidad, algunos hidrocarburos halogenados, metales pesados
Industrias del metal	Tricloroetileno, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halogenados, metales pesados, fenoles, cianuro
Trabajos de pintura y esmalte	Alquilbenceno, tetracloroetileno, otros hidrocarburos halogenados, metales, algunos hidrocarburos aromáticos
Industria maderera	Pentaclorofenol, algunos hidrocarburos aromáticos
Limpieza en seco	Tricloroetileno, tetracloroetileno
Fabricación de plaguicidas	Varios hidrocarburos halogenados, fenoles, arsénico
Eliminación de lodos de depuradora	Nitratos, varios hidrocarburos halogenados, plomo, zinc
Curtiduría de pieles	Cromo, diversos hidrocarburos halogenados, fenoles
Exploración/extracción de petróleo y gas	Salinidad (cloruro de sodio), hidrocarburos aromáticos
Minería metalífera y de carbón	Acidez, diversos metales pesados, hierro, sulfatos

Fuente: Adaptado de AGW-Net/BGR/IWMI/CapNet/ANBO/IGRAC (2015, cuadro 8.1, p. 9).

Los hidrocarburos son uno de los contaminantes más comunes de las aguas subterráneas. Flotan o se hunden en las aguas subterráneas en función de su densidad. Los hidrocarburos clorados, como los utilizados como disolventes o para la limpieza en seco, pueden ser cancerígenos. Solo una pequeña cantidad puede ser suficiente para contaminar grandes volúmenes de agua subterránea más allá de las pautas de seguridad. Los metales pesados, como el cromo hexavalente procedente de la industria del chapado, también son peligrosos. Otros, como el arsénico, pueden aparecer de forma natural en las aguas subterráneas y limitar su idoneidad para el uso industrial.

5.3.2 La lucha contra la contaminación de las aguas subterráneas por parte de la industria

Los sectores industrial y minero tienen un gran potencial para aumentar la eficiencia del uso del agua, estimular el reciclaje y la reutilización del agua y limitar la contaminación del agua. Para reducir o evitar los impactos negativos del uso de las aguas subterráneas industriales, se necesitarán las técnicas y métodos de la Producción más Limpia y Eficiente en el Uso de los Recursos (PRL) y el empleo de Parques Ecoindustriales (PEI) para alcanzar la meta 12.4 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) sobre producción y consumo sostenibles. Las cadenas de valor con uso eficiente de los recursos, utilizando el enfoque de la economía circular, minimizarán el consumo de materias primas, así como de agua y energía.

Los sectores industrial y minero tienen un gran potencial para aumentar la eficiencia del uso del agua, estimular el reciclaje y la reutilización del agua y limitar la contaminación del agua

El marco internacional para los parques ecoindustriales (ONUDI/Grupo del Banco Mundial/GIZ, 2021) establece que un PEI debe dar prioridad a la gestión, el uso, la eficiencia y el tratamiento sostenibles del agua. Los PEI utilizan el agua de forma responsable, teniendo en cuenta los problemas de escasez de agua locales y los depósitos de agua sensibles. Un PEI también debe planificar el aumento de la eficiencia del agua para sus empresas residentes y para el parque en su conjunto. Debido a la falta de agua superficial disponible, muchos PEI de regiones con escasez de agua tienen que extraer los recursos hídricos necesarios de las aguas subterráneas. Hay que tratar las aguas residuales y promover la circularidad del agua. El reciclaje del agua debe tener prioridad sobre los sistemas de ZLD.

Los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) son instrumentos útiles, ya que informan de las emisiones de las instalaciones industriales al agua, así como al aire y a la tierra (OCDE, s.f.). La divulgación pública, a través de organizaciones como el CDP y la Iniciativa de Información Global (GRI), también ha demostrado ser un mecanismo eficaz para el seguimiento y el impulso de la acción empresarial para reducir y evitar los impactos negativos del uso de las aguas subterráneas industriales.

Descarga de líquido cero (ZLD)

El objetivo principal de la ZLD es evitar el vertido de aguas residuales y sus impactos negativos. La ZLD pretende tratar el efluente para recuperarlo como agua limpia y reutilizarlo en el proceso industrial, convirtiendo el consumo de agua en niveles casi nulos. Como tal, es una forma de reciclaje del agua de proceso para controlar la contaminación del agua.

La ZLD se consigue por etapas: primero se hace que el efluente sea apto para el tratamiento, ya sea mediante un tratamiento físico-químico convencional, ósmosis inversa y/o tratamiento biológico. A continuación, una serie de etapas de postratamiento elimina la dureza, el limo, la turbidez y los componentes orgánicos hasta un nivel en el que no se produzca el ensuciamiento de las membranas.

El Gobierno indio ha impuesto la ZLD a su industria textil y de la confección por medio de la legislación, comenzando en 2006 en Tamil Nadu. Muchas fábricas fueron cerradas por el tribunal superior del estado, debido a su incapacidad para cumplir los requisitos de conformidad (Kiran y Rao, 2019). La política ZLD se ha ampliado a nueve estados de la cuenca del río Ganges y se ha aplicado a cinco sectores industriales: textil, pulpa y papel, destilerías,

curtidurías y azúcar. "La investigación y el desarrollo recientes sobre la ZLD la sustituyen por el concepto de vertido líquido "mínimo" (MLD) que permite recuperar hasta el 95 % de los vertidos líquidos. Esto tiene en cuenta que alcanzar el 3-5 % final de eliminación de líquidos para lograr la ZLD puede casi duplicar el coste del tratamiento" (Grönwall y Jonsson, 2017b, p. 27).

Recuperación de aguas subterráneas

Las técnicas de recuperación de aguas subterráneas tratan las aguas subterráneas contaminadas eliminando los contaminantes hasta niveles aceptables o convirtiéndolos en productos inocuos.

Se emplean tecnologías de tratamiento biológico, químico y físico, y a menudo se utiliza una combinación de tecnologías. Las técnicas de tratamiento biológico incluyen la bioaumentación, la bioventilación, el bioesparcimiento, la biosuperficie y la fitorremediación. Algunas técnicas de tratamiento químico son la inyección de gas de ozono y oxígeno, la precipitación química, la separación por membranas, el intercambio de iones, la absorción de carbono, la oxidación química acuosa y la recuperación mejorada con tensioactivos; otras pueden aplicarse utilizando nanomateriales. Las técnicas de tratamiento físico más comunes son el bombeo y el tratamiento, la aspersión de aire, la extracción de doble fase y las técnicas de membrana como la ósmosis inversa.

5.4 Explotación minera y aguas subterráneas

La minería tiene una relación diferente y más directa con las aguas subterráneas que la mayoría de los demás sectores industriales

La minería tiene una relación diferente y más directa con las aguas subterráneas que la mayoría de los demás sectores industriales. En las regiones semiáridas, puede depender totalmente de ella. La interacción de la minería con el agua dulce suele ser a través de las aguas subterráneas y la relación puede ser conflictiva. Por un lado, el agua es un activo y un recurso útil en la extracción y el procesamiento de minerales. Pero, por otro lado, suele ser un pasivo oculto. En el lado del activo de la ecuación, el agua es necesaria para extraer, separar y procesar el mineral, suprimir el polvo, transportar los lodos y lavar. En el lado de la responsabilidad, el agua subterránea es una molestia o un inconveniente, ya que tanto las minas subterráneas como las de cielo abierto requieren en muchos casos un desagüe frecuente o continuo para poder operar, y existe el riesgo de contaminar un acuífero local, que puede ser una fuente de agua potable. La eliminación del agua también plantea problemas de tratamiento si está contaminada por las actividades mineras. El alcance del desagüe y del tratamiento puede aumentar considerablemente los costes de explotación.

Por ejemplo, la minería en Polonia requiere deshidratar 1 km³ de agua al año (Kowalczyk et al., 2010). Si se parte de la base de que un hogar medio de tres personas utiliza 230 m³/año[15], esto equivale al consumo de más de 4,3 millones de hogares o de unos 13 millones de personas. El uso del agua a lo largo del ciclo minero se muestra en la figura 5.2.

La responsabilidad que conllevan las operaciones mineras que utilizan aguas subterráneas y la desecación que las acompaña puede ser onerosa en términos de traslado y tratamiento de las aguas subterráneas y de los costes asociados. Estos problemas e impactos se resumen en el cuadro 5.5. También hay cuestiones relacionadas: la seguridad de los trabajadores y los residentes locales, y los impactos en el agua potable y el medio ambiente. El hecho de que en 2020 solo dos empresas mineras informaran de que la lixiviación de contaminantes a las masas de agua subterránea constituía un riesgo pone de manifiesto que puede ser necesario prestar más atención a este respecto (CDP, sin publicar).

La contaminación de las aguas subterráneas surge comúnmente de la oxidación y disolución de la pirita del mineral sulfurado (el drenaje ácido de minas (DAM) es un problema de larga data en la industria minera), o del drenaje de aguas subterráneas salinas y lixiviados. Según

[15] Consumo medio de agua de la ciudad de Toronto. www.toronto.ca/services-payments/water-environment/how-to-use-less-water/mywatertoronto/.

Figura 5.2 Uso del agua durante el ciclo de vida de un proyecto minero



Fuente: IFC (2014, fig. 1, p. 5).

Tabla 5.5 Impactos en las aguas subterráneas de la minería activa y heredada

Naturaleza del proceso/actividades	Impactos y preocupaciones sobre las aguas subterráneas
Abastecimiento de aguas subterráneas para procesos mineros	Interferencia con los usuarios de pozos de agua preexistentes o agotamiento permanente del acuífero, especialmente en el caso de acuíferos no renovables o poco recargados en regiones áridas.
Alivio de la presión de las aguas subterráneas para la estabilidad de los taludes	Generalmente en formaciones de baja permeabilidad y principalmente una cuestión geotécnica con un impacto limitado en el sistema de aguas subterráneas.
Deshidratación de galerías y frentes de acceso a la mina	En minas/canteras grandes y/o profundas, puede dar lugar a grandes conos de influencia con impactos en los usuarios de los pozos de agua y en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.
Entrada repentina de agua subterránea en las galerías de la mina	Posible pérdida de vidas, daños a los equipos de capital y continuidad de la minería con efectos también en los manantiales y ecosistemas vinculados hidráulicamente.
Cierre de la mina con rebote del nivel freático	Puede dar lugar a nuevas zonas de descarga de aguas subterráneas y a la movilización de aguas subterráneas de mala calidad en los sistemas de flujo regionales.
Lixiviación *in situ* de minerales de interés	Riesgo de que los lixiviados fuertemente ácidos o alcalinos que transportan los minerales extraídos contaminen las aguas subterráneas.
Contaminación accidental/incidental de las aguas subterráneas por las operaciones mineras	Drenaje de aguas mineras y colas – filtración de presas que activan fuentes de contaminación y pueden afectar a la calidad de las aguas subterráneas (especialmente en la minería de carbón/lignito y de metales pesados)

Fuente: AIH (2018, p. 2).

los resultados de los estudios nacionales realizados en las décadas de 1990 y 2000, unos 9 000 km² de masas de agua subterránea estaban en riesgo de contaminación por metales en el Reino Unido (AIH, 2018). Las instalaciones de almacenamiento de relaves, habituales en muchas minas, también pueden provocar la contaminación de las aguas subterráneas (cuadro 5.1).

La minería puede utilizar las mismas tecnologías de que disponen otros sectores industriales para gestionar el agua, disminuir su uso y mejorar su eficiencia. En algunos casos, se puede utilizar agua de peor calidad. Por ejemplo, el agua salina puede ser mejor para algunos procesos de separación (Prosser et al., 2011). La gestión de las aguas subterráneas puede incorporarse a las normativas que abarcan un enfoque "de la cuna a la tumba" como parte de la concesión de licencias (AIH, 2018). Además, la industria minera, a través de sus diversas actividades, puede disponer de amplios datos internos sobre la ubicación y la extensión de los acuíferos y sus propiedades. Estos datos, si se ponen a disposición del público, se sumarían al conjunto de conocimientos y serían muy útiles para los hidrogeólogos, los gobiernos y las empresas de abastecimiento de agua.

5.5 Energía, producción de electricidad y aguas subterráneas

Se ha escrito mucho sobre el nexo entre el agua y la energía, pero hay poca información sobre el componente de las aguas subterráneas, tanto en la producción de energía como en el uso de la energía para extraer, mover y tratar las aguas subterráneas. Al igual que en el caso de la industria, los datos sobre el uso de las aguas subterráneas en el sector energético no suelen desglosarse del uso general de agua dulce o del uso autoabastecido. Dado que la disponibilidad de datos puede estar sesgada hacia los países de ingresos más altos, los datos no pueden extrapolarse fácilmente a otros países, especialmente en los que los acuíferos pueden no estar presentes o no ser fácilmente accesibles.

Cuadro 5.1 Beneficios del control de la calidad de las aguas subterráneas: el caso de AngloGold Ashanti en Cerro Vanguardia S.A. (Argentina)

Cerro Vanguardia S.A. (CVSA) es la mayor mina de oro y plata en tamaño y producción de la región de la Patagonia argentina. La operación incluye una instalación de almacenamiento de relaves (TSF), donde el residuo minero procesado se deposita continuamente en forma de lodo que contiene agua y relaves/residuos. La lechada se separa en la TSF, y el agua, que tiene trazas de cianuro residual, se recupera continuamente para su reutilización en el proceso de recuperación del oro. La TSF está rodeada por una red de pozos de control para verificar si los residuos del proceso afectan a las aguas subterráneas. El programa de control evalúa la presencia de metales pesados y cianuros.

En 2003, el control rutinario del agua identificó un pico aislado en los niveles de cianuro en un pozo de la TSF. Las investigaciones identificaron una veta de cuarzo en el lecho rocoso que actuaba como conducto, permitiendo la entrada de cianuro en las aguas subterráneas. Se inició una importante operación de movimiento de tierras para dejar al descubierto la veta bajo la presa de residuos y cubrirla con un grueso revestimiento de polietileno de alta densidad (HDPE) para evitar la filtración de agua hacia abajo. Este revestimiento de HDPE tenía dos capas de espesor, con una serie de sensores electrónicos instalados entre las capas para detectar las filtraciones a través de los revestimientos. El control continuo de las aguas subterráneas realizado desde que se instaló el revestimiento de HDPE indica que el revestimiento está impidiendo con éxito que siga entrando cianuro en las aguas subterráneas.

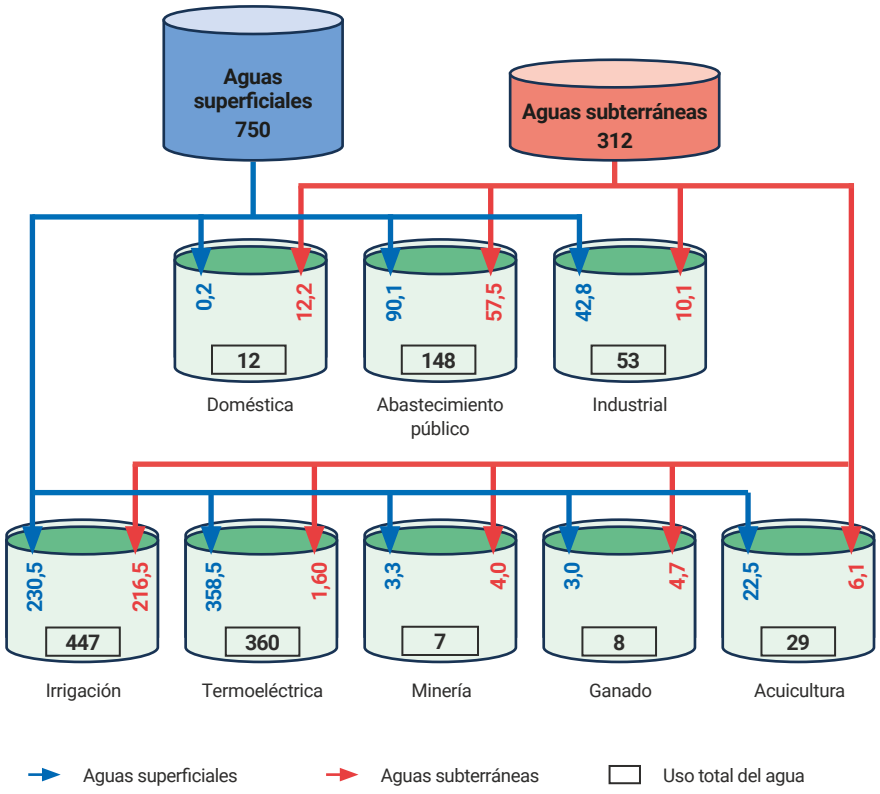
Fuente: Adaptado de ICMM (2012, pp. 28-29).

5.5.1 Uso de las aguas subterráneas en el sector de la energía

En los países con mayores ingresos se recogen algunos datos a nivel nacional. La figura 5.3 muestra un desglose del uso del agua en los Estados Unidos en 2015 (USGS, s.f.). Esta figura indica que las aguas subterráneas comprenden alrededor del 29 % del agua dulce utilizada y que solo el 0.5 % de este 29 % se utiliza para la generación de energía termoeléctrica[16], mientras que la industria utiliza el 3.2 % y la mayor parte —el 70 %— se destina a la irrigación.

Figura 5.3

Origen y uso del agua dulce en los Estados Unidos, 2015



Nota: Los datos se expresan en millones de m³/día.

Fuente: Adaptado de USGS (s.f.).

El Canadá lleva a cabo una encuesta bienal sobre el agua en la industria, que proporciona una gran cantidad de detalles sobre el uso del agua, incluido el uso de las aguas subterráneas para la energía (Statistics Canadá, s.f.). La tabla 5.6 muestra los datos de 2017 para el sector termoeléctrico. Se puede observar que, al igual que en el caso de los Estados Unidos, las aguas subterráneas representan solo un porcentaje minúsculo del uso total del agua. El análisis no publicado de CDP de los datos globales para 2020 encontró que, de las 37 empresas de generación de energía que revelaron información sobre el agua, el 57 % dependía de las aguas subterráneas (CDP, sin publicar).

No se dispone de datos sobre el uso de aguas subterráneas en la producción de energía primaria, como el petróleo y el gas. Sin embargo, en 2014, la producción de energía primaria utilizó el 12 % de las extracciones totales de agua para la energía (AIE, 2016a). El análisis no publicado de CDP de los datos de 2020 indica que, de las 52 empresas de petróleo y gas que divulgan información sobre el agua, el 85 % dependía de las aguas subterráneas (CDP, sin publicar).

[16] "Las extracciones para la energía termoeléctrica fueron de 133 Bgal/d [500 Mm³/d] en 2015 y representaron los niveles más bajos desde antes de 1970. Las extracciones de agua superficial representaron más del 99 % del total de las extracciones de energía termoeléctrica, y el 72 % de esas extracciones de agua superficial procedían de fuentes de agua dulce. ...Las extracciones de energía termoeléctrica representaron el 41 % de las extracciones totales para todos los usos, y las extracciones de agua dulce para la energía termoeléctrica representaron el 34 % de las extracciones totales de agua dulce para todos los usos." (Dieter et al., 2018, p. 1).

Tabla 5.6

Consumo de agua en la generación de energía termoeléctrica en el Canadá (2017), por fuente

Generación de energía termoeléctrica	Millones de m^3
Fuente de agua dulce, abastecimiento público, municipal	26,8
Fuente de agua dulce, autoabastecimiento, masas de agua superficiales	20 505,3
Fuente de agua dulce, autoabastecimiento, aguas subterráneas	0,4
Fuente de agua dulce, autoabastecimiento, otros	32,9
Fuente de agua salina, autoabastecimiento, aguas subterráneas	0,0
Fuente de agua salina, autoabastecimiento, aguas de marea	2 700,9
Fuente de agua salina, autoabastecimiento, otros	1,1

Fuente: Statistics Canadá (s.f.).

Los biocombustibles consumen mucha agua, y si su cultivo depende de la irrigación, las aguas subterráneas suelen ser un componente importante. Sin embargo, su huella hídrica relativa por unidad de energía parece ser significativamente menor que la de otras fuentes de energía primaria. Por ejemplo, mientras que el petróleo crudo utiliza 1,06 m^3/GJ, la biomasa en el Brasil utiliza una media de 61 m^3/GJ (Gerbens-Leenes et al., 2008).

5.5.2 Energía para el uso de las aguas subterráneas

Se presta mucha atención al lado del agua del nexo agua-energía. Sin embargo, la contribución y el uso de la energía en el sector del agua han recibido menos visibilidad, y aunque la Agencia Internacional de la Energía (AIE) ha abordado esta cuestión de forma más completa (AIE, 2016a), la segregación de información específica sobre las aguas subterráneas es, no obstante, bastante limitada.

En su informe, la AIE estimó para 2014 la energía necesaria para tratar, procesar y mover el agua en aproximadamente 120 Mtep[17] (o alrededor del 1 % del consumo total mundial de 9 425 Mtep en 2014 (AIE, 2016b)), más o menos lo mismo que la demanda total de energía de Australia. La electricidad comprende alrededor del 60 % de este total (unos 820 TWh o el 4 % del consumo total de electricidad mundial)[18], aproximadamente el consumo total de electricidad de la Federación de Rusia. Alrededor del 40 % de la electricidad para tratar, procesar y mover el agua se utiliza para extraer aguas subterráneas y superficiales[19]. Si estas estimaciones se integran con la estimación de que, a nivel mundial, las aguas subterráneas representan aproximadamente un tercio de las extracciones de agua, la extracción de aguas subterráneas está consumiendo aproximadamente 108 TWh al año, lo que representa alrededor del 0,5 % del consumo mundial de electricidad. Puede que esta cifra no parezca muy grande, pero vista desde un punto de vista local la situación puede ser muy diferente. Un ejemplo de caso extremo es la India, donde el 60 % de la electricidad utilizada en el sector del agua se destina a la extracción de aguas subterráneas. Esta cifra puede entenderse mejor si se tiene en cuenta que la India representa casi el 26 % de las aguas subterráneas extraídas en todo el mundo (Margat y Van der Gun, 2013). El bombeo de aguas subterráneas con electricidad es unas siete veces más intensiva en energía que la extracción de agua superficial (en kWh/m^3) (figura 5.4). Se espera que la demanda de electricidad para el bombeo de aguas subterráneas aumente con el aumento de la extracción de aguas subterráneas, el agotamiento de los depósitos y el consiguiente descenso del nivel del agua, junto con el abandono del

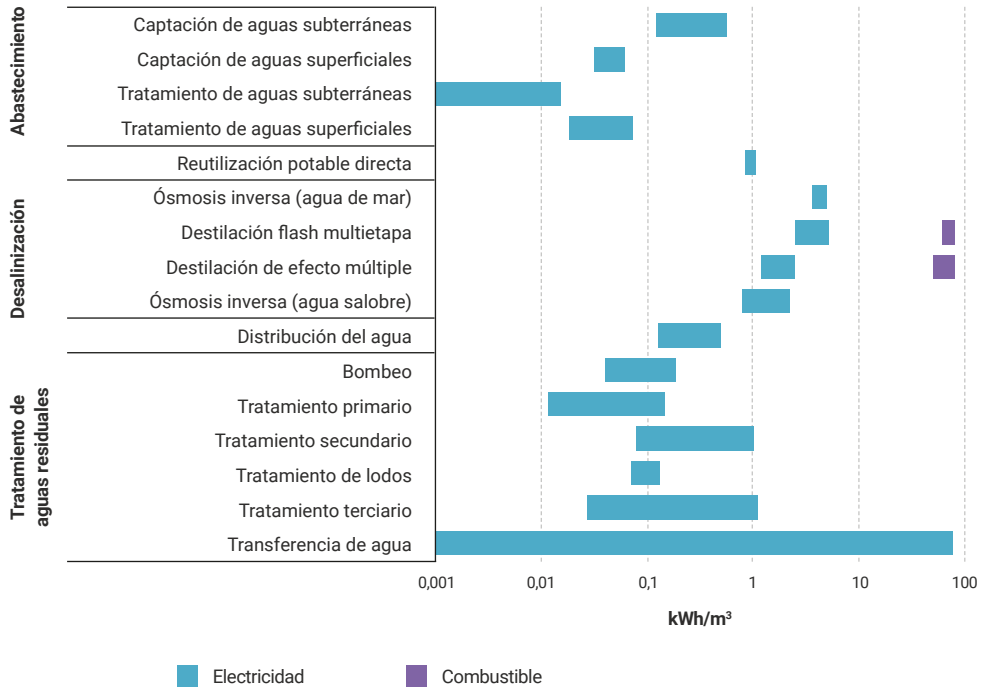
[17] Mtep = Millones de toneladas equivalentes de petróleo; 1 tep = 11,63 MWh.

[18] El resto es energía térmica, principalmente bombas de gasóleo para el bombeo de aguas subterráneas en la agricultura, y gas natural para las plantas de desalinización en Oriente Medio y el Norte de África.

[19] El tratamiento de las aguas residuales utiliza alrededor del 25 % (pero alrededor del 42 % en los países desarrollados) y la distribución utiliza alrededor del 20 %.

Figura 5.4

Energía utilizada para diversos procesos en el sector del agua



Fuente: AIE (2016a, fig. 8, p. 28).
Todos los derechos reservados.

bombeo con gasóleo. Sin embargo, existe un contraste en la intensidad energética para el tratamiento, ya que las aguas subterráneas suelen estar menos contaminadas que las superficiales y necesitan menos tratamiento. También cabe señalar que la desalinización es hasta un orden de magnitud más intensiva en energía que la extracción de aguas subterráneas (figura 5.4).

La fracturación de gas natural, especialmente en acuíferos poco profundos, también puede presentar riesgos significativos de contaminación de las aguas subterráneas

5.5.3 Energía y contaminación de las aguas subterráneas

Aunque el sector energético parece utilizar pocas aguas subterráneas, puede tener profundos efectos en la calidad de las mismas. El carbón utilizado en la generación de electricidad térmica es bien conocido por sus efectos nocivos para el medio ambiente, como las emisiones de CO_2 y mercurio y los impactos en la calidad del aire. Sin embargo, también tiene un impacto significativo en las aguas subterráneas, como resultado de la lixiviación a través de los vertederos de cenizas de carbón. Esto se ha investigado en los Estados Unidos (cuadro 5.2) y los efectos pueden durar muchos años. Dado el gran número de centrales eléctricas de carbón que hay en todo el mundo, sería justo concluir que los impactos en las aguas subterráneas a nivel global podrían ser amplios.

La fracturación de gas natural, especialmente en acuíferos poco profundos, también puede presentar riesgos significativos de contaminación de las aguas subterráneas. Las fuentes de contaminación incluyen las aguas residuales del agua de formación, el agua de retorno y los líquidos de perforación y fracturación (AIE, 2016a). Las normativas y las mejores prácticas (incluido el reciclaje y la reutilización) pueden reducir la cantidad de agua necesaria y los riesgos. Las alternativas al agua, o el uso de espuma para reducir el uso de agua, también tienen inconvenientes.

Cuadro 5.2 Vertederos de cenizas de carbón: el legado de la contaminación de las aguas subterráneas

El carbón contiene muchas sustancias químicas tóxicas, como arsénico, radio y otros carcinógenos, varios metales que pueden dañar el cerebro en desarrollo de los niños y múltiples sustancias químicas tóxicas para la vida acuática. La quema de carbón para producir electricidad concentra estas sustancias químicas tóxicas en las cenizas de carbón residuales. Durante gran parte del siglo XX, estos residuos se vertieron en balsas de residuos y vertederos sin revestimiento, lo que permitió la infiltración y la contaminación de las aguas subterráneas.

En 2015, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) finalizó una regulación federal para la eliminación de cenizas de carbón: la "Regla de Cenizas de Carbón" que estableció requisitos para el monitoreo de las aguas subterráneas. Los datos de 2018 de 4 600 pozos de monitorización de aguas subterráneas incluían más de 550 estanques de cenizas de carbón y vertederos, lo que representa más del 75 % de las plantas de carbón de los Estados Unidos. Los datos mostraron que las aguas subterráneas debajo de casi todas las plantas de carbón (91 %) están contaminadas, a veces a niveles significativos. El arsénico y el litio son comunes y la mayoría de las plantas tienen niveles inseguros de al menos cuatro sustancias químicas tóxicas que pueden filtrarse de las cenizas de carbón. Además, el problema se ve agravado por los antiguos vertederos de cenizas de carbón cerrados que no están cubiertos por la normativa.

Fuente: Adaptado de EIP (2019).

5.6 La industria y la responsabilidad de la gestión de las aguas subterráneas

La industria está prestando cada vez más atención a los riesgos y los consiguientes retos para su abastecimiento de agua dulce

La industria está prestando cada vez más atención a los riesgos y los consiguientes retos para su abastecimiento de agua dulce. En la medida en que las aguas subterráneas forman parte del abastecimiento de agua dulce, la industria debe ser cada vez más consciente de este recurso, o de la falta del mismo, ya que puede influir de forma significativa en la viabilidad del negocio, el rendimiento de las inversiones y los beneficios. Esto es especialmente significativo en las regiones áridas, donde la industria hace un mayor uso de las aguas subterráneas. El informe más reciente del CDP indica con respecto a los riesgos del agua que los costes de la inacción (301 mil millones de dólares) frente a la acción (55 mil millones de dólares) son cinco veces mayores (CDP, 2021). Este es el caso de la mayoría de los sectores, con la excepción de la generación de energía y las infraestructuras, ya que se están realizando grandes inversiones para la transición de las carteras energéticas. Además, las oportunidades de negocio para invertir en la seguridad del agua se estiman en 711 mil millones de dólares.

En 2018, se había producido un descenso del 7 % en el número de empresas que extraían agua de las aguas subterráneas no renovables, pero al mismo tiempo se produjo un aumento significativo de las empresas que informaban de extracciones de todas las fuentes, incluidas las aguas subterráneas renovables (CDP, 2018). El informe de CDP para 2020 afirma que *"casi dos tercios de las empresas que respondieron están reduciendo o al menos manteniendo sus extracciones de agua"*, pero solo el 4,4 % informa de mejoras en relación con la contaminación del agua (CDP, 2021, p. 4). El análisis no publicado de CDP de los datos de 2020 sugiere que el número de empresas que mantienen o reducen sus extracciones de agua subterránea renovable y no renovable ha saltado al 25 % (721/2934) (CDP, sin publicar).

Para actuar a nivel de planta con respecto a los riesgos de las aguas subterráneas, dentro de la línea de valla hay muchas tecnologías y prácticas de gestión disponibles para aumentar la eficiencia del agua y reducir su uso. Las auditorías del agua y las huellas hídricas identifican las áreas débiles del uso del agua, y se pueden introducir medidas centradas en el vertido cero, la reutilización y el reciclaje del agua para cubrir las lagunas. Estas medidas también pueden fomentarse con las empresas de la cadena de abastecimiento. Si las aguas subterráneas forman parte del presupuesto hídrico, formarán parte de estas medidas de eficiencia y podrán vincularse a las iniciativas de RECP. Estos esfuerzos pueden ampliarse hasta convertirse en PEI, en las que las industrias cooperan de forma simbiótica en una variedad de entradas y

salidas necesarias, como la energía, los residuos y el agua. El siguiente paso es hacia una economía circular, que puede funcionar a escala local y regional con aspiraciones a nivel nacional y en la que la sostenibilidad de las aguas subterráneas será una parte integral.

Los instrumentos económicos han adoptado una perspectiva más amplia en los últimos años, ya que las instituciones financieras en los préstamos a empresas están prestando atención al nivel de riesgo del agua, que naturalmente incluye las aguas subterráneas. El CDP advierte de los peligros para "*la reputación, los ingresos y la estabilidad financiera*" de los riesgos del agua (CDP, 2018, p. 11). Las instituciones financieras buscan que las empresas "*desvinculen la producción y el consumo del agotamiento de los recursos hídricos*" (p. 11). El CDP informa para 2020 que 2 934 empresas de 5 537 (más de la mitad) revelaron datos sobre el agua cuando se los pidieron sus inversores o clientes empresariales (CDP, 2021).

Sin embargo, para acceder a los recursos de aguas subterráneas y utilizarlos de forma sostenible, es necesario cooperar, compartir y asociarse con las muchas otras partes interesadas en las aguas subterráneas para la gestión general del recurso, es decir, la administración (cuadro 5.3). Este enfoque valora el agua de muchas maneras, desde la contabilidad económica y el valor monetario, pasando por el valor medioambiental, hasta los valores socioculturales, como los valores recreativos, culturales y espirituales (Naciones Unidas, 2021). En la figura 5.5 se muestran algunos de los principales impulsores del valor empresarial y corporativo. Varias organizaciones promueven activamente la gestión empresarial del agua y publican directrices. Entre ellas se encuentran la Alliance for Water Stewardship (AWS) y el CEO Water Mandate.

La definición de la geografía de la custodia tiene también una dimensión diferente. A diferencia de las aguas superficiales, donde las cuencas fluviales forman territorios naturales de gestión, los límites de los acuíferos están menos definidos y a menudo son difíciles de definir. Las personas que participan en la gestión de un recurso hídrico subterráneo pueden abarcar un área mucho más amplia y muchas más partes interesadas.

Cuadro 5.3 Asociación entre PT Multi Bintang y la ONUDI

En Java Oriental, la empresa indonesia de explotación de Heineken, PT Multi Bintang, en cooperación con la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), ha catalizado una asociación público-privada para superar la escasez de agua. Basándose en las inversiones piloto de PT Multi Bintang y en el establecimiento de Aliansi Air como plataforma de múltiples partes interesadas, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) aprobó un proyecto de ampliación en marzo de 2021. Con un presupuesto aprobado por el FMAM de 1,8 millones de dólares, el Ministerio de Medio Ambiente y Silvicultura (MOEF) y la ONUDI establecerán pozos de absorción, planes agroforestales y bosques de bambú ribereños. Esto mejorará la retención de agua en el área de captación, mejorará la percolación del agua y aumentará la reposición de las aguas subterráneas. El proyecto dará lugar a la retención y reposición de los acuíferos en aproximadamente 1 millón de m^3/año. Estas medidas fueron identificadas por las partes interesadas del gobierno, la sociedad civil, el mundo académico y el sector privado en un taller participativo e inclusivo de participación de las partes interesadas como requisito previo para garantizar el abastecimiento sostenible de agua a las personas y las empresas. A medida que el proyecto evolucione, se identificarán las oportunidades de ampliarlo a las otras 14 áreas de captación prioritarias seleccionadas por el gobierno de Indonesia. Esto se hará en estrecha colaboración con el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la división indonesia de la Alianza para la Gestión del Agua y la recién creada Coalición para la Resiliencia del Agua, que ha reunido a las principales entidades del sector privado indonesio interesadas en participar y cooperar en la gestión del agua.

Fuente: ONUDI (sin publicar).

Figura 5.5

Impulsores de valores corporativos y comunitarios para la gestión del agua



Fuente: IFC (2014, fig. 2, p. 9).

5.7 Avanzar

La industria y la energía suelen utilizar menos agua que otros sectores importantes de consumo de agua, como la agricultura y los municipios, y, en consecuencia, muchas menos aguas subterráneas. Sin embargo, pueden tener un impacto muy significativo en la calidad de las aguas subterráneas a través de vertidos, derrames y lixiviación de residuos. Esto no quiere decir que la industria y la energía deban abandonar el uso de las aguas subterráneas; de hecho, su uso de las aguas subterráneas podría aliviar la presión sobre los recursos hídricos superficiales liberándolos en beneficio de otros usuarios. La industria privada y el sector energético tienen la flexibilidad necesaria para actuar con rapidez y los medios disponibles para contribuir eficazmente al uso sostenible de las aguas subterráneas con respecto a la cantidad y la calidad, algo de lo que a veces carecen otros sectores más públicos.

La industria y la energía tienen más control, a través de sus estructuras de propiedad y organización, sobre la cantidad de agua subterránea que utilizan. Por ello, pueden actuar con mayor agilidad y rapidez que los gobiernos. La reutilización y el reciclaje del agua, las iniciativas de vertido cero, los proyectos RECP y los PEI se centran en utilizar menos agua. Estas actividades, a su vez, forman parte del cambio hacia una industria más ecológica, la gobernanza medioambiental y social, y la gestión del agua en la industria y la energía. Pueden encajar en las mejoras de la Industria 4.0[20] (véase Naciones Unidas, 2021, capítulo 6, p. 93) y en planes y actividades sociales y gubernamentales más amplios, como la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), y el avance hacia las economías circulares. Incluso el sector financiero está ejerciendo ahora su considerable influencia sobre la inversión sostenible y esto tendrá un efecto en cadena, favoreciendo a los clientes, incluidos los de la industria y la energía que necesitan financiación y utilizan las aguas subterráneas de forma sostenible, y animando a otros a hacerlo.

[20] La Industria 4.0 es la transformación digital de la fabricación/producción y las industrias relacionadas y los procesos de creación de valor.

Capítulo 6

Aguas subterráneas y ecosistemas

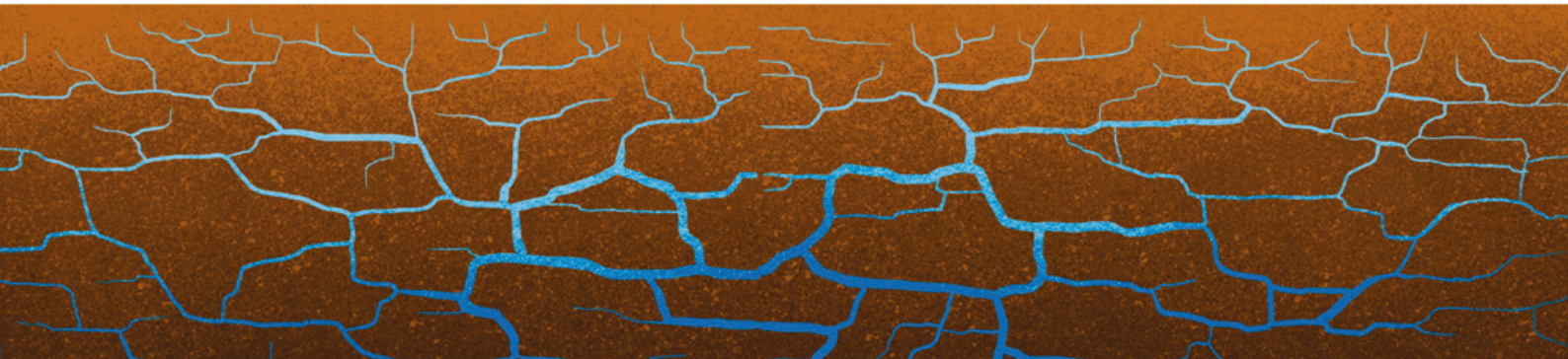
Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos
Tom Gleeson, Xander Huggins[*] y Richard Connor

Relator Especial sobre los derechos humanos al agua potable y al saneamiento
Pedro Arrojo-Agudo y Enric Vázquez Suñé[**]

Con contribuciones de Karen Villholth (IWMI), Melissa Rohde (TNC),
Jac van der Gun (WWAP), David Kreamer y Marisol Manzano (AIH),
Luciana Scrinzi y Giuseppe Arduino (UNESCO-PHI), Tales Carvalho Resende (UNESCO WHC),
Nils Moosdorf (Universidad de Kiel), Virginia Walsh (WASD) y Astrid Harjung (OIEA)

[*] Instituto Global para la Seguridad del Agua e Universidad de Victoria.

[**] IDÆA-CSIC.



6.1 Introducción a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas

Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE) están formados por plantas, animales y hongos que dependen del flujo, la temperatura o las características químicas de las aguas subterráneas para satisfacer todas o algunas de sus necesidades de agua (Murray et al., 2003; Foster et al., 2006; Kløve et al., 2011) (figura 6.1). Los GDE son extremadamente diversos y pueden dividirse en tres clases basadas en la expresión del agua subterránea dentro del ecosistema (Eamus et al., 2015; figura 6.2). Estas incluyen:

- GDE acuáticos, que dependen de la interacción de las aguas subterráneas y superficiales, como manantiales, humedales y estuarios, así como de la descarga de aguas subterráneas y del flujo de base en ríos, arroyos, humedales y zonas costeras;
- GDE terrestres, que dependen de las aguas subterráneas ecológicamente accesibles; y
- los GDE subterráneos, que dependen de los acuíferos y los sistemas kársticos, incluidas las zonas hiporreicas de los ríos y las llanuras de inundación.

Aunque constituyen clases diferentes, los GDE pueden estar estrechamente vinculados y depender de las mismas aguas subterráneas, como puede ser el caso de la vegetación ribereña junto a un río, y del propio ecosistema fluvial. Los GDE contienen especies endémicas que dependen de las condiciones de vida creadas por las aguas subterráneas. Los GDE también pueden ser focos de asentamientos humanos, centros de prácticas religiosas y culturales, e incluso fuente de conflictos (Kreamer et al., 2015; Naciones Unidas, 2021).

Figura 6.1

Ejemplo de un ecosistema dependiente de las aguas subterráneas: una vista aérea de las llanuras de inundación y las islas en el Delta del Okavango (Botswana)

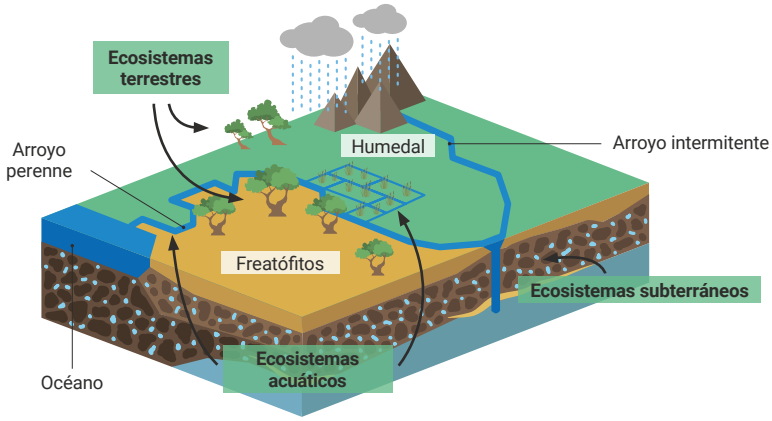


Fuente:
Vadim Petrakov/Shutterstock.

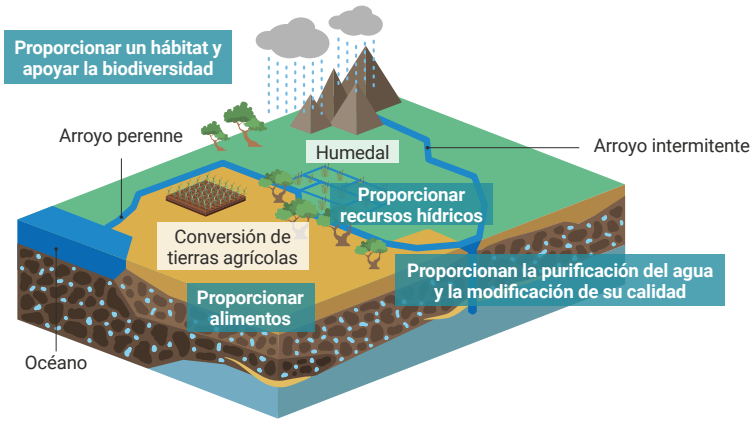
La dependencia de las aguas subterráneas puede ser continua, estacional u ocasional, y se pone de manifiesto cuando una especie pierde el acceso a las aguas subterráneas durante el tiempo suficiente para mostrar una respuesta negativa, como la reducción del crecimiento o la reproducción, o el aumento de la mortalidad. Algunas especies dependen completamente de las aguas subterráneas, como las que dependen de manantiales o de la afluencia constante de caudal base a ríos, lagos o zonas costeras. Pero la dependencia de las aguas subterráneas puede ser más difícil de discernir en el caso de otras especies, ya que una combinación de fuentes de agua (por ejemplo, aguas subterráneas, aguas superficiales, precipitaciones, flujo de retorno de la irrigación, escurrimiento de aguas pluviales) proporciona ciertas condiciones de vida en diferentes estaciones o en diferentes etapas de la vida.

Figura 6.2 Interacciones entre las aguas subterráneas, los ecosistemas, la actividad humana y las soluciones basadas en la naturaleza

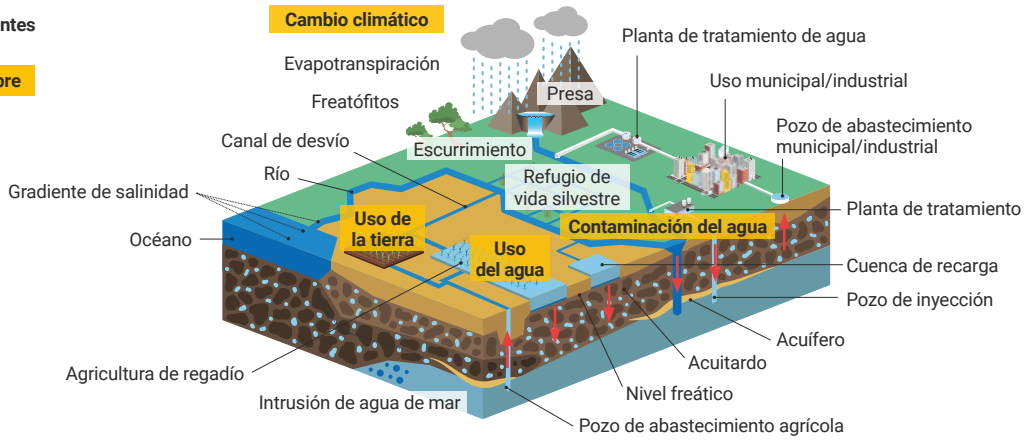
a) **Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas** se encuentran desde los valles de alta montaña hasta el fondo de los océanos como...



b) **Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas prestan numerosos servicios ecosistémicos**



c) **Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas sufren el impacto del hombre**



d) **Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas apoyan las soluciones basadas en la naturaleza**



Fuentes: a)-c) Basado en Maven's Notebook (2015). d) Basado en Villholth y Ross (s.f.).

Cuadro 6.1 Cartografía de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en California (Estados Unidos)

La cartografía de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE) es el primer paso para su gestión. Hasta la fecha, la cartografía de los GDE ha sido un proceso predominantemente localizado que requería una revisión por parte de expertos y estudios de campo que requerían mucho tiempo para verificar la dependencia de los ecosistemas de las aguas subterráneas. En California, los GDE se cartografiaron por primera vez utilizando un enfoque basado en la inferencia que se basaba en las características hidrológicas del paisaje (manantiales, humedales y ríos apoyados por el flujo de base; Howard y Merrifield, 2010). Este mapa dio lugar a requisitos específicos para identificar y considerar los impactos en los GDE en virtud de la Ley de Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas de California (SGMA). Para ayudar a los organismos locales a identificar los GDE en sus cuencas, el mapa se perfeccionó utilizando la cartografía de la vegetación a partir de fotografías aéreas (Klausmeyer et al., 2018) y el conjunto de datos espaciales proporcionado en línea*. El mapeo de GDE a escalas de paisaje más amplias es cada vez más posible a través de la teledetección y los análisis espaciales utilizando sistemas de información geográfica (Eamus et al., 2015). The Nature Conservancy está liderando un esfuerzo de mapeo global de GDE, utilizando Google Earth Engine para procesar conjuntos masivos de datos globales de teledetección y uso del suelo y del clima, que se publicarán en 2022.

Cartografía de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en California



Fuente: Elaborado por los autores a partir de la base de datos del NCCAG (Klausmeyer et al., s.f.).

* gis.water.ca.gov/app/NCDatasetViewer/.

** Las cuencas SGMA se refieren a las cuencas de alta prioridad según la Ley de Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas (SGMA) de California.

Se han cartografiado los GDE de algunas jurisdicciones, como California (Estados Unidos; cuadro 6.1) y Australia (Doody et al., 2017). La cartografía es un componente importante en el campo interdisciplinario emergente de la ecohidrogeología, cuyo objetivo es colmar las lagunas de conocimiento existentes entre la hidrología, la hidrogeología y la ecología (Cantonati et al., 2020) utilizando una diversidad de métodos (Eamus et al., 2015; Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013; Kalbus et al., 2006, Murray et al., 2003).

6.2 Ubicuidad de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas

Los ecosistemas acuáticos dependientes de las aguas subterráneas pueden encontrarse en una gran variedad de paisajes, desde los valles de alta montaña hasta el fondo del océano e incluso en los desiertos. Posiblemente, los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas más evidentes son los manantiales: ecosistemas muy diversos, endémicos y abundantes que se encuentran en más de 2,5 millones de lugares, incluyendo cuevas, oasis, fuentes, géiseres y filtraciones (Cantonati et al., 2020). Aunque son pequeños, los hábitats de los manantiales son excepcionalmente biodiversos. Un estudio realizado en el norte de Arizona (Estados Unidos) detectó el 20 % de la flora de todo un bosque en manantiales que representaban <0,001 % del paisaje (Kreamer et al., 2015). Los oasis del desierto son grandes manantiales y, sin embargo, han recibido poca atención en la literatura sobre ecosistemas dependientes de aguas subterráneas a pesar de su prominencia mundial (774 oasis están documentados en el Atlas de Oasis del Sáhara y Arabia y la Lista Ramsar de Humedales de Importancia Internacional incluye 225 manantiales y oasis de agua dulce, reportados en conjunto).

Los ecosistemas acuáticos dependientes de las aguas subterráneas pueden encontrarse en una gran variedad de paisajes, desde los valles de alta montaña hasta el fondo del océano e incluso en los desiertos

La ecología de muchos humedales, lagos, ríos y otras masas de agua superficiales depende de las complejas interacciones entre las aguas subterráneas y las superficiales, que pueden cambiar con el tiempo a lo largo de las estaciones o los años, así como según la ubicación en un humedal, lago o río (Swanson et al., 2021; Kreamer y Springer, 2008). Los humedales se mencionan aquí de acuerdo con su definición según el artículo 1.1 de la Convención de Ramsar como "*áreas de marismas, pantanos, turberas o aguas, ya sean naturales o artificiales, permanentes o temporales, con aguas estáticas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las áreas de aguas marinas cuya profundidad en marea baja no supere los seis metros*" (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013).

La descarga de aguas subterráneas apoya los flujos de base de arroyos y ríos, una fuente de agua crucial que determina el riesgo de que un arroyo o río se seque durante los periodos de sequía (Boulton y Hancock, 2006; Larned et al., 2010). El flujo de base puede contribuir a casi el 100 % del flujo de los arroyos en algunas regiones húmedas (Beck et al., 2013) (figura 6.3). Por el contrario, el flujo de base puede ser un contribuyente insignificante al flujo de los arroyos en muchas regiones áridas. En estos entornos, las redes de arroyos efímeros pueden ser importantes fuentes de recarga de aguas subterráneas (Cuthbert et al., 2016). Los acuíferos en percha pueden servir como importantes apoyos a los ecosistemas de aguas superficiales, ya que los niveles de agua subterránea tienden a bajar sobre todo debido a la evaporación, y no a la filtración hacia abajo. Ejemplos importantes de ello son las charcas de los arroyos efímeros que pueden conservar cierta biodiversidad durante los periodos de ausencia de caudal debido a la supervivencia en estas masas de agua aisladas (Bonada et al., 2020).

La descarga de aguas subterráneas en entornos marinos es un fenómeno omnipresente en las costas (Luijendijk et al., 2020). Crea ecosistemas únicos donde se mezclan el agua salada y el agua dulce (Lecher y Mackey, 2018) y puede ser una fuente sustancial de nutrientes para las aguas costeras y de estuario. Esto puede conducir a la eutrofización y la hipoxia, especialmente cuando las cuencas de captación aguas arriba están muy desarrolladas a través de la agricultura intensiva y la urbanización (Santos et al., 2021; Hosono et al., 2012).

Las elevadas salinidades de los entornos costeros terrestres de sabkha[21] se sustentan sobre todo en las aguas subterráneas, que aportan solutos que permanecen tras la evaporación del agua y crean estos biomas especiales (Yechieli y Wood, 2002). En aguas de alta salinidad como las del Mar Muerto, la afluencia de aguas subterráneas sostiene ecosistemas locales que, de otro modo, no podrían tolerar la salinidad (Ionescu et al., 2012). En muchas áreas desérticas del interior, también es habitual la presencia de valiosos humedales con ecologías delicadas en los márgenes de los salares (Marazuela et al., 2019). Los ecosistemas terrestres dependen de las aguas subterráneas en paisajes gestionados y naturales en todos los biomas antropogénicos (Ellis y Ramankutty, 2008) en todo el mundo donde las aguas subterráneas son accesibles para las plantas (Fan et al., 2017; figura 6.2a). El impacto de las diferentes copas de los bosques en la infiltración y la recarga es objeto de debate (Ellison et al., 2017). Incluso el efecto de la silvicultura en la recarga de las aguas subterráneas y los flujos de temporada baja es variable, con diferentes impactos en diferentes regiones y climas, así como en diferentes etapas del ciclo forestal (Reynolds y Thompson, 1988). Los impactos de la vegetación aún no se han investigado a fondo ni se han integrado en la gestión de la recarga de las aguas subterráneas. En el Sahel, los niveles de agua subterránea han aumentado durante décadas, principalmente como resultado de los cambios en la vegetación, que ha pasado de ser una vegetación natural de raíces profundas a cultivos poco profundos que consumen menos agua (Favreau et al., 2009). Los abrevaderos de los entornos áridos suelen alimentarse exclusivamente de aguas subterráneas, por lo que estas son cruciales para mantener las complejas redes alimentarias de los paisajes áridos, como las sabanas. Los pozos de agua excavados por la fauna silvestre pueden servir de sustento a la vida, y demuestran el intrincado vínculo existente entre las aguas subterráneas, el apoyo al ecosistema y la biodiversidad (Lundgren et al., 2021). En los biomas de las tierras de cultivo y los pastizales, las aguas subterráneas apoyan la ecología de los paisajes gestionados y naturales, incluso si estos paisajes se ven normalmente desde una perspectiva agrícola más que ecológica. Por último, las zonas ribereñas, los humedales y otras masas de agua superficiales dependen a menudo de las aguas subterráneas y pueden proporcionar servicios ecosistémicos cruciales. Por ejemplo, en las áreas más húmedas, los bosques ribereños y los humedales pueden depurar los escurrimientos y drenajes ricos en nitrógeno procedentes de las actividades agrícolas y ganaderas (Bahn y An, 2020), reduciendo la carga de nutrientes en los GDE. Por el contrario, en áreas más áridas, las inundaciones estacionales pueden mejorar la recarga de las aguas subterráneas en las llanuras de inundación, mientras que la sedimentación puede proporcionar importantes enmiendas que mejoran los nutrientes y el suelo (Talbot et al., 2018).

Las interacciones entre las aguas subterráneas y los ecosistemas son cada vez más importantes en los principales ecosistemas de agua dulce del mundo

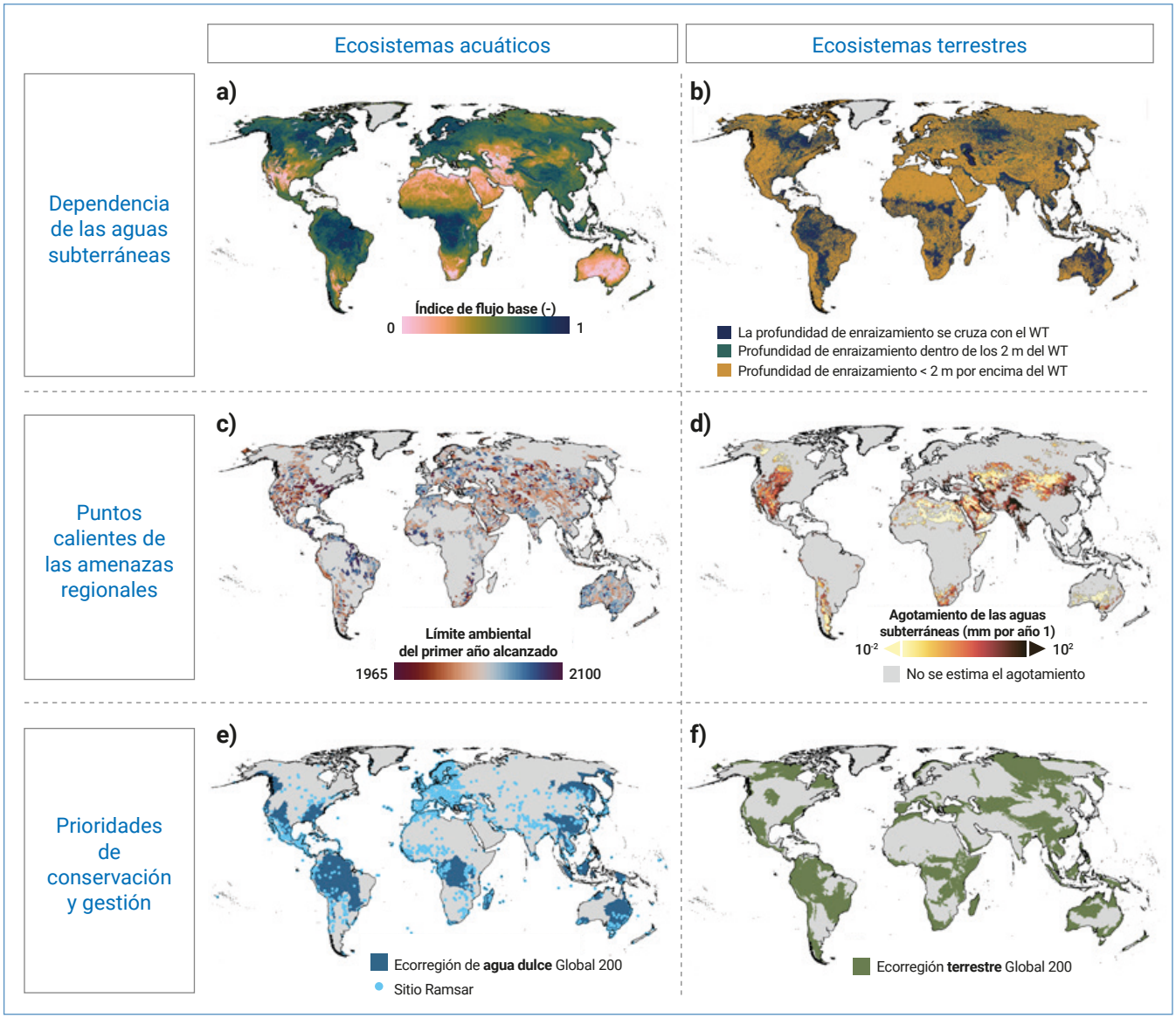
Los ecosistemas subterráneos son omnipresentes, pero, en general, poco conocidos. En todos los acuíferos se encuentran organismos y microorganismos en composición y abundancia variables (Humphreys, 2006, Danielpol et al., 2003). Estos ecosistemas subterráneos a menudo ayudan a purificar el agua y tienen un impacto en el almacenamiento de los acuíferos, a veces aumentando el almacenamiento a través de la bioturbación y la alimentación de las capas biológicas y otras veces disminuyendo el almacenamiento a través de la obstrucción del espacio de los poros. En muchos lugares, el uso de la tierra influye fuertemente en la abundancia, la composición y la estructura de la comunidad de invertebrados de las aguas subterráneas; Tione et al. (2016) describen un ejemplo situado en la Argentina. Dado que los ecosistemas subterráneos son sensibles a los cambios en la calidad de las aguas subterráneas, el seguimiento de la abundancia y otros bioindicadores dentro de estos ecosistemas puede proporcionar enfoques alternativos y útiles para el seguimiento de los cambios en la calidad de las aguas subterráneas (Griebler y Avramov, 2015).

Las interacciones entre las aguas subterráneas y los ecosistemas son cada vez más importantes en los principales ecosistemas de agua dulce del mundo, como los que se encuentran en la lista de ecorregiones de agua dulce prioritarias para la conservación mundial (Olsson et al., 2002; figura 6.3e), incluidos algunos ríos del este de Australia, el río Indo, el río Congo, el río Amazonas, el río Colorado; y otros complejos de humedales notables

[21] Una marisma costera, supra mareal o arenisca en la que los minerales evaporitas-salinos se acumulan como resultado de un clima semiárido a árido.

como el delta del Okavango en el sur de África, los pantanos de Sudd en el Sudán del Sur, el delta interior del Níger en el Sahel y el Pantanal en Sudamérica. Estas regiones no solo proporcionan un hábitat para niveles de biodiversidad significativos a nivel mundial, sino que también son cruciales para procesos más amplios del sistema terrestre, como el ciclo de los nutrientes, el secuestro de carbono y los procesos de agua y energía atmosféricos (Erwin, 2009). El hecho de que muchas de estas regiones experimenten habitualmente sequías (este de Australia), sufran un continuo agotamiento de las aguas subterráneas (río Indo, río Colorado) o experimenten un almacenamiento de aguas subterráneas cada vez más variable o anómalo debido al cambio climático (delta del Okavango; Hughes et al., 2011) es indicativo de la amplitud y gravedad de las implicaciones derivadas de las amenazas a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en todo el mundo (sección 6.3).

Figura 6.3 Patrones globales de dependencia de las aguas subterráneas, puntos calientes de amenazas regionales y prioridades de conservación y gestión de los ecosistemas acuáticos y terrestres



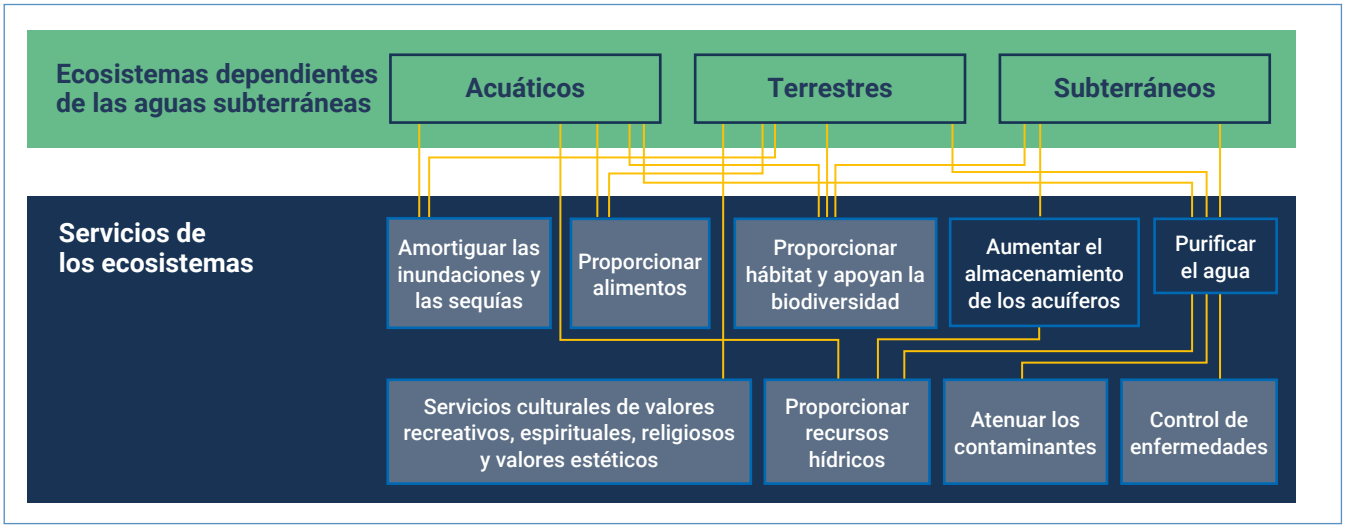
Nota: a) índice de flujo de base, que representa la contribución relativa al flujo de los arroyos de las aguas subterráneas y otras fuentes retrasadas; b) relación entre la profundidad de la capa freática en estado estacionario (WT) y la profundidad máxima de enraizamiento; c) año estimado en el que se alcanza el límite de flujo ambiental (sección 6.4); d) tasas de agotamiento de las aguas subterráneas; e) Sitios Ramsar, que identifican los humedales de importancia internacional y las ecorregiones de agua dulce Global 200; y f) ecorregiones terrestres Global 200. Las ecorregiones Global 200 son un conjunto priorizado de 238 ecorregiones (53 terrestres, 142 de agua dulce y 43 marinas —no incluidas aquí—) desarrolladas para proteger regiones de biodiversidad excepcional y ecosistemas representativos.

Fuentes: Autores, a partir de datos de: a) Beck et al. (2013); b) Fan et al. (2013, 2017); c) De Graaf et al. (2019); d) Wada et al. (2010); e) Servicio de Información sobre Sitios Ramsar (s.f.) y Olson y Dinerstein (2002); y f) Olson y Dinerstein (2002).

6.3 Servicios ecosistémicos de las aguas subterráneas y amenazas

Los GDE acuáticos y terrestres proporcionan hábitat, mantienen la biodiversidad, amortiguan las inundaciones y las sequías y proporcionan alimentos, además de ofrecer servicios culturales, recreativos, espirituales y estéticos. A lo largo de la historia de la humanidad, los manantiales han inspirado el arte y la música, han sido objeto y herramienta estratégica en conflictos y guerras, y han constituido puntos focales para ceremonias y creencias religiosas (Kreamer et al., 2015). Muchas culturas indígenas creen que los manantiales, los humedales y sus ecosistemas asociados tienen un valor intrínseco más amplio que los servicios que prestan a las personas (Naciones Unidas, 2021). Los ecosistemas subterráneos también proporcionan importantes servicios ecosistémicos, como el almacenamiento y el suministro de recursos hídricos, la atenuación de contaminantes y el control de enfermedades (Griebler y Avramov, 2015). Estos servicios se denominan a veces servicios ecosistémicos relacionados con las aguas subterráneas (Manzano y Lambán, 2011). Los GDE y los servicios ecosistémicos, que están vinculados con la vegetación y los suelos en las zonas no saturadas, desempeñan funciones críticas en la protección de los acuíferos de la contaminación al garantizar la separación física, permitiendo procesos biofísicos como la filtración, la biodegradación y la sorción de contaminantes, y facilitando y protegiendo la recarga natural (CGIAR WLE, 2015).

Figura 6.4 Conexión de los tipos de ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas con los servicios ecosistémicos que proporcionan



Fuente: Autor.

Los GDE y los servicios están generalmente infrarrepresentados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. La importancia de las aguas subterráneas está poco reconocida y captada a nivel de las metas de los ODS, lo que se ve agravado por la falta de datos sobre las aguas subterráneas útiles, actualizados y relevantes para los ODS a nivel mundial y la falta de claridad sobre los vínculos esenciales entre los acuíferos y los ODS (Guppy et al., 2018). El papel de las aguas subterráneas en los ecosistemas acuáticos está relacionado con la meta 6.4 (Uso y escasez de agua) y la meta 6.6 (Ecosistemas relacionados con el agua). La meta 6.4, la única meta de los ODS que actualmente operacionaliza los servicios de aguas subterráneas y ecosistemas, incorpora los "flujos ambientales" en el indicador 6.4.2 de "estrés hídrico". Cuenta con una metodología y una herramienta en línea para calcular la extracción sostenible de aguas subterráneas vinculada a las directrices sobre la evaluación del caudal ambiental (FAO, 2019). La meta 6.6 supervisa los cambios a lo largo del tiempo en los ecosistemas relacionados con el agua, como los humedales con vegetación, los ríos, los lagos, los embalses y las aguas subterráneas (Dickens et al., 2017). Sin embargo, hasta la fecha, la recopilación de datos se ha centrado en la extensión espacial de las aguas abiertas, sin centrarse en las aguas subterráneas, ni en la diferenciación o la cartografía de los GDE, un importante eslabón que falta en la metodología de los ODS.

Los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas y los servicios ecosistémicos relacionados están amenazados por el agotamiento de las aguas subterráneas, el cambio climático y los cambios en el uso del suelo (figuras 6.2, 6.3 y 6.5). El agotamiento de las aguas subterráneas, la disminución persistente de los niveles de agua, afecta a los ecosistemas acuáticos y terrestres (figura 6.5). En todo el mundo existen puntos calientes de agotamiento de las aguas subterráneas (figura 6.3d), a menudo en regiones con una intensa extracción de agua subterránea para la irrigación. El agotamiento de los caudales, es decir, la disminución de los caudales debido al bombeo de aguas subterráneas, es una preocupación importante para los ecosistemas acuáticos (Gleeson y Richter, 2017). Los impactos ecológicos del agotamiento de los caudales (figura 6.3c) se producen cuando los caudales están por debajo de los caudales ambientales (definidos en la sección 6.4), lo que se prevé que ocurra en aproximadamente el 40 al 80 % de todas las cuencas con bombeo activo de agua subterránea para mediados de siglo (De Graaf et al., 2019).

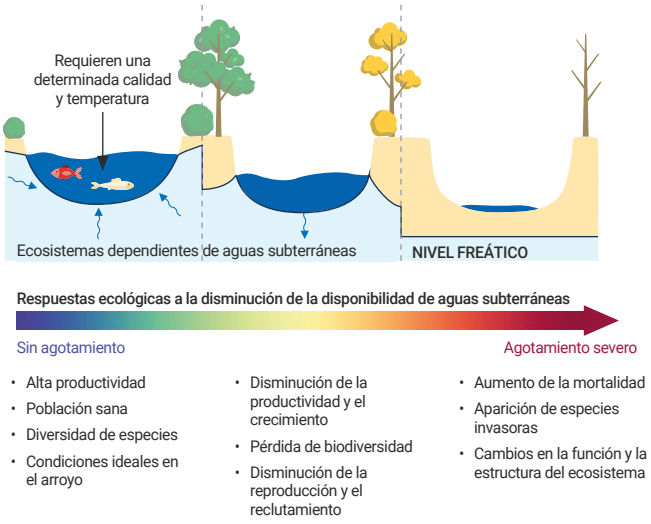
La calidad del agua, la temperatura y la contaminación afectan a los GDE y a los servicios que prestan

Existe una importante desecación de manantiales, humedales y oasis en todo el mundo. Es importante tener en cuenta las repercusiones del cambio climático en los GDE (Kløve et al., 2014), sobre todo porque las aguas subterráneas suelen actuar como amortiguadores durante la sequía, ya sea de forma natural al alimentar arroyos en periodos secos, o de forma indirecta al aumentar el uso humano durante dichos periodos. Socavar estas funciones puede ser perjudicial para los sistemas humanos y ecológicos. Por último, los cambios en el uso del suelo afectan a los GDE. Por ejemplo, la pérdida de bosques secos ha provocado la salinización regional en Australia (Clarke et al., 2002) y en la región del Chaco de la Argentina y el Paraguay (Giménez et al., 2016; Marchesini et al., 2013).

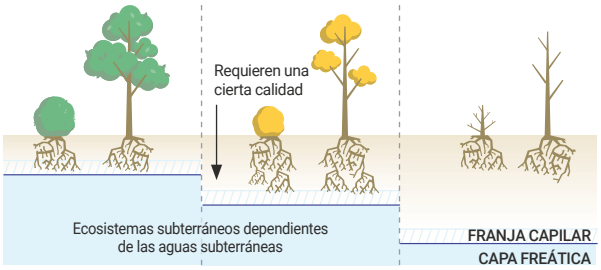
La calidad del agua, la temperatura y la contaminación afectan a los GDE y a los servicios que prestan (figura 6.5). La cantidad de agua subterránea (volumen, nivel, flujo y sus variaciones en el tiempo) es la consideración principal de este capítulo, pero la calidad del agua subterránea (natural y afectada por los impactos humanos) y la temperatura también son esenciales. Cada ecosistema está condicionado por requisitos específicos de calidad del agua, y lo que es apropiado en ciertos ecosistemas puede ser perjudicial en otros. Por ejemplo, la salinidad en los humedales costeros o en las salinas es necesaria para estos ecosistemas. Sin embargo, en otros entornos, como los ecosistemas terrestres, un aumento de la salinidad debido a la elevación artificial de las capas freáticas como consecuencia del cambio de uso de la tierra (por ejemplo, la deforestación en Australia) o la irrigación excesiva (por ejemplo, en el valle inferior del Indo, en el Pakistán) puede provocar la degradación del hábitat, la disminución de la producción agrícola, la erosión del suelo, la alteración del ciclo biogeoquímico y la disminución del almacenamiento de carbono (Foster y Chilton, 2003). La contaminación geogénica (es decir, con contaminantes químicos de origen natural) afecta a la salud de millones de personas en todo el mundo, y también puede repercutir en los GDE, un problema que requiere más atención (Bretzler y Johnson, 2015). Los GDE pueden verse afectados por contaminantes orgánicos conocidos y emergentes (pesticidas, productos farmacéuticos, drogas recreativas, tensioactivos y productos de cuidado personal), y por la contaminación por nutrientes procedente de las aguas residuales domésticas y urbanas y de la agricultura. Los contaminantes orgánicos y sus productos de degradación pueden causar problemas de salud, incluidos los efectos sobre el desarrollo y la reproducción en los seres humanos, la fauna y los ecosistemas (Campbell et al., 2006). Los estudios anteriores sobre el impacto de la contaminación en los ecosistemas se han centrado en las aguas superficiales. Se sabe menos sobre los ecosistemas afectados por la contaminación de las aguas subterráneas.

Figura 6.5
Impactos ecológicos de la disminución de la calidad y cantidad de las aguas subterráneas

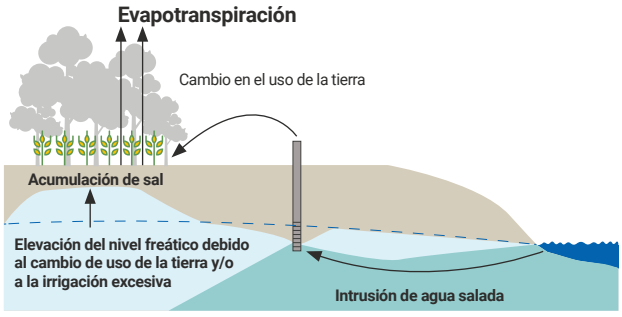
a) Ecosistemas acuáticos dependientes de las aguas subterráneas



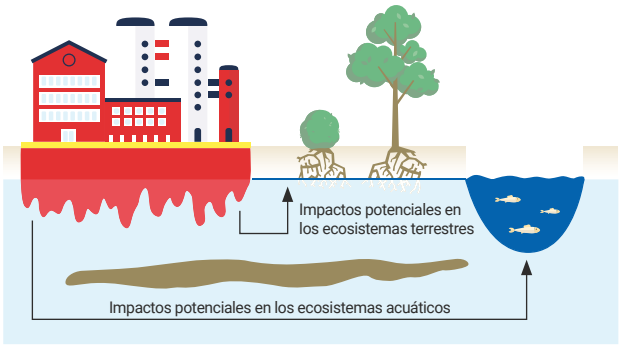
b) Ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas



c) Procesos de salinización de origen humano



d) Transporte de contaminantes



Nota: a) y b) respuestas ecológicas a la disminución de la disponibilidad de aguas subterráneas: a) ecosistemas acuáticos y b) terrestres dependientes de las aguas subterráneas; c) y d) impactos de la calidad del agua y de la contaminación en los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas: c) procesos de salinización del suelo y de las aguas subterráneas debido al cambio de uso del suelo, al bombeo costero y a la irrigación, y d) impactos locales y regionales de los eventos de contaminación debido a los sistemas regionales de flujo de aguas subterráneas.

Fuentes: a) y b) basadas en Rohde et al. (2017, fig. 2, p. 297); c) basadas en Foster y Chilton (2003, fig. 8, p. 1965); y d) Autores.

6.4 Gestión conjunta del agua y la tierra, soluciones basadas en la naturaleza y protección de los ecosistemas

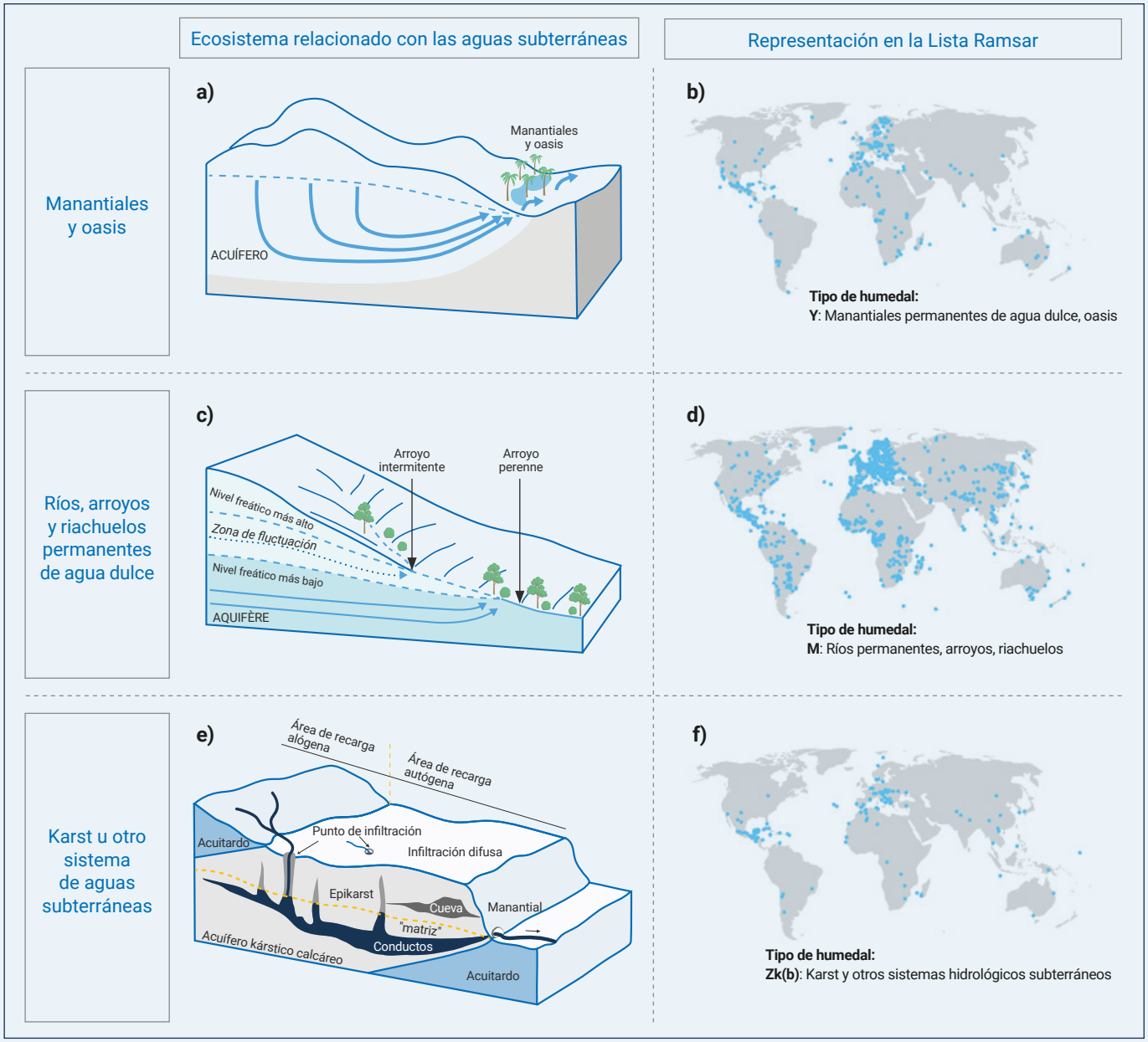
El bienestar compartido de las aguas subterráneas, los ecosistemas y los seres humanos puede mejorarse mediante la gestión de las aguas subterráneas, la gestión conjunta del agua y la tierra, las soluciones basadas en la naturaleza (WWAPs/ONU-Agua, 2018) y la mejora de la protección de los ecosistemas. La gestión de las aguas subterráneas, como se describe en el capítulo 11, suele centrarse en las aguas subterráneas o en los acuíferos en sí. Aunque es importante, a menudo es insuficiente para garantizar que las aguas subterráneas y los ecosistemas sigan proporcionando conjuntamente servicios ecosistémicos críticos. A la inversa, el conocimiento o la gestión de las aguas subterráneas no suele incorporarse suficientemente a la protección y gestión de los ecosistemas. Aunque la descarga de aguas subterráneas y el flujo de base son la base del buen estado de muchos ecosistemas acuáticos, la dependencia de las aguas subterráneas de estos sistemas no suele tenerse en cuenta a la hora de cartografiar los hábitats de agua dulce o la biodiversidad (McManamay et al., 2017). Por ejemplo, la lista Global 200 de ecorregiones (subclases terrestres, de agua dulce y marinas) de la World Wildlife Foundation no considera directa o explícitamente las aguas subterráneas ni mapea los GDE (cuadro 6.1) al destacar áreas clave de protección para los ecosistemas acuáticos y terrestres (Olson y Dinerstein, 2002). Considerar explícitamente las aguas subterráneas en la gestión conjunta del agua y la tierra, las soluciones basadas en la naturaleza y la protección de los ecosistemas es un punto de entrada práctico para lograr la sostenibilidad de las aguas subterráneas y los ecosistemas.

Cuadro 6.2 Aguas subterráneas, humedales de importancia internacional (sitios Ramsar) y sitios designados por la UNESCO, como los sitios del Patrimonio Mundial, las Reservas de Biosfera y los Geoparques

Las aguas subterráneas están infrarrepresentadas en las redes mundiales de conservación, como la Lista de Ramsar de Humedales de Importancia Internacional (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013) y los sitios designados por la UNESCO (sitios del Patrimonio Mundial, Reservas de la Biosfera y Geoparques). La Lista de Ramsar reconoce los humedales (sitios Ramsar) que son significativos para "la humanidad en su conjunto" sobre la base de criterios de rareza del sitio, diversidad biológica y comunidad ecológica. La Lista de Ramsar (figura) identifica procesos de aguas subterráneas o expresiones superficiales como "manantiales permanentes de agua dulce; oasis" y "sistemas cársticos y otros sistemas hidrológicos subterráneos", así como entornos dependientes de las aguas subterráneas como "ríos/arroyos de agua dulce". Las Partes de la Convención de Ramsar son responsables individualmente de la designación de los sitios y del uso y manejo racional de los humedales transfronterizos. Sin embargo, no existe una evaluación sistemática de la función de apoyo de las aguas subterráneas en toda la red mundial de sitios Ramsar ni de las funciones de los sitios en el apoyo a los recursos de aguas subterráneas.

Los sitios designados por la UNESCO ofrecen un espacio para la experimentación y ejemplificación del desarrollo sostenible. Además de los sitios Ramsar, los sitios designados por la UNESCO son fundamentales para alcanzar las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Los humedales mundiales, puntuados por los sitios Ramsar, contribuyen a 75 indicadores de los ODS (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018). Actualmente, hay más de 130 sitios Ramsar que se superponen total o parcialmente con más de 100 sitios designados por la UNESCO. Un ejemplo emblemático es el sitio del Patrimonio Mundial del Delta del Okavango (Sitio Ramsar del Sistema del Delta del Okavango) en Botswana, un gran humedal interior impulsado por las inundaciones que forma un mosaico de caminos de agua, llanuras de inundación e islas (figura 6.1). Las aguas subterráneas bajo las islas actúan como un sumidero de minerales disueltos debido al "bombeo de agua" por parte de los árboles y la vegetación de las islas que eliminan el agua mediante la evapotranspiración, evitando así la salinización de este sistema hidrológico prácticamente cerrado y dominado por la evaporación. Este proceso permite que las aguas superficiales del delta se mantengan frescas, proporcionando una fuente de agua para la fauna y la población local en medio del seco desierto del Kalahari (UNESCO, s.f.). A pesar de su importancia en el mantenimiento de la resiliencia de varios ecosistemas, aún no existe un estudio exhaustivo de las dependencias o relaciones de las aguas subterráneas en los sitios designados por la UNESCO. La Convención de Ramsar y los sitios designados por la UNESCO pueden apoyarse y complementarse mutuamente para garantizar que los procesos de los ecosistemas, así como los valores culturales, estén plenamente integrados en la protección y gestión de los sitios designados.

Representación de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en la Lista Ramsar de Humedales de Importancia Internacional



Fuentes: a) y c) basadas en Foster et al. (2006, fig. 1, p. 2); b), d) y f) autores, basadas en datos de RSIS (s.f.); y e) basadas en Goldscheider y Drew (2007, fig. 1.1, p. 3).

Las aguas subterráneas forman parte tanto del ciclo del agua como de complejos ecosistemas acuáticos, terrestres y subterráneos. Por lo tanto, es esencial integrar la gestión de las aguas subterráneas con la planificación y protección de los ecosistemas y las cuencas hidrográficas, como se hace actualmente a diferentes escalas: subnacional (por ejemplo, California), nacional (Sudáfrica o Australia) o supranacional (por ejemplo, la Unión Europea) (Rohde et al., 2017). La planificación del uso de la tierra que incorpora mejor las aguas subterráneas suele tener dos elementos: i) el mantenimiento de la cantidad de recursos y la protección de la calidad, sobre la base de la vulnerabilidad de un sistema de aguas subterráneas o un acuífero al agotamiento, el hundimiento, la degradación o la contaminación; y ii) la protección de la fuente en torno a los sitios individuales de extracción de aguas subterráneas, como pozos de sondeo o manantiales, con un enfoque en la protección contra la contaminación (Smith et al., 2016).

Las soluciones basadas en la naturaleza de las aguas subterráneas (a veces también denominadas infraestructuras naturales basadas en las aguas subterráneas) utilizan y gestionan intencionadamente las aguas subterráneas y los sistemas y procesos del subsuelo con el fin de aumentar el almacenamiento de agua, la retención de las inundaciones, la calidad del agua y las funciones o servicios ambientales en beneficio general de la seguridad del agua, la resiliencia humana y la sostenibilidad ambiental (Villholth y Ross, s.f.). La solución basada en la naturaleza de las aguas subterráneas más conocida es la recarga gestionada de acuíferos (véase el cuadro 7.1 y la sección 11.5), que se aplica cada vez más (Dillon et al., 2019). Existen otras soluciones a lo largo de un espectro que va de la infraestructura gris (más diseñada) a la verde (más natural), incluyendo la agricultura de conservación, las cuencas de infiltración de agua, la recolección de escurrimientos, la filtración de las riberas y la biorremediación *in situ* de las aguas subterráneas.

Muchas ciudades han instalado infraestructuras verdes para mejorar la calidad y la cantidad del agua (las llamadas ciudades esponja; Harris, 2015), pero hay una falta de conocimiento y comprensión de la calidad y los posibles impactos del agua infiltrada en los acuíferos urbanos (cuadro 6.3).

Cuadro 6.3 Soluciones basadas en la naturaleza para proteger los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas

Las soluciones basadas en la naturaleza pueden ser una parte eficaz de la gestión, la protección o la rehabilitación de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE) al reducir los impactos antropogénicos (uso del suelo/cambios climáticos, extracción de aguas subterráneas, cargas de nutrientes debidas a las prácticas agrícolas, contaminación puntual y difusa). Dos ejemplos ponen de manifiesto la diversidad de las soluciones basadas en la naturaleza y su impacto en los GDE.

Se diseñaron e implementaron soluciones basadas en la naturaleza en el área de captación del embalse de Sulejów (Polonia), un área caracterizada por floraciones de cianobacterias debido a la fuerte contaminación de las aguas subterráneas con nitratos y fósforo procedentes de la contaminación de fuentes no puntuales. Una zona subsuperficial de serrín de pino mezclado con tierra o piedra caliza permitió reducir las concentraciones de fosfato y nitratos en las aguas subterráneas en un 58 % y un 85 %, respectivamente (Izydorczyk et al., 2013; Frątczak et al., 2019).

Otro ejemplo de infraestructura natural basada en las aguas subterráneas es el de la costa rural de Bangladesh. En este caso, los sistemas locales de recogida de agua de lluvia y almacenamiento de aguas subterráneas, cuidadosamente diseñados, contribuyen a la seguridad del agua y a la resiliencia en áreas afectadas por la salinidad y el arsénico natural de las aguas subterráneas (Ahmed et al., 2018). Estos esquemas capturan las precipitaciones estacionales que a menudo se pierden en el escurrimiento superficial hacia el mar a través de pozos y filtros simples, haciéndola disponible durante todo el año. Además, debido a la densidad del agua subterránea salina, el agua dulce infiltrada tiende a flotar en la parte superior sin mezclarse. Cada sistema sirve a pequeñas comunidades de hasta varios cientos de personas, que son capaces de mantener el sistema por sí mismas, después de recibir formación. Estos sistemas se han ampliado a más de 100 comunidades en Bangladesh y tienen un gran potencial en áreas propensas a las inundaciones, pero con escasez de agua.

Por último, los GDE no suelen estar directa o formalmente protegidos. La protección de los GDE, especialmente los terrestres y subterráneos, se ignora en gran medida (Kreamer et al., 2015). Una importante excepción es la Convención de Ramsar (cuadro 6.2), que elaboró un marco de gestión de las aguas subterráneas en siete etapas para mantener las características ecológicas de los humedales de importancia internacional (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010). Muchos de ellos son transfronterizos y requieren la cooperación internacional para su protección y desarrollo sostenible, con un enfoque explícito en las aguas subterráneas y los acuíferos compartidos (véase el capítulo 12). Otra herramienta muy utilizada para proteger los ecosistemas acuáticos es el seguimiento de los caudales ambientales, que son la cantidad, el momento y la calidad de los flujos y niveles de agua dulce necesarios para mantener los ecosistemas acuáticos que, a su vez, sustentan las culturas, las economías, los medios de vida sostenibles y el bienestar de los seres humanos (Arthington et al., 2018). Por ejemplo, la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea establece umbrales de cantidad y calidad de las aguas subterráneas para los GDE (Parlamento Europeo/Consejo, 2000). En este caso, los caudales ambientales mínimos no deben considerarse como "demandas ecológicas", sino como "restricciones a diversos usos" (tanto del GDE como de las aguas subterráneas cercanas) para evitar que los caudales ambientales compitan con otras demandas humanas de agua. Existen muchos métodos de flujo ambiental, pero muy pocos consideran o cuantifican explícitamente la contribución de las aguas subterráneas a los flujos ambientales (FAO, 2019; Gleeson y Richter, 2017). Por último, es necesario comprender mejor los aspectos de la calidad del agua de los caudales ambientales asociados a las aguas subterráneas.

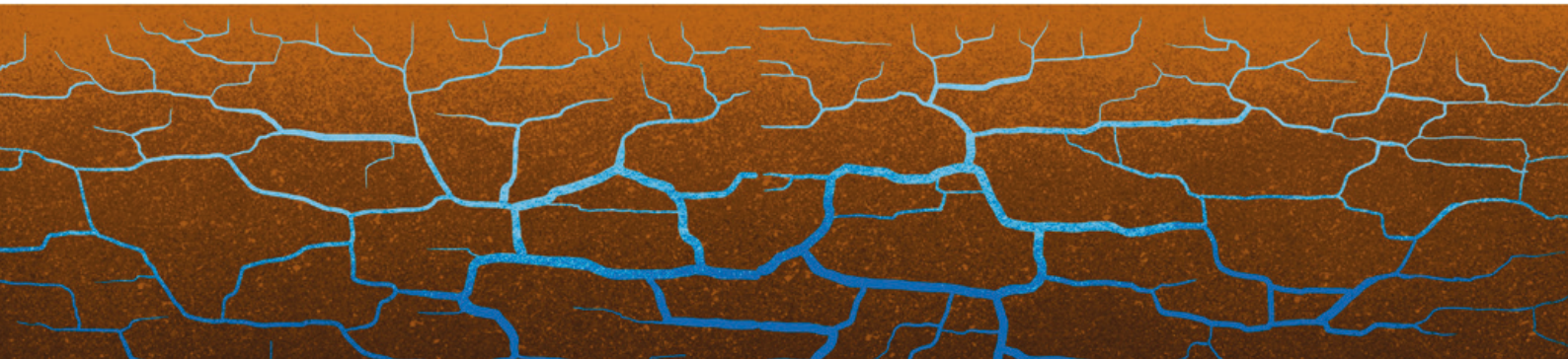
Capítulo 7

Aguas subterráneas, acuíferos y cambio climático

UNESCO-PHI
Richard Taylor y Alice Aureli

AIH
Diana Allen, David Banks, Karen Villholth y Tibor Stigter

Con contribuciones de Mohammad Shamsudduha (UCL-IRDR), Maxine Akhurst (BGS), Niels Hartog (KWR), Harmen Mijnlieff y Rory Dalman (TNO), Bridget Scanlon (UTexas-Austin), Timothy Green (USDA), Yuliya Vystavna (OIEA), Tommaso Abrate (OMM), Pedro Arrojo-Agudo (Relator Especial sobre los derechos humanos al agua potable y al saneamiento), Tatiana Dmitrieva y Mahmoud Radwan (UNESCO-PHI), Guillaume Baggio Ferla (UNU-INWEH), Ziad Khayat (CESPAO), Eva Mach (OIM) y Enric Vázquez Suñé (IDAEA-CSIC)



7.1 Introducción

El cambio climático influye mucho en el abastecimiento y la demanda de agua dulce en todo el mundo. El calentamiento de ~1°C durante el último medio siglo ha tenido un impacto directo en el abastecimiento de agua dulce a través de la amplificación de las precipitaciones extremas, las inundaciones y sequías más frecuentes y pronunciadas, el aumento de las tasas de evapotranspiración, el aumento del nivel del mar y los cambios en los regímenes de precipitación y deshielo. Las aguas subterráneas, el mayor almacén distribuido de agua dulce del mundo, están naturalmente bien situadas para desempeñar un papel vital que permita a las sociedades adaptarse a la escasez intermitente y sostenida de agua causada por el cambio climático. También es esencial satisfacer el aumento de la demanda de agua para hacer realidad muchos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, entre ellos el núm. 2 (hambre cero), 6 (agua para todos) y 13 (acción climática). Los acuíferos que transmiten y almacenan agua subterránea también pueden contribuir a la mitigación del cambio climático mediante el uso de la energía geotérmica para reducir las emisiones de CO_2, así como la captura y el almacenamiento del CO_2 emitido. En este capítulo se revisan los últimos conocimientos sobre los impactos del cambio climático en la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas, así como las oportunidades, los riesgos y los retos que plantea el desarrollo de los acuíferos para la adaptación y la mitigación del cambio climático.

7.2 Impacto del cambio climático en los recursos hídricos subterráneos

El cambio climático influye en los sistemas de aguas subterráneas directamente a través de los cambios en el balance hídrico en la superficie de la Tierra, e indirectamente a través de los cambios en las extracciones de agua subterránea a medida que las sociedades responden a los cambios en la disponibilidad de agua dulce (figura 7.1 – Taylor et al., 2013a; Lall et al., 2020). Los impactos del cambio climático en los balances hídricos terrestres pueden modificarse aún más por la actividad humana, como el cambio en el uso y la cobertura del suelo (LULC) (Favreau et al., 2009; Amanambu et al., 2020). El calentamiento global también desencadena la liberación de agua dulce del almacenamiento a largo plazo en las capas de hielo continentales y la expansión térmica de los océanos, lo que contribuye sustancialmente a la subida del nivel del mar (SLR).

7.2.1 Impactos directos del cambio climático en las aguas subterráneas

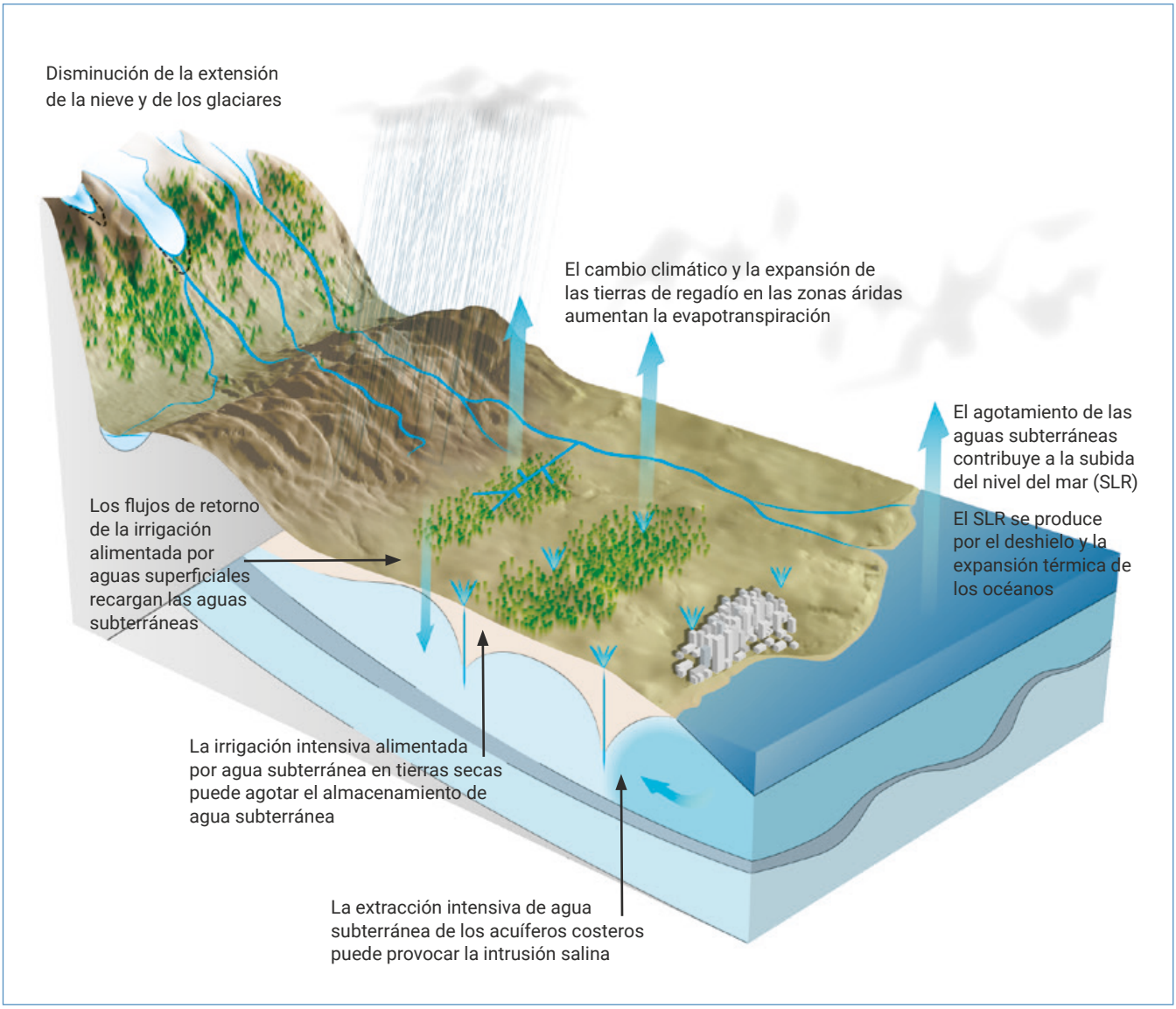
El cambio climático afecta directamente a la reposición natural de las aguas subterráneas. Esta reposición puede producirse a lo largo de un paisaje mediante la precipitación directamente (es decir, la recarga difusa) y a través de la filtración de aguas superficiales, incluidos arroyos efímeros, humedales o lagos (es decir, la recarga focalizada). Este último proceso es más frecuente en las zonas áridas[22] (Scanlon et al., 2006; Cuthbert et al., 2019a). A nivel mundial, las estimaciones medias modeladas de la recarga difusa contemporánea (de la década de 1960 a la de 2010) oscilan entre 110 y 140 mm/año (Mohan et al., 2018; Müller Schmied et al., 2021), lo que equivale a entre 15 y 19 km^3/año, y comprende ~40 % de los recursos de agua dulce renovables del mundo (Müller Schmied et al., 2021). Sin embargo, persiste una gran incertidumbre en las proyecciones globales de los impactos del cambio climático en la recarga de las aguas subterráneas. Esta incertidumbre se debe principalmente a las limitaciones en la representación del cambio climático por parte de los Modelos de Circulación Global (MCG) y de la recarga de aguas subterráneas por parte de los Modelos Hidrológicos Globales (GHM) (Reinecke et al., 2021).

Cambios en las precipitaciones y la evapotranspiración

El clima y la cubierta vegetal determinan en gran medida las tasas de precipitación (P) y evapotranspiración (ET), mientras que el suelo y la geología subyacentes dictan si un excedente de agua (P - ET) puede transmitirse a un acuífero subyacente. La amplificación de las tasas de ET en un mundo que se calienta limita la generación de excedentes de agua; se estima que, a nivel mundial, la ET ha aumentado en un ~10 % entre 2003 y 2019 (Pascolini-Campbell et al., 2021).

[22] Las tierras secas son áreas con un clima subhúmedo, semiárido, árido o hiperárido.

Figura 7.1 Interacciones clave entre las aguas subterráneas y el cambio climático que muestran cómo los impactos directos e indirectos del cambio climático afectan a los sistemas de aguas subterráneas



Fuente: Autores, adaptado y revisado de Taylor et al. (2013a).

La variabilidad espacial de la recarga difusa está controlada principalmente por la distribución de las precipitaciones. Sin embargo, a medida que el planeta se calienta, persiste una considerable incertidumbre sobre dónde, cuándo y cuánta lluvia o nieve caerá. Una conclusión clave del 5º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014a, p. 1085), la idea de que las respuestas hidrológicas al cambio climático pueden describirse como "lo húmedo se vuelve más húmedo, lo seco se vuelve más seco", ha demostrado ser demasiado simplista (Byrne y O'Gorman, 2015). Por ejemplo, se prevén reducciones sustanciales de las precipitaciones en las regiones ecuatoriales húmedas de América y Asia, y los mayores aumentos previstos de las precipitaciones se producirán sobre los océanos en los trópicos, y no sobre la tierra (figura 7.2).

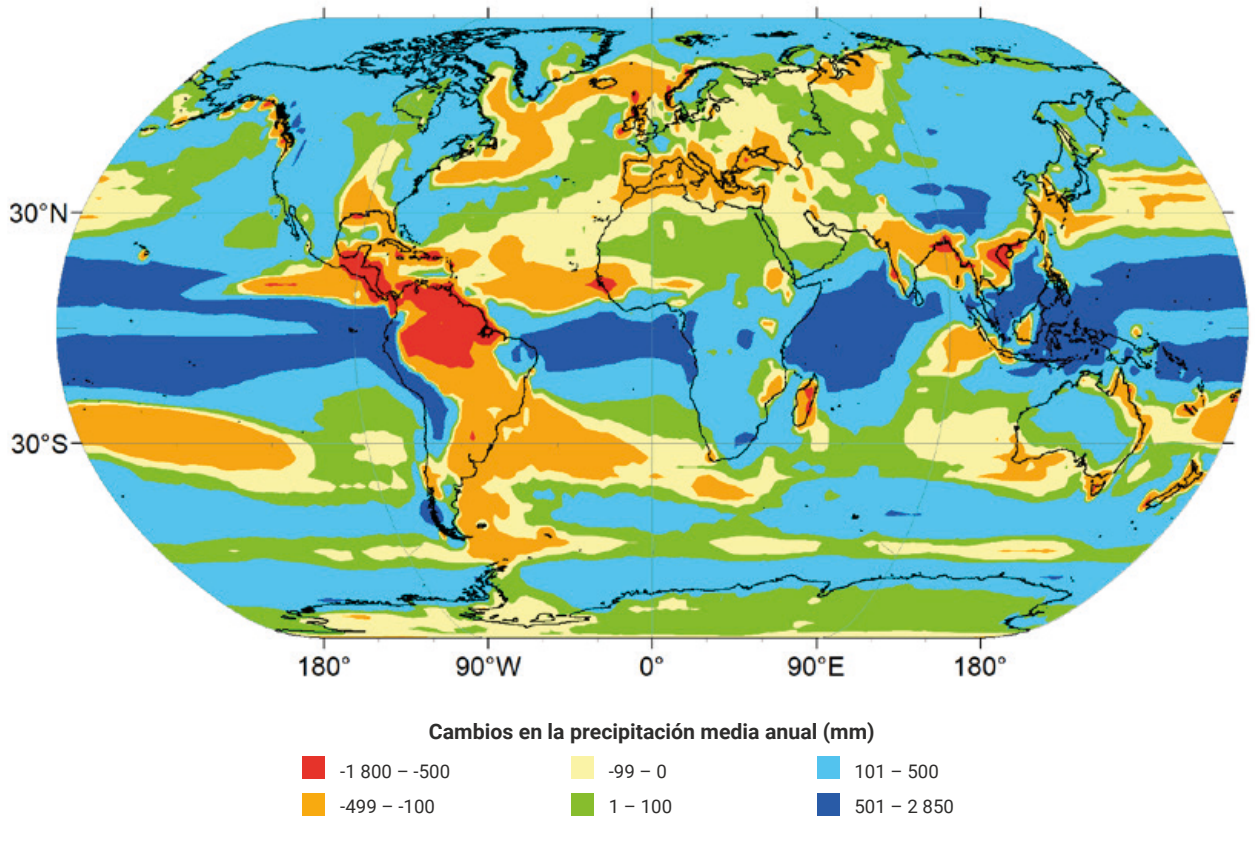
A lo largo del tiempo, los extremos climáticos (es decir, las sequías y las inundaciones), que influyen en gran medida en la recarga de las aguas subterráneas, a menudo se correlacionan con modos de variabilidad climática como la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO, por ejemplo, Taylor et al., 2013b; Kolusu et al., 2019) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (Green et al., 2011). Sin embargo, no existe consenso sobre cómo se prevé que los controles a gran escala

Uno de los efectos observados y generalizados del cambio climático que influye en la reposición de las aguas subterráneas es la intensificación de las precipitaciones

de la variabilidad climática como el ENSO respondan al calentamiento global (McPhaden et al., 2020). Durante la sequía plurianual del milenio en Australia (1995-2010), el almacenamiento de aguas subterráneas en la cuenca de Murray-Darling disminuyó sustancialmente y de forma continua en ~100 ± 35 km³ de 2000 a 2007 en respuesta a una fuerte reducción de la recarga y a la ausencia de eventos de precipitaciones extremas (Leblanc et al., 2009). Sin embargo, las condiciones más húmedas no producen sistemáticamente una mayor recarga de las aguas subterráneas: las incidencias de una mayor precipitación invernal (x 2,5) en el suroeste de los Estados Unidos durante los años de ENSO, por ejemplo, pueden dar lugar a un aumento de la ET de las floraciones del desierto que consumen en gran medida o totalmente el excedente de agua (Scanlon et al., 2005).

Uno de los efectos observados y generalizados del cambio climático que influye en la reposición de las aguas subterráneas es la intensificación de las precipitaciones. Como el aire más cálido retiene más humedad, se requiere una mayor ET para alcanzar los puntos de condensación (rocío) en un mundo que se calienta. Esta transición da lugar a un menor número de precipitaciones ligeras y a una mayor frecuencia de precipitaciones intensas (Myhre et al., 2019). Esta "intensificación" de las precipitaciones es más fuerte en los trópicos (Allan et al., 2010), donde se prevé que viva la mayor parte de la población mundial en 2050 (Gerland et al., 2014). Las consecuencias de este cambio en la distribución de las precipitaciones a nivel mundial incluyen una humedad del suelo más variable y reducida, inundaciones más frecuentes e intensas, así como sequías más largas y frecuentes.

Figura 7.2 Cambios proyectados en la precipitación media anual a nivel mundial bajo el cambio climático



Nota: Las áreas en rojo (azul oscuro) y marrón (azul claro) indican los lugares en los que se prevén reducciones (aumentos) sustanciales de las precipitaciones en este siglo. Los cambios se definen como la diferencia entre la precipitación media anual proyectada (2071-2100) del conjunto CMIP5 (Coupled-Modelled Inter-Comparison Project Phase 5) y la precipitación media anual observada (1979-2019) del GPCP v2.3 (Global Precipitation Climatology Project).

Fuente: Autores, a partir de los datos del CMIP5 de Taylor et al. (2012a) y de los datos del GPCP de Adler et al. (2003).

Se espera que la transición hacia un número menor de precipitaciones, pero más intensas, aumente la recarga de las aguas subterráneas en muchos entornos. Se ha demostrado que las lluvias intensas contribuyen de forma desproporcionada a la recarga de las aguas subterráneas en lugares de los trópicos (Jasechko y Taylor, 2015; Cuthbert et al., 2019a; MacDonald et al., 2021), incluidas las tierras secas, donde las lluvias extremas (intensas) crean masas de agua superficiales efímeras que generan una recarga focalizada (Favreau et al., 2009; Taylor et al., 2013b; Seddon et al., 2021). La contribución desproporcionadamente mayor de las lluvias intensas a la recarga de las aguas subterráneas se ha observado igualmente en las tierras secas fuera de los trópicos en Australia (Crosbie et al., 2012) y en el suroeste de los Estados Unidos (Small, 2005). Los aumentos episódicos del almacenamiento de aguas subterráneas a partir de la recarga, estimados a partir de los datos satelitales de GRACE[23] en las zonas áridas de todo el mundo, se asocian con precipitaciones anuales extremas (> 90º percentil) (figura 7.3). Por el contrario, en las regiones templadas caracterizadas por niveles freáticos poco profundos que pueden subir rápidamente a la superficie del suelo durante las lluvias intensas, los aumentos potenciales de la recarga son limitados (Rathay et al., 2018) y pueden producirse inundaciones de aguas subterráneas (Macdonald et al., 2012).

Cambios en el hielo y la nieve

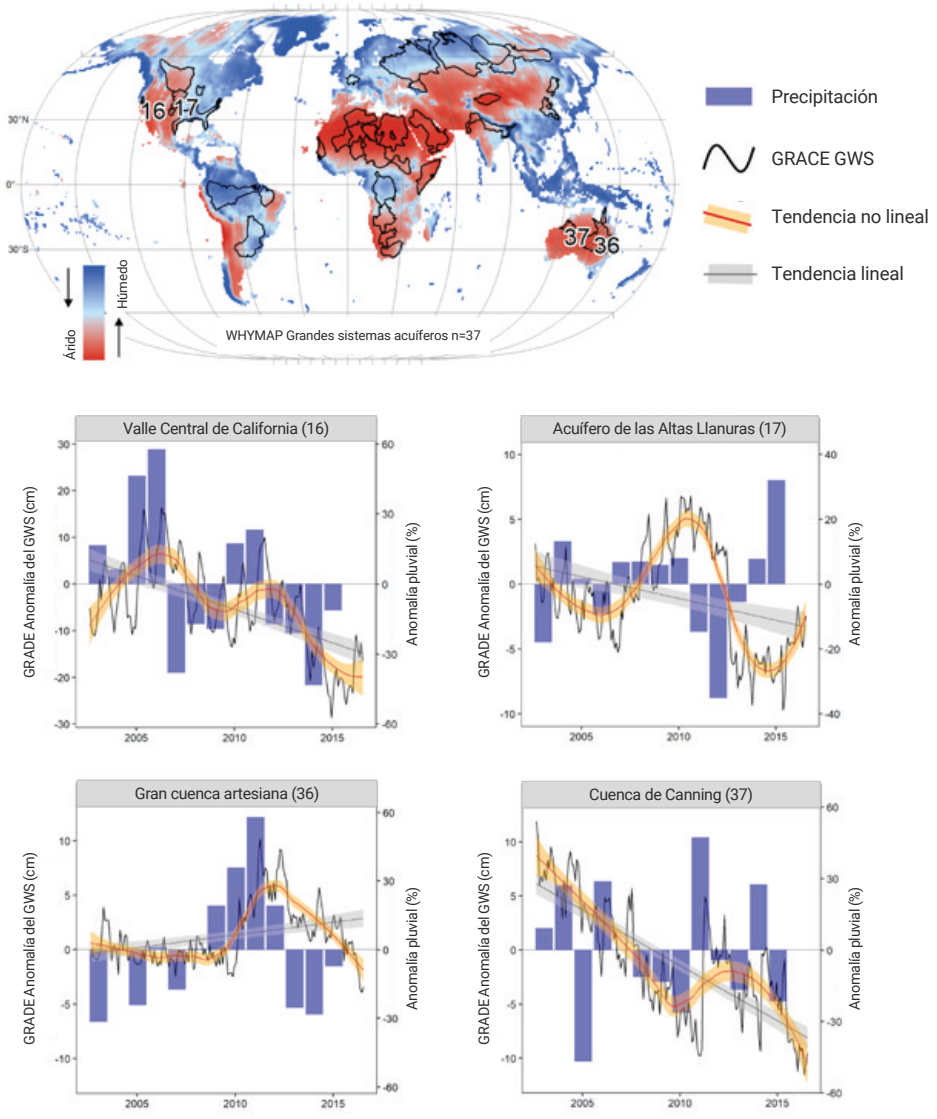
En las latitudes septentrionales continentales, así como en las regiones montañosas y polares, el calentamiento global altera los regímenes de flujo de agua de deshielo y nieve, lo que afecta a la recarga de las aguas subterráneas. En las regiones templadas, el calentamiento provoca una menor acumulación de nieve y un deshielo más temprano, así como una mayor precipitación invernal en forma de lluvia y una mayor frecuencia de eventos de lluvia sobre nieve (Harpold y Kohler, 2017). El impacto agregado de estos efectos es una reducción de la duración y la magnitud estacional de la recarga, lo que disminuye el almacenamiento de agua en las cuencas y amplifica la gravedad de los caudales bajos extremos de verano (Dierauer et al., 2018). Los acuíferos de los valles de montaña presentan cambios en el calendario y la magnitud de: 1) los niveles máximos de agua subterránea debido a un deshielo primaveral más temprano, y 2) los niveles bajos de agua subterránea asociados a periodos de flujo base más largos y bajos (figura 7.1) (Allen et al., 2010). Los bajos caudales estivales en los arroyos pueden verse exacerbados por el descenso de los niveles de agua subterránea, de modo que el caudal de los arroyos resulta inadecuado para satisfacer las necesidades de agua para uso doméstico y agrícola (véase el apartado 7.2.2) y para mantener las funciones ecológicas, como los hábitats en los arroyos para los peces y otras especies acuáticas. Estos cambios hidrológicos se ven agravados por la mayor temperatura de los caudales bajos de verano (Dierauer et al., 2018).

El impacto del retroceso de los glaciares alpinos en los sistemas de aguas subterráneas no se conoce bien. A medida que los glaciares retroceden debido al cambio climático, la producción de agua de deshielo aumenta inicialmente hasta un máximo, conocido como "pico de agua", antes de caer a medida que los glaciares siguen retrocediendo; se considera que aproximadamente la mitad de las cuencas de drenaje glaciarizadas del mundo han pasado el pico de agua (Huss y Hock, 2018). En los Andes tropicales del Perú, los flujos de agua de deshielo de los glaciares disminuyen constantemente después de los picos de agua, pero durante la estación seca las aguas subterráneas continúan descargándose en los arroyos, manteniendo el flujo de base durante la estación seca con estrés hídrico (Somers et al., 2019). Del mismo modo, los análisis recientes destacan los aumentos de la recarga focalizada debido a las mayores contribuciones de agua de deshielo al flujo de los arroyos en las tierras secas glaciarizadas (Liljedahl et al., 2017). A más largo plazo bajo el cambio climático, se produce una reducción de la recarga debido al aumento de la ET, que puede reducir las contribuciones de agua de deshielo que generan la recarga focalizada de los flujos bajos de verano (Taylor et al., 2013a).

[23] Gravity Recovery and Climate Experiment: grace.jpl.nasa.gov/mission/grace-fo/.

Figura 7.3

Cambios en el almacenamiento mensual de aguas subterráneas y en las precipitaciones anuales en cuatro grandes sistemas acuíferos de áreas secas de los Estados Unidos y Australia



Nota: Los años de precipitación extrema (percentil 90) incluyen 2006 (Valle Central), 2015 (Acuífero de las Altas Llanuras), 2011 (Gran Cuenca Artesiana) y 2011 (Cuenca de Canning). Series temporales mensuales de cambios en el almacenamiento de agua subterránea derivadas de los datos del satélite GRACE con cambios en la precipitación anual, Unidad de Investigación Climática (CRU) v. 4.01; (Harris et al., 2014) y tendencias no lineales y lineales ajustadas. Las envolventes sombreadas alrededor de las tendencias indican un intervalo de confianza del 95 % de las tendencias ajustadas; las ubicaciones de los cuatro grandes sistemas acuíferos (definidos por WHYMAP, 2008) se muestran en el mapa mundial de la parte superior izquierda, con el índice de aridez como sombreado azul-rojo.

Fuente: Autores, basado en Shamsudduha y Taylor (2020).

La congelación estacional de los suelos que afecta a ~50 % de las tierras expuestas en el hemisferio norte (Zhang et al., 2003) es un importante control de la infiltración del deshielo e influye fuertemente en la cantidad y el momento de la escorrentía invernal y manantial en las regiones frías (Hayashi, 2013). Entre 1901 y 2002, la extensión del suelo estacionalmente congelado en el hemisferio norte disminuyó un 7 % debido al aumento de las temperaturas del aire (Lemke et al., 2007). El cambio climático también modifica la distribución y la extensión del permafrost, alterando la humedad del suelo, la estacionalidad de los flujos de agua y la distribución del agua almacenada en la superficie y en el subsuelo (Walvoord y Kurylyk, 2016). El aumento del descongelamiento del permafrost bajo el cambio climático disminuye la distribución y el espesor del permafrost, creando nuevas vías laterales de agua subterránea que aumentan la conectividad de los acuíferos y las aguas superficiales (Lamontagne-Hallé et al., 2018). Esta transición explica la paradoja observada en el Ártico tanto de la humectación (es decir, el aumento del flujo de base hacia los ríos de las laderas) como de la desecación (es decir, la reducción de los humedales y lagos de las laderas).

Aumento del nivel del mar y salinización de los acuíferos costeros

Los acuíferos costeros forman la interfaz entre los sistemas hidrológicos oceánicos y terrestres y proporcionan una fuente crítica de agua dulce para la población de las regiones costeras. La SLR global de ~3 mm/año desde 1990, en relación con ~1 mm/año de 1902 a 1990 (Dangendorf et al., 2017), ha inducido la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros de todo el mundo (Michael et al., 2013). La intrusión de agua de mar depende de una serie de factores más allá de la SLR, como la geología y la topografía costeras, así como la reposición y la extracción de agua dulce subterránea (Stigter et al., 2014). La amenaza que supone la SLR para las aguas subterráneas es mayor en los deltas de baja altitud (por ejemplo, los deltas del Ganges-Brahmaputra y del Mekong) y en las islas con tasas limitadas de descarga de aguas subterráneas, entre las que se encuentran los pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID) (Holding et al., 2016).

La intrusión de agua de mar es la consecuencia de un desplazamiento hacia el interior de la interfaz agua dulce-agua salada en el subsuelo (figura 7.4). Los impactos de la SLR se ven exacerbados por las inundaciones de agua de mar durante las mareas de tempestad, los ciclones (Holding y Allen, 2015; Ketabchi et al., 2016; Shamsudduha et al., 2020) y los tsunamis (Villholth, 2013b), lo que provoca una intrusión vertical y lateral en el acuífero. Los atolones (es decir, las islas de arrecifes de coral) son ejemplos extremos de este tipo de entornos vulnerables (Werner et al., 2017), en los que las lentes de agua dulce subterránea son muy dinámicas y heterogéneas debido a los efectos combinados de una geología compleja, los eventos oceánicos episódicos, la fuerte variabilidad climática y las intervenciones humanas (por ejemplo, el cambio LULC, el bombeo de agua subterránea).

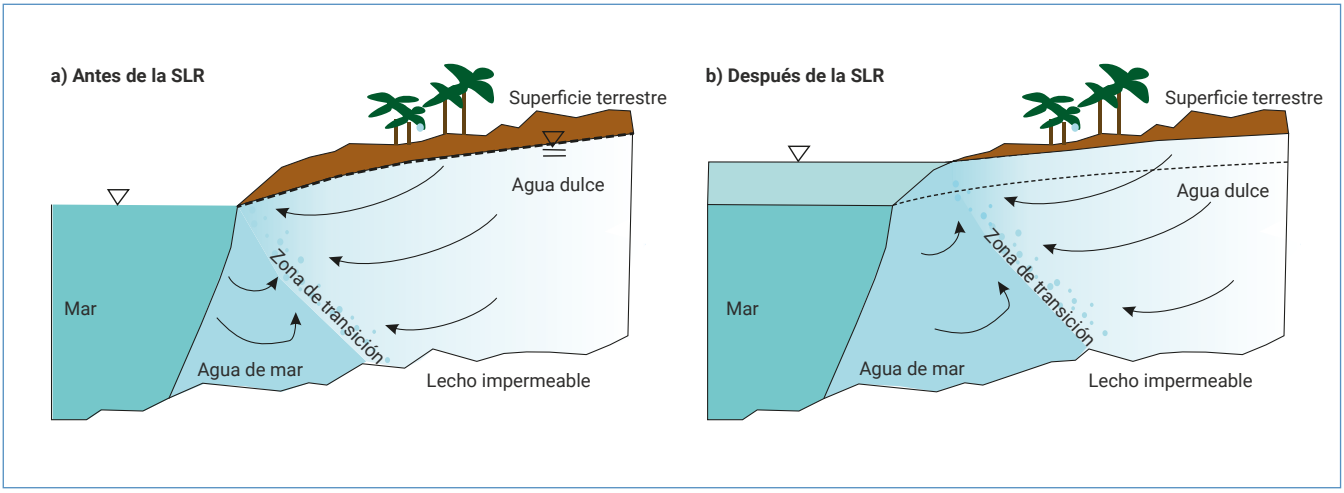
El impacto de la SLR por sí sola en la intrusión de agua de mar suele ser pequeño en relación con el de la extracción de agua subterránea

El impacto de la SLR por sí sola en la intrusión de agua de mar suele ser pequeño en relación con el de la extracción de agua subterránea (Ferguson y Gleeson, 2012). Como resultado, la intrusión de agua de mar se observa a menudo de forma más prominente en los acuíferos costeros muy explotados con altas densidades de población (por ejemplo, Yakarta; Gaza, Estado de Palestina). El bombeo intensivo de aguas subterráneas puede acelerar la intrusión de agua de mar a través del hundimiento de la tierra, como se ha observado en Australia, Bangladesh, China, Indonesia, la Arabia Saudita y los Estados Unidos (Polemio y Walraevens, 2019; Nicholls et al., 2021), donde las tasas de hundimiento pueden superar las tasas previstas de SLR. Los deltas de baja altitud, en los que el subsuelo está dominado por sedimentos arcillosos propensos a la compactación por el descenso de las capas freáticas, son especialmente vulnerables a la intrusión de agua de mar (Herrera-García et al., 2020).

Otros impactos directos del cambio climático en la calidad de las aguas subterráneas

El cambio climático presenta riesgos directos para la calidad de las aguas subterráneas, no solo como resultado de la amplificación de las precipitaciones extremas, sino también por la reducción de la recarga. Las lluvias intensas (por ejemplo, >10 mm/día) tienen el potencial de amplificar la recarga y movilizar contaminantes como el cloruro y el nitrato en la zona vadosa inmediatamente por encima de los acuíferos en las zonas áridas (por ejemplo, Gurdak et al., 2007) y en las regiones templadas (Graham et al., 2015); además, el escurrimiento superficial puede interceptar residuos mal contenidos y productos químicos almacenados en el suelo o cerca de él, que luego se filtran a los acuíferos (OMS, 2018). En las áreas con un saneamiento inadecuado, estos eventos también pueden servir para arrastrar patógenos microbianos fecales y productos químicos (por ejemplo, nitrato) a través de los suelos poco profundos hasta el nivel freático (por ejemplo, Taylor et al., 2009; Sorensen et al., 2015; Houéménou et al., 2020), a veces con la ayuda de trayectorias de flujo preferenciales, como los macroporos del suelo (Beven y Germann, 2013). De hecho, la recarga procedente de las fuertes lluvias en estos entornos se ha asociado a brotes de enfermedades diarreicas, incluido el cólera (Olago et al., 2007; De Magny et al., 2012). Los cambios inducidos por la sequía en las prácticas de saneamiento en la ciudad de Ramotswa, en la zona semiárida de Botswana, condujeron a un cambio del saneamiento a través del agua (inodoros de cisterna) a instalaciones de saneamiento *in situ* (por ejemplo, letrinas de pozo), que han amplificado el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (McGill et al., 2019).

Figura 7.4 Impacto de la subida del nivel del mar (SLR) en la intrusión de agua de mar en un sistema acuífero costero no confinado en pendiente



Fuente: Autores, adaptado de Ketabchi et al. (2016).

El cambio climático presenta riesgos directos para la calidad de las aguas subterráneas, no solo como resultado de la amplificación de las precipitaciones extremas, sino también por la reducción de la recarga

Las reducciones en la recarga de las aguas subterráneas atribuidas al cambio climático en la región mediterránea (por ejemplo, Stigter et al., 2014) han provocado la concentración de solutos como el cloruro, el nitrato y el arsénico en los suelos y los acuíferos poco profundos, debido a una mayor evaporación y a una menor dilución (Mas-Pla y Menció, 2019).
La combinación del calentamiento global y el efecto isla de calor de la urbanización sobre las temperaturas del subsuelo también tiene implicaciones para la calidad de las aguas subterráneas, como resultado de los cambios en la solubilidad y la concentración de contaminantes como el manganeso y el carbono orgánico disuelto (Taniguchi et al., 2007; Riedel, 2019; McDonough et al., 2020). El descongelamiento del permafrost libera gases de efecto invernadero (por ejemplo, metano, dióxido de carbono, óxido nitroso) y aumenta los riesgos de contaminación de las operaciones mineras a través del aumento de la conectividad hidrológica entre las aguas subterráneas y superficiales.

7.2.2 Impactos indirectos del cambio climático

El aumento de las extracciones de aguas subterráneas se deriva indirectamente del cambio climático, ya que las sociedades se esfuerzan por adaptarse al aumento de la *ET* asociado al calentamiento global (figura 7.1), así como al aumento de la variabilidad y a la disminución general de la humedad del suelo y de la disponibilidad de agua superficial. De hecho, los impactos del cambio climático en las aguas subterráneas pueden ser mayores a través de sus efectos indirectos en la demanda de agua para irrigación (Taylor et al., 2013a). Las estrategias que emplean las aguas subterráneas para adaptarse a unas precipitaciones más variables (menos fiables) y para satisfacer la creciente demanda mundial de alimentos (capítulo 3) tienen claras consecuencias para la gobernanza y la gestión sostenible de las aguas subterráneas (capítulos 2 y 10), pudiendo provocar el agotamiento o la contaminación de los recursos hídricos subterráneos, lo que repercute en los flujos medioambientales (De Graaf et al., 2019; Jasechko et al., 2021) y pone en peligro los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (capítulo 6). Los modelos a escala mundial sugieren que entre 1991 y 2016, la irrigación representó el ~65 % de las extracciones de agua dulce a nivel mundial y el ~88 % del uso consuntivo del agua (Müller Schmied et al., 2021); se estimó que las aguas subterráneas comprendían el 25 % de todas las extracciones y el 37 % del uso consuntivo total. Esta redistribución a gran escala del agua dulce de los ríos, los lagos y las aguas subterráneas a las tierras de cultivo ha provocado 1) el agotamiento de las aguas subterráneas en las regiones donde la irrigación se alimenta principalmente de aguas subterráneas; 2) la acumulación de aguas subterráneas como resultado de la recarga de los flujos de retorno de la irrigación alimentada por aguas superficiales; y 3) las modificaciones de los climas locales como consecuencia del aumento de la evapotranspiración de las tierras de regadío (figura 7.1). La

expansión de la agricultura de regadío y de secano también complica la relación entre el cambio climático y las aguas subterráneas, ya que los agroecosistemas gestionados no responden a los cambios en las precipitaciones del mismo modo que los ecosistemas naturales.

El anegamiento en áreas interiores, amplificado por la irrigación de aguas superficiales y el aumento de la recarga derivado de la conversión de la vegetación natural en cultivos de raíces poco profundas (Favreau et al., 2009) puede conducir a la elevación de los niveles freáticos y a la salinización del suelo a través del flujo capilar ascendente que luego se evapora. Muchas áreas de irrigación del mundo se enfrentan así al doble problema de la salinización del suelo y el anegamiento. Estos problemas afectan actualmente a más del 20 % del total del área de irrigación mundial (Singh, 2021).

7.3 Resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas acuíferos al cambio climático

El agua subterránea es el mayor almacén distribuido de agua dulce del mundo, con un volumen estimado de ~23 millones de km³ en los 2 km superiores de la corteza continental de la Tierra (Gleeson et al., 2016). Aunque una pequeña fracción de esta cantidad (menos del 6 %) se considera "moderna" (es decir, reabastecida hace menos de 50 años), este volumen (~1,4 km³) sigue siendo equivalente a una masa de agua con una profundidad de unos 3 m repartida por los continentes, empequeñeciendo todos los demás componentes no congelados del ciclo hidrológico activo. La relación entre el cambio climático y los sistemas de aguas subterráneas difiere fundamentalmente de la de los sistemas de aguas superficiales, ya que el almacenamiento distribuido de las aguas subterráneas se deriva de las contribuciones de recarga durante periodos que van desde años hasta décadas e incluso milenios (Ferguson et al., 2020). Estos tiempos de residencia de las aguas subterráneas explican la resistencia comparativa de los sistemas acuíferos, en relación con las aguas superficiales, a la variabilidad y el cambio climático, como demuestran las soluciones a la sequía basadas en las aguas subterráneas (sección 7.4) y los desfases a largo plazo observados entre las extracciones de aguas subterráneas, el agotamiento y la recarga (Cuthbert et al., 2019b). El desarrollo de un abastecimiento de agua resistente al cambio climático implicará, en muchas partes del mundo, el uso de aguas subterráneas conjuntamente con ríos, lagos y embalses de aguas superficiales. Queda mucho por hacer en cuanto a la optimización de la gestión conjunta de estas fuentes, incluido el reconocimiento cada vez mayor de que los sistemas suelen estar interconectados; en las áreas húmedas, las aguas subterráneas alimentan principalmente los ríos y otros sistemas de aguas superficiales, mientras que en las tierras secas los caudales efímeros de los ríos suelen reponer las aguas subterráneas (Scanlon et al., 2016).

7.3.1 La resiliencia de las sistemas acuíferos al cambio climático

La resistencia natural de los sistemas acuíferos al cambio climático varía considerablemente y está controlada principalmente por la geología, la vegetación, la topografía y el clima, tanto en el pasado como en el presente. Los sistemas acuíferos que comprenden secuencias de rocas sedimentarias gruesas y expansivas (por ejemplo, caliza, arenisca), que suelen transmitir y almacenar grandes volúmenes de agua subterránea, son más resistentes a la variabilidad y el cambio climáticos que los sistemas acuíferos situados en entornos de roca dura (por ejemplo, rocas cristalinas fracturadas), que poseen capacidades más restringidas para transmitir y almacenar agua subterránea (Cuthbert et al., 2019b). Los sistemas acuíferos de las regiones húmedas que reciben una recarga regular pueden ser más sensibles a las perturbaciones climáticas, como la sequía, pero también se recuperan con relativa rapidez. En cambio, los sistemas acuíferos de las zonas áridas, donde la recarga es escasa y episódica, son menos sensibles a la variabilidad climática a corto plazo (estacional a interanual), pero son vulnerables a las tendencias climáticas a largo plazo, de las que tardarán en recuperarse (Opie et al., 2020). La resistencia al cambio climático de los abastecimientos de agua procedentes de sistemas acuíferos explotados también depende del contexto (Gleeson et al., 2020b) y de la magnitud de las extracciones de agua subterránea, entre otros factores.

La relación entre el cambio climático y los sistemas de aguas subterráneas difiere fundamentalmente de la de los sistemas de aguas

Por ejemplo, la extracción de baja intensidad para el abastecimiento de agua doméstica de acuíferos de roca cristalina erosionada de bajo almacenamiento que se recargan anualmente en el África ecuatorial húmeda suele ser resistente al agotamiento de las aguas subterráneas. La extracción de agua subterránea, en gran parte "fósil", de sistemas acuíferos sedimentarios a escala regional (por ejemplo, arenisca de Nubia, arenas del Kalahari) en las tierras secas de África (MacDonald et al., 2021) es resistente al clima, pero, en última instancia, insostenible y está controlada por el almacenamiento de agua subterránea disponible.

7.3.2 Sistemas acuíferos vulnerables al cambio climático

Los sistemas acuíferos que son vulnerables al cambio climático incluyen: aquellos en los que los impactos (descritos en la sección 7.2) son en gran medida independientes de las extracciones humanas (ejemplos 1 a 4); y aquellos en los que la intensidad de las extracciones humanas de agua subterránea desempeña un papel clave en la amplificación de la vulnerabilidad al cambio climático (ejemplos 5 a 8):

1. Sistemas acuíferos costeros y deltaicos de bajo relieve, como los que se encuentran en los megadeltas asiáticos y los PEID[24], que son vulnerables a la SLR, a las mareas de tormenta y a los impactos del cambio climático en la recarga;
2. los sistemas acuíferos de las latitudes septentrionales continentales o de las regiones alpinas y polares, en los que la recarga y la descarga a largo plazo se ven afectadas por los cambios en los regímenes de agua de deshielo (por ejemplo, las Montañas Rocosas, la cuenca del Indo) y por el deshielo del permafrost (por ejemplo, Canadá, Federación de Rusia), que aumenta la conectividad hidrológica y los riesgos de contaminación;
3. *acuíferos en ciudades de bajos ingresos en rápida expansión* (por ejemplo, Dakar, Lucknow, Lusaka) *y grandes comunidades desplazadas e informales* (por ejemplo, en Bangladesh, Kenya, el Líbano) que dependen de la provisión de saneamiento *in situ* (por ejemplo, letrinas de pozo, fosas sépticas), donde el aumento de la frecuencia de las precipitaciones extremas puede amplificar la lixiviación de contaminantes superficiales y cercanos a la superficie;
4. *Acuíferos aluviales poco profundos que subyacen a los ríos estacionales de las zonas áridas*, alimentados por el escurrimiento efímero de los ríos (Duker et al., 2020), que tienen una capacidad de almacenamiento que depende en gran medida del tamaño del río y del grosor de los depósitos de arena; los sistemas más pequeños tienen una capacidad de almacenamiento limitada y son muy vulnerables a una mayor variabilidad de las precipitaciones, incluidas las sequías más prolongadas proyectadas por el cambio climático;
5. *Sistemas acuíferos de bombeo intensivo para la irrigación alimentada por aguas subterráneas en tierras secas* (por ejemplo, en el noroeste de la India; el Valle Central de California y las Altas Llanuras centrales, en los Estados Unidos; el acuífero de Souss, en Marruecos; las Llanuras del Norte de China), donde hay un alto uso consuntivo de las aguas subterráneas y la reducción de la recarga debido al cambio climático podría amenazar la viabilidad continua de la agricultura de regadío;
6. *Acuíferos de bombeo intensivo para las ciudades de las zonas áridas* (por ejemplo, Lahore; San Antonio), donde las posibles reducciones de la recarga en el marco del cambio climático podrían amenazar la viabilidad continua del abastecimiento público de agua, dado que otras fuentes perennes de agua son limitadas o no existen;
7. *Acuíferos costeros intensamente bombeados* (por ejemplo, la ciudad de Gaza; Yakarta; Trípoli), donde el bombeo reduce los niveles de agua subterránea y aumenta sustancialmente la intrusión salina más allá de la que se produce por la sola SLR;
8. Sistemas acuíferos de bajo almacenamiento/baja recarga en zonas áridas (por ejemplo, Bulawayo; Ouagadougou), donde las fuentes alternativas de agua perenne son limitadas o no existen, y la recarga es episódica, de modo que incluso pequeñas reducciones en la recarga pueden conducir al agotamiento de las aguas subterráneas.

[24] en.unesco.org/sids/about#list.

7.4 Adaptaciones de las aguas subterráneas al cambio climático: respuestas humanas

Las adaptaciones al cambio climático basadas en las aguas subterráneas aprovechan el almacenamiento distribuido de las aguas subterráneas y la capacidad de los sistemas acuíferos para almacenar excedentes de agua (por ejemplo, estacionales o episódicos). Incurren en pérdidas por evaporación sustancialmente menores que las infraestructuras convencionales, como las presas de superficie. Se espera que en las próximas décadas aumente la importancia de las aguas subterráneas como amortiguador vital de los impactos del cambio climático, que incluyen no solo las sequías y el aumento de la ET, sino también una mayor variabilidad de la humedad del suelo y de las aguas superficiales (sección 7.3). Las "revoluciones verdes" en Asia se han basado en el uso continuado y generalizado de aguas subterráneas poco profundas para la irrigación en la estación seca por parte de los pequeños agricultores y el aumento de la resiliencia regional a la disponibilidad estacional de agua (Schneider y Asch, 2020). En el África tropical hay cada vez más llamamientos (Cobbing, 2020) para aprovechar el almacenamiento de aguas subterráneas con el fin de mejorar la resiliencia climática del abastecimiento de agua y alimentos, en pos de los ODS 2, 6 y 13, entre otros. Las adaptaciones a la escasez de agua provocada por el clima en ciudades como Dar es Salaam (Tanzanía) en 1997 y Ciudad del Cabo (Sudáfrica) en 2017 implicaron no solo reducciones en la demanda de agua dulce, sino también estrategias de abastecimiento que utilizaron cada vez más las aguas subterráneas como una fuente de agua dulce resistente al clima que puede utilizarse conjuntamente con los recursos hídricos superficiales (CoCT, 2019). Además, la mejora de la higiene comunitaria y la provisión de saneamiento pueden mejorar la resiliencia del abastecimiento de agua subterránea al cambio climático en comunidades densamente pobladas y de bajos ingresos, al reducir los riesgos de contaminación fecal (OMS, 2019).

Las respuestas humanas al cambio climático que emplean adaptaciones basadas en las aguas subterráneas incluyen una serie de estrategias de recarga gestionada de acuíferos (MAR) para aumentar la disponibilidad de agua dulce (véase la sección 11.5). Dillon et al. (2019) dividen las estrategias MAR en cuatro grandes categorías: a) modificación de los canales de los arroyos, b) filtración de las riberas, c) dispersión del agua y d) pozos de recarga. Cada una se describe con ejemplos de su aplicación en el cuadro 7.1.

7.5 Mitigación del cambio climático basada en las aguas subterráneas a través de la energía geotérmica baja en carbono

La energía geotérmica es el calor almacenado y transmitido en el subsuelo. Esta sección se centra en las aguas subterráneas como agente de almacenamiento, movimiento y extracción de la energía geotérmica. El desarrollo de la energía geotérmica desempeña un papel importante en la reducción de las emisiones de CO_2 y en la transición hacia fuentes de energía sostenibles. Aunque los fluidos del subsuelo de alta entalpía (>150°C) pueden utilizarse para producir electricidad y calefacción, las aguas subterráneas de menor entalpía (40°C a 150°C) también pueden utilizarse, principalmente para la calefacción. Incluso las aguas subterráneas poco profundas y de baja temperatura (a menudo entre 5 y 25 °C) pueden utilizarse para proporcionar refrigeración y calefacción con bajas emisiones de carbono a través de bombas de calor geotérmicas (GSHP).

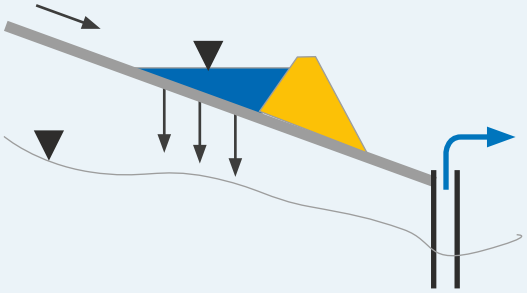
7.5.1 Energía geotérmica para la generación de electricidad con bajas emisiones de carbono

La producción de electricidad geotérmica suele requerir perforaciones profundas para acceder a altas temperaturas y una permeabilidad significativa a tales profundidades para permitir la libre circulación de los fluidos. Los fluidos utilizados pueden ser aguas subterráneas naturales dentro de acuíferos sedimentarios profundos (por ejemplo, en Italia y California, Estados Unidos) o complejos ígneos (por ejemplo, en El Salvador, Islandia y Kenya). Por otra parte, cuando las rocas tienen una permeabilidad limitada, pueden estimularse artificialmente o fracturarse hidráulicamente para permitir la circulación de los fluidos introducidos, formando un "sistema geotérmico mejorado" (EGS, por ejemplo, Soultz-sous-Forêts, Francia). La generación de electricidad requiere convencionalmente la

Cuadro 7.1 Estrategias de recarga gestionada de acuíferos (MAR)

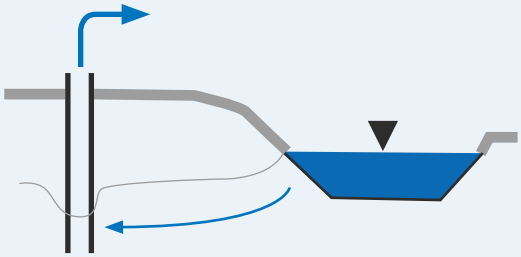
a) Modificación del cauce del río

La modificación del cauce del río describe infraestructuras como pequeñas presas, estanques y depósitos que detienen el escurrimiento superficial para abastecer de agua potable e irrigación a través de la infiltración dirigida, reponiendo los acuíferos subyacentes. La aplicación de esta estrategia de MAR tiene una larga historia en los acuíferos de roca dura de la India peninsular (Boisson et al., 2014) y en las llanuras aluviales de Rajastán en el noroeste de la India (Dashora et al., 2018). Otros ejemplos incluyen enormes presas de recarga en Omán que se operan en combinación con la propagación del agua en una serie de cuencas de recarga conectadas (Dillon et al., 2019).



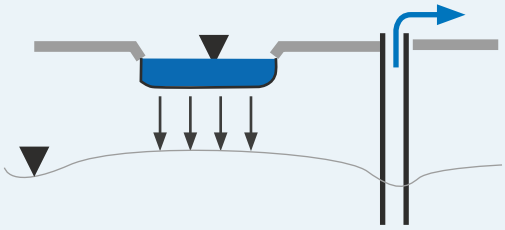
b) Banco de filtración

La filtración de ribera se refiere al proceso de mejorar la infiltración de las aguas superficiales mediante la extracción de aguas subterráneas junto a los ríos y otras masas de agua superficiales, de modo que se aumenta el gradiente hidráulico desde las aguas superficiales hasta el pozo de bombeo. Como informan Dillon et al. (2019), el abastecimiento de agua de la ciudad de Budapest se sustenta en su totalidad en el filtrado de ribera del río Danubio.



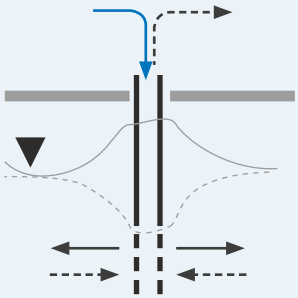
c) Esparcimiento de agua

El esparcimiento se refiere al uso de aguas de inundación para aumentar la humedad del suelo para la producción de alimentos en tierras de cultivo de secano. Los proyectos de dispersión del agua que emplean las descargas de las inundaciones del río Colorado en Arizona (Estados Unidos) han demostrado que aumentan el almacenamiento de las aguas subterráneas para las ciudades de las tierras secas, como Phoenix y Tucson (Scanlon et al., 2016). En los Países Bajos, las aguas fluviales tratadas del Rin se transportan por tuberías hasta las áreas de dunas costeras donde se infiltran como recarga de aguas subterráneas en cuencas (Sprenger et al., 2017).



d) Pozos de recarga (almacenamiento y recuperación de acuíferos, ASR)

El uso de pozos de recarga es la práctica de inyectar agua en los acuíferos a través de pozos y suele denominarse Almacenamiento y Recuperación de Acuíferos (ASR) o Transferencia y Recuperación de Acuíferos (ASTR). En el norte de Europa, los excedentes estacionales (de invierno) de las aguas superficiales recogidas en los embalses suelen transferirse a los acuíferos poco profundos mediante pozos de inyección para sostener los aumentos previstos de la demanda de agua en verano (Hiscock et al., 2011). En la costa de Bangladesh, la resistencia de las comunidades rurales al aumento de la salinidad costera se ha mejorado mediante la creación de lentes de agua dulce dentro de acuíferos confinados poco profundos y parcialmente salinos. Esto se consigue mediante la inyección de agua estacional de estanques procedente de las descargas de las inundaciones o del agua de lluvia recogida en pozos con drenaje por gravedad (Sultana et al., 2015). En Windhoek (Namibia), la resistencia del abastecimiento de agua de la ciudad a la variabilidad y el cambio climático se ha incrementado mediante la transferencia, a través de pozos de inyección, de aguas superficiales tratadas y estacionales al sistema acuífero de cuarcita fracturada (Murray et al., 2018).



Fuente: Basado en AIH (2005).

producción de vapor en la superficie para accionar las turbinas. Sin embargo, la electricidad puede generarse a temperaturas más bajas (<180°C) en sistemas de ciclo binario, en los que el agua caliente producida se utiliza para vaporizar fluidos orgánicos (por ejemplo, butano o pentano a alta presión) que accionan las turbinas.

En 2020, unos 30 países generaban un total de 95 TWhe de electricidad geotérmica al año, con una capacidad total instalada de 16,0 GWe. Esto supone un aumento de 3,7 GWe con respecto a 2015, con un coste estimado de 10 400 millones de dólares[25]. Los mayores países productores (por orden de capacidad total instalada) son: los Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Türkiye y Kenya, todos ellos conocidos por sus provincias geotérmicas y volcánicas activas (Huttrer, 2021). En los últimos años, el crecimiento relativo de la energía eólica y solar ha superado al de la electricidad geotérmica, lo que refleja el menor coste y riesgo percibido de la primera, así como sus menores periodos de amortización. Sin embargo, las centrales geotérmicas son, al contrario que las eólicas y solares, muy adecuadas para producir una carga eléctrica de base. Se prevé que la capacidad instalada crezca un ~20 % entre 2020 y 2025 (Huttrer, 2021).

7.5.2 Uso de las aguas subterráneas para la calefacción y la refrigeración con bajas emisiones de carbono

Una de las principales oportunidades que ofrece la energía geotérmica de baja entalpía es su contribución a la descarbonización de la calefacción y la refrigeración doméstica, comercial e industrial, que representa al menos el 40 % del consumo energético mundial y de las emisiones de CO_2 (AIE, 2019b). La capacidad geotérmica instalada para el abastecimiento térmico directo (incluyendo GSHP) en 2020 fue de casi 108 GWt, marcando una tasa de crecimiento de ~9 % anual, con 284 TWht por año suministrados (Lund y Tóth, 2020). Los países líderes son (por orden de capacidad instalada) China, los Estados Unidos y Suecia, y los países escandinavos tienen un alto consumo per cápita (sobre todo debido a las GSHP). De la capacidad instalada, 78 GWt (72 %) fueron suministrados por bombas de calor geotérmicas (Lund y Tóth, 2020).

Una de las principales oportunidades que ofrece la energía geotérmica de baja entalpía es su contribución a la descarbonización de la calefacción y la refrigeración doméstica

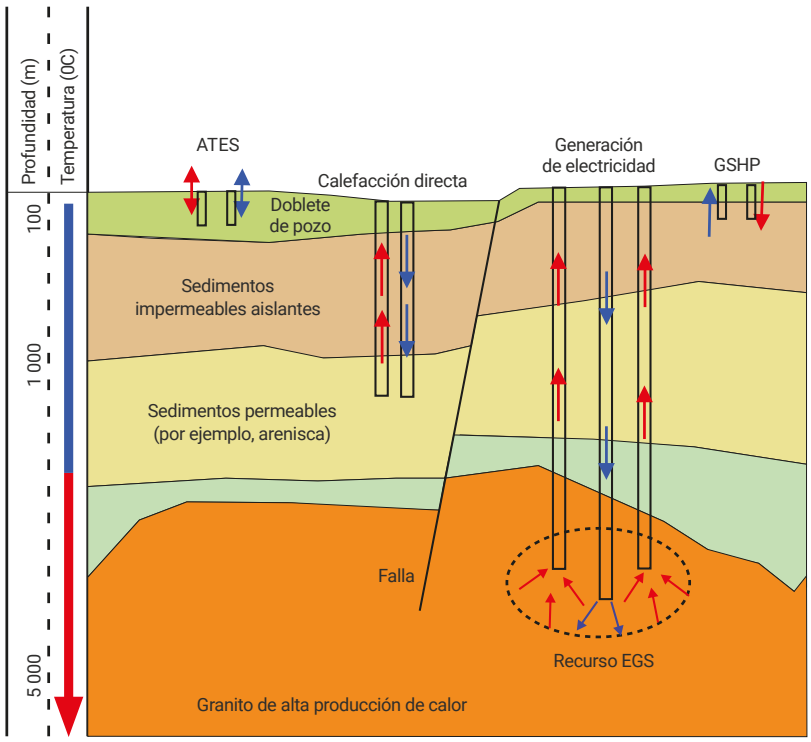
Las aguas subterráneas poco profundas (entre 0 y 200 m) suelen tener una temperatura bastante constante y ligeramente más cálida que la temperatura media anual del aire (figura 7.5). Por lo tanto, oscila entre unos 5°C en el norte de Escandinavia y más de 25°C en el África Subsahariana. La temperatura suele aumentar entre 2,5 y 3°C por cada 100 m de profundidad, de modo que a 1,5 km de profundidad las temperaturas suelen acercarse o superar los 50°C. Si existe un acuífero transmisivo a esas profundidades, el agua subterránea puede utilizarse para la calefacción directa de edificios individuales, edificios múltiples (redes de calefacción urbana), piscinas, horticultura (invernaderos) o acuicultura. Una vez que se ha extraído el calor de las aguas subterráneas mediante un intercambiador de calor, el agua "gastada térmicamente" suele devolverse al yacimiento a través de un pozo (o pozos) de reinyección para mantener la presión del yacimiento y evitar la posible contaminación de la superficie por solutos naturales no deseados. Esta disposición se denomina pozo doble (figura 7.5 – Fridleifsson et al., 2008; Banks, 2012; Kramers et al., 2012).

Los grandes edificios modernos (oficinas, centros de datos, hospitales, etc.) tienen una gran necesidad de refrigeración, incluso en invierno y en climas templados. Muchos procesos industriales también tienen necesidades de refrigeración, y es probable que la necesidad de refrigeración con bajas emisiones de carbono aumente a medida que avance el cambio climático. Las aguas subterráneas frías y poco profundas (por ejemplo, de 10 a 12°C en muchas partes del Reino Unido) son muy adecuadas para recibir el calor excedente y efectuar la refrigeración, a través de una disposición de doble pozo. Las aguas subterráneas frías y poco profundas también pueden utilizarse para la calefacción a través de una bomba

[25] Tenga en cuenta que GW (gigavatio) es una unidad de potencia (tasa de suministro de energía), mientras que TWh (teravatios-hora) es una unidad de energía total entregada. Los subíndices e y t se refieren a la energía eléctrica y térmica, respectivamente.

Figura 7.5

Diagrama esquemático que muestra los diferentes tipos de sistemas de energía geotérmica, incluidos el almacenamiento de energía térmica en acuíferos (ATES), la bomba de calor geotérmica (GSHP) y el sistema geotérmico mejorado (EGS)



Fuente: Autores, adaptado de Driscoll y Middlemis (2011).

de calor. Una bomba de calor es un dispositivo refrigerante accionado eléctricamente que transfiere el calor de un medio frío (por ejemplo, el agua subterránea a 10°C) a un medio caliente (por ejemplo, un sistema de calefacción central a 45°C)[26]. Aunque las tecnologías eólica y solar pueden generar electricidad con bajas emisiones de carbono, existen relativamente pocas tecnologías que proporcionen calefacción con bajas emisiones de carbono. La bomba de calor es una tecnología clave que utiliza la electricidad de forma muy eficiente para proporcionar calefacción y refrigeración. Puede ser capaz de suministrar 3,5 kW de calor a un edificio por cada 1 kW de energía eléctrica consumida, lo que se traduce en una drástica reducción de costes y de emisiones de CO_2. Se calcula que en 2020 habrá instaladas en todo el mundo unos 6,5 millones de bombas de calor geotérmicas, lo que representa la parte del sector geotérmico de más rápido crecimiento (Lund y Tóth, 2020).

El uso de la tecnología geotérmica superficial (de baja entalpía) para la calefacción y la refrigeración es especialmente atractivo en los climas continentales templados, donde hay una gran "oscilación" estacional de la temperatura del aire y donde las temperaturas de las aguas subterráneas no solo son mucho más cálidas que las del aire en invierno, sino también mucho más frías que las del aire en verano. En este caso, el calor excedente de los procesos de refrigeración, inyectado en el suelo durante el verano, puede almacenarse en el acuífero y recuperarse para ser utilizado durante el invierno. Es lo que se denomina Almacenamiento de Energía Térmica en Acuíferos (ATES). En países pioneros, como los Países Bajos y Suecia, las aguas subterráneas se consideran cada vez más un componente más (una fuente estacional, un sumidero o un "amortiguador" térmico) en las redes flexibles de calefacción y refrigeración de distrito de quinta generación (por ejemplo, Verhoeven et al., 2014, Buffa et al., 2019).

[26] Que las bombas de calor no necesitan aguas subterráneas: también pueden extraer el calor de suelos y rocas no saturados/de baja permeabilidad, de aguas superficiales, de aguas residuales y del aire.

La captura y secuestro de carbono es el proceso de almacenamiento de carbono en acuíferos profundos para frenar la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera

7.5.3 Impactos, riesgos e incentivos

Los impactos ambientales de los sistemas geotérmicos bien diseñados son limitados, pero pueden producirse impactos adversos si los acuíferos se gestionan mal. Cuando no se practica la reinyección de fluidos geotérmicos, el almacenamiento de aguas subterráneas puede agotarse y provocar hundimientos, como se observó en Shanghái (China) (Banks, 2012). Cuando se reinyectan aguas subterráneas "gastadas térmicamente", los riesgos son menores, pero aún pueden producirse movimientos locales del suelo, y las altas densidades de los sistemas de calefacción o refrigeración pueden provocar cambios en la temperatura del acuífero. Los cambios netos de temperatura de los acuíferos pueden tener repercusiones medioambientales y, en última instancia, hacer que el recurso geotérmico sea menos adecuado para su explotación. Por ejemplo, el marco normativo holandés exige que los sistemas ATES estén aproximadamente equilibrados térmicamente para evitar dichos cambios de temperatura (Dutch ATES, 2016). La reinyección de aguas subterráneas mal gestionada también conlleva cierto riesgo de mezclar recursos de aguas subterráneas de buena y mala calidad, lo que puede conducir a un deterioro general de la calidad de las aguas subterráneas. En el caso de los sistemas geotérmicos profundos, en los que se aplican altas presiones de reinyección, es necesario vigilar cuidadosamente el riesgo de miscroseismicidad (Holmgren y Werner, 2021). Además de los impactos ambientales, puede haber limitaciones económicas y de riesgo para el desarrollo de la energía geotérmica. Los costes y los riesgos del proyecto tienden a aumentar con la profundidad, ya que el coste de la perforación se incrementa desproporcionadamente con la profundidad, mientras que el conocimiento hidrogeológico necesario se vuelve menos seguro. Una vez construido el pozo, el operador tiene que enfrentarse al reto casi omnipresente de evitar la obstrucción de los pozos de reinyección, así como a los costes que conlleva la supervisión del rendimiento, la temperatura y la química del pozo. Dado que la perforación profunda para probar nuevos recursos geotérmicos de alta entalpía conlleva un considerable gasto de capital "inicial" y un riesgo económico considerable de fracaso en la exploración, es discutible si la producción de energía geotérmica debe subvencionarse a una tasa determinada por MWh producido. Un enfoque más adecuado puede ser un plan de seguros respaldado por el gobierno o la industria para asegurar los riesgos de desarrollar una nueva perspectiva geotérmica, como se ha hecho en los Países Bajos (RVO, 2015).

7.6 Mitigación del cambio climático mediante la captura y el secuestro de carbono

La captura y secuestro de carbono (CAC) es el proceso de almacenamiento de carbono en acuíferos profundos para frenar la acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera. Se lleva a cabo porque los sumideros naturales de dióxido de carbono (CO_2) (es decir, los bosques, los océanos y los suelos) se consideran incapaces de albergar las cantidades cada vez mayores emitidas por los seres humanos y de mitigar sus consecuencias para el cambio climático. La CAC reduce las emisiones de CO_2 procedentes de fuentes puntuales, como los procesos industriales o la generación de energía, mediante la captura química del CO_2 emitido. A continuación, este CO_2 se comprime y se inyecta en estratos del subsuelo a profundidades superiores a los 800 m, donde las presiones y temperaturas imperantes son suficientes para convertir el gas CO_2 en líquido. Los lugares geológicos adecuados para el almacenamiento de CO_2 son los acuíferos profundos y los yacimientos de hidrocarburos agotados que están recubiertos por un acuitardo. El CO_2 flotante (menos denso) sube y migra a través de la formación, pero es atrapado físicamente por la roca de cubierta (Acuitardo). El CO_2 de fuentes únicas se almacena en sitios piloto para la investigación de CAC (por ejemplo, Ketzin, Alemania (Wiese y Nimtz, 2019); Lacq, Francia (Prinet et al., 2013); In Salah, Argelia (Ringrose, 2018); Aquistore, el Canadá (Lee et al, 2018a)) e instalaciones operativas (Sleipner y Snøhvit, Noruega (Chadwick et al, 2012; Ringrose, 2018); Decatur, los Estados Unidos (Finley, 2014); Gorgon, Australia (Trupp et al., 2021)). También se prevén proyectos en emplazamientos industriales, donde muchos emisores de CO_2 pueden utilizar el mismo o los mismos emplazamientos de almacenamiento (Porthos, Países Bajos; Northern Lights, Noruega; Teesside, Reino Unido).

El almacenamiento geológico de CO_2 a gran escala (es decir, proyectos del orden de 1 Mt de CO_2 al año) incluye los proyectos Sleipner y Snøhvit en el Mar del Norte y el Proyecto Quest en el Canadá (Gobierno de Alberta, 2019). En cada uno de estos sitios, se captura y se almacena permanentemente cada año ~1 Mt de CO_2 que de otro modo se liberaría a la atmósfera. Las extensas formaciones acuíferas salinas, tanto en tierra como en el mar, tienen una capacidad teórica para almacenar miles de millones de toneladas de CO_2, aunque la capacidad utilizable en la práctica será menor (Bachu et al., 2007; Bradshaw et al., 2007; Bachu, 2015; Goodman et al., 2016; Celia, 2017). Dado que los emplazamientos suelen estar alejados de las grandes fuentes de emisión y que el transporte intercontinental de CO_2 conlleva costes considerables, el potencial económico de almacenamiento de CAC es específico de cada país y región. En la mayoría de las regiones, las capacidades de almacenamiento en sí mismas no suponen una limitación para el uso de la CAC, pero siguen siendo necesarias las subvenciones gubernamentales para cubrir los costes. La CAC se considera una herramienta importante para reducir las emisiones de los combustibles fósiles del sector industrial y, cuando se combina con la combustión de biomasa y la captura directa de aire, para lograr emisiones negativas netas (IPCC, 2014b).

Capítulo 8

Perspectivas regionales sobre las aguas subterráneas

8.1 **UNESCO**
Jayakumar Ramasamy, Anne Lilande y Samuel Partey

AIH
Seifu Kebede Gurmessa y Alan MacDonald*

8.2 **CEPE**
Annukka Lipponen, Sarah Tiefenauer-Linardon, Sonja Koeppel y Andreas Scheidleder*****

Con contribuciones de Sharon Megdal (Centro de Investigación de Recursos Hídricos, Universidad de Arizona), Nihat Zal (AEMA) y Xuan Che (UNSD)

8.3 **CEPAL**
Silvia Saravia Matus

CeReGAS
Alberto Manganelli y Lucía Samaniego

UNESCO
Miguel Doria y Camila Tori

Con la colaboración de Alba Llavona y Lisbeth Naranjo (CEPAL)

8.4 **CESPAP**
Solene Le Doze y Dennis Lee

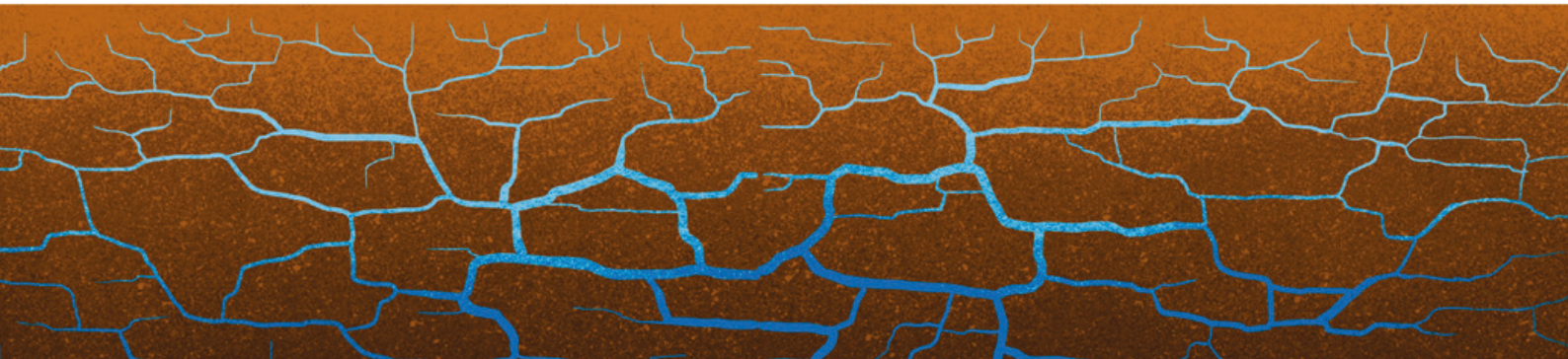
Con contribuciones de Danielle Gaillard-Picher (GWP)

8.5 **CESPAO**
Ziad Khayat, Tracy Zaarour y Carol Chouchani Cherfane

* Afiliado al British Geological Survey.

** con el Ministerio de Agricultura y Silvicultura de Finlandia en el momento de la publicación.

** Umweltbundesamt - Agencia de Medio Ambiente de Austria.



8.1 África Subsahariana

8.1.1 Introducción

Cerca de 400 millones de personas en el África Subsahariana no tienen acceso ni siquiera a los servicios básicos de agua. La mayoría de estas personas viven en áreas rurales (OMS/UNICEF, 2021). Incluso las ciudades, donde las conexiones domésticas son más comunes, sufren cortes de abastecimiento y un flujo poco fiable debido a la elevada y creciente demanda (Healy et al., 2020). Por lo tanto, la prioridad absoluta para la mayoría de los países es mejorar el acceso, primero a los servicios básicos y, finalmente, al abastecimiento doméstico gestionado de forma segura. Sin embargo, el cambio climático ejerce una mayor presión sobre los recursos hídricos superficiales disponibles, lo que provoca escasez de agua y sequías recurrentes que amenazan los progresos realizados hasta ahora (Taylor et al., 2013a). El amplio crecimiento de la demanda de agua debido al crecimiento de la población y la rápida urbanización se suma a la presión y aumenta la necesidad de ampliar los servicios de agua resistentes al clima.

Cerca de 400 millones de personas en el África Subsahariana no tienen acceso ni siquiera a los servicios básicos de agua

El desarrollo de las aguas subterráneas tiene, por tanto, un gran potencial para satisfacer la necesidad de un rápido aumento del abastecimiento de agua en toda el África Subsahariana, tanto para la supervivencia humana como para promover el desarrollo económico (Cobbing y Hiller, 2019). Las aguas subterráneas, como el mayor recurso de agua dulce disponible, son muy fiables para apoyar los medios de vida, especialmente durante periodos prolongados de lluvias inadecuadas o periodos de sequía, y podrían ayudar a abordar los problemas de escasez de agua y los choques relacionados con la sequía (Banco Mundial, 2018a; MacAllister et al., 2020). El desarrollo de las aguas subterráneas para el agua potable a través de bombas comunales y pozos domésticos privados está bien establecido en la mayoría de los países, pero el desarrollo debe ir mucho más lejos y más rápido. El uso para la irrigación y la industria sigue siendo bajo, excepto en algunas áreas localizadas, como en Sudáfrica, Zambia y Zimbabwe (Pavelic et al., 2012). Bajo un clima cambiante combinado con el crecimiento económico, la mayor prioridad sigue siendo que los países adopten las mejores prácticas para desarrollar y gestionar los recursos de aguas subterráneas, con el fin de satisfacer las demandas que compiten entre sí, reconociendo al mismo tiempo el importante papel que desempeñan las aguas subterráneas en el mantenimiento de los ecosistemas de agua dulce (Tuinhof et al., 2011). Esta sección proporciona una visión general de los recursos de agua subterránea en el África Subsahariana y las oportunidades y desafíos para la utilización de este importante recurso.

8.1.2 Estado del agua subterránea

Las aguas subterráneas constituyen la base del abastecimiento de agua en gran parte de África y su desarrollo está aumentando a medida que se incrementa la demanda de agua segura (MacDonald et al., 2021). A menudo se considera que los recursos hídricos subterráneos en África tienen el potencial de provocar una transformación socioeconómica general (Foster et al., 2012), de superar la actual variabilidad hidrológica (Grey y Sadoff, 2007) y de satisfacer la demanda futura. Estudios recientes piden que se despierte el "gigante dormido" de las aguas subterráneas (Cobbing y Hiller, 2019) mediante un mayor uso de las aguas subterráneas poco profundas para la irrigación (Gowing et al., 2020) y mediante el desarrollo de aguas subterráneas con energía solar para la irrigación y los esquemas de agua entubada (Wu et al., 2017; Gaye y Tindimugaya, 2019).

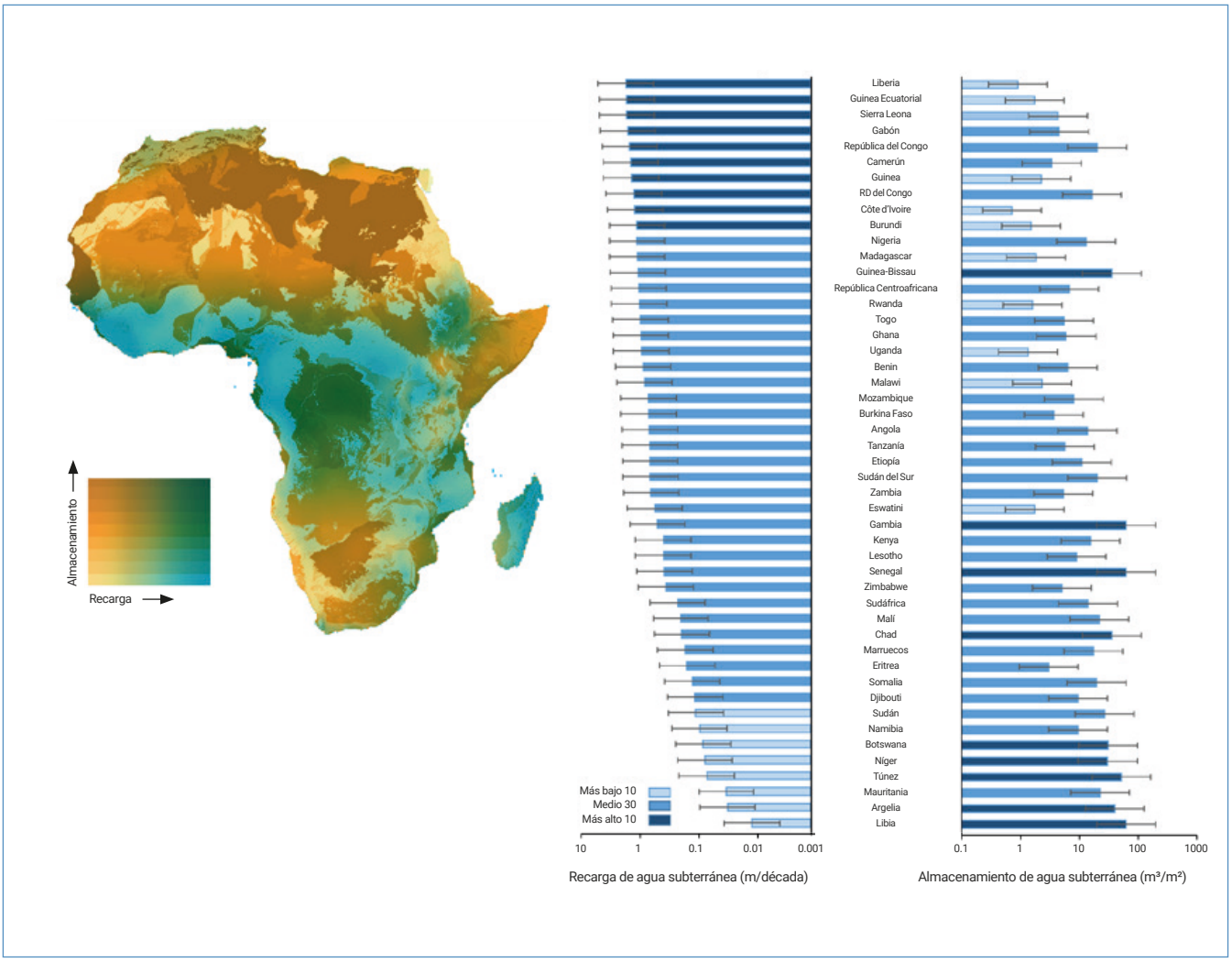
La promesa que encierra el agua subterránea no es solo una aspiración. Una amplia investigación hidrogeológica en todo el continente revela que África posee grandes recursos de agua subterránea. MacDonald et al. (2012), que elaboraron el primer mapa cuantitativo de las aguas subterráneas de África, estimaron que el almacenamiento total de aguas subterráneas en África es de 0,66 millones de km³ (0,36-1,75 millones de km³). No todo este almacenamiento de agua subterránea está disponible para su extracción, pero el volumen estimado es más de 100 veces el de la renovación anual estimada de los recursos de agua dulce en África (MacDonald et al., 2012). Curiosamente, con respecto al cambio climático, Cuthbert et al. (2019a) concluyeron que las tendencias climáticas futuras podrían afectar al

abastecimiento de agua superficial de África, pero podrían no disminuir los recursos de agua subterránea debido a la dependencia de la recarga de los eventos de precipitaciones intensas, que se prevé que aumenten en el futuro. Por lo tanto, se espera que las aguas subterráneas se utilicen cada vez más como fuente de abastecimiento de agua fiable en toda África (Giordano, 2009; MacDonald y Calow, 2009). Sin embargo, la heterogeneidad de la recarga, el almacenamiento de los acuíferos y la permeabilidad determinarán qué subregiones pueden beneficiarse más de las aguas subterráneas. El almacenamiento y la recarga de los acuíferos determinan la resistencia de los sistemas de aguas subterráneas al cambio climático y, por tanto, la seguridad hídrica futura. Según MacDonald et al. (2021, figura 8.1, pp. 10-11) "*La mayoría de los países africanos con poco almacenamiento de aguas subterráneas tienen una elevada pluviometría anual y, por tanto, una recarga regular. Por el contrario, muchos países africanos con escasas precipitaciones, que suelen considerarse inseguros en materia de agua, tienen un considerable almacenamiento de aguas subterráneas, que en su mayoría se recargaron hace milenios. […] Varios países, sobre todo (pero no exclusivamente) del norte de África, tienen una seguridad hídrica considerable si se tiene en cuenta el almacenamiento de aguas subterráneas. Este almacenamiento proporciona una importante reserva antes de que la extracción afecte al sistema regional de aguas subterráneas*". Sin embargo, el actual bombeo de aguas subterráneas se realizará en última instancia a expensas de las generaciones futuras. No hay que pasar por alto los aspectos económicos, financieros y medioambientales del agotamiento del almacenamiento. El almacenamiento de aguas subterráneas es generalmente bajo en África Occidental y Central (figura 8.1). En estas subregiones, el almacenamiento de aguas subterráneas se repone con regularidad y es una fuente fiable de agua, aunque la limitada capacidad de almacenamiento puede hacer que los países de esta área sean vulnerables a periodos prolongados de sequía.

El desarrollo del potencial de las aguas subterráneas para generar resultados positivos para la subsistencia depende de muchos desafíos geofísicos y de gobernanza locales y regionales. Uno de los retos hidrogeológicos es la calidad del agua subterránea. La mayor parte del agua subterránea almacenada es de naturaleza dulce o salobre. Sin embargo, un número considerable de acuíferos en áreas áridas y semiáridas, así como en las llanuras costeras, se ven afectados por contaminantes geogénicos como la salinidad y el flúor (Idowu y Lasisi, 2020). Algunos ejemplos son la intrusión de agua salada en las llanuras costeras del norte de África, desde Egipto hasta Túnez. Las aguas subterráneas del Rift de África Oriental suelen tener altas concentraciones de flúor: un estudio realizado en Etiopía descubrió que más del 40 % de los pozos de sondeo del valle del Rift de Etiopía tienen concentraciones superiores a las directrices establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y, por tanto, constituyen un riesgo importante para la salud (Tekle-Haimanot et al., 2006).

El deterioro antropogénico de la calidad de las aguas subterráneas también va en aumento, causado por factores como las actividades mineras (por ejemplo, en Sudáfrica), las malas prácticas de irrigación (por ejemplo, en el Valle del Nilo y la cuenca del río Senegal) y la urbanización (por ejemplo, en Nairobi, Accra, Maputo, etc.) (Lapworth et al., 2017). Un estudio reciente realizado en Etiopía, Malawi y Uganda revela que casi el 20 % de los pozos de agua superan la norma de calidad bacteriológica de la OMS (Lapworth et al., 2020). Los problemas de calidad de las aguas subterráneas pueden verse agravados por el cambio climático y el aumento del nivel del mar, lo que provocaría una mayor salinización de los sistemas de aguas subterráneas a través de la concentración evaporativa o la intrusión de agua marina. La recarga procedente de lluvias intensas también puede aumentar la contaminación bacteriológica. Debido a la diversidad de su entorno geológico, las zonas costeras de África, de 40 000 km de longitud, están compuestas por una miríada de sistemas acuíferos (Steyl y Dennis, 2010) con notables diferencias en el estado de intrusión de agua salada. La intrusión de agua salada inducida por la sobreexplotación de los acuíferos costeros ha provocado un aumento de la salinidad en varios países, como Egipto, Kenya, Libia, Tanzanía y Túnez, entre otros.

Figura 8.1 Resiliencia de las aguas subterráneas al cambio climático. Un elevado almacenamiento de aguas subterráneas amortigua los cambios a corto plazo de las precipitaciones, y una elevada recarga media de aguas subterráneas a largo plazo permite que un acuífero se recupere rápidamente después de una sequía.



Fuente: Adaptado de MacDonald et al. (2021, fig. 4, p. 7). Contiene material del British Geological Survey © UKRI 2021. Bajo licencia CC BY 3.0 IGO.

8.1.3 Disponibilidad y uso de los recursos hídricos subterráneos para la irrigación

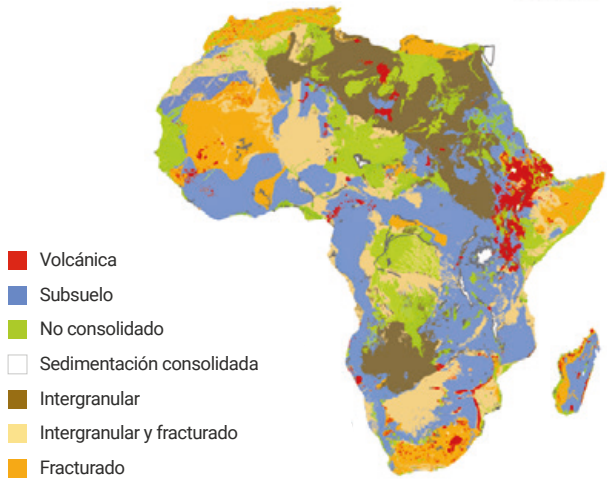
Cuatro amplias clases de acuíferos subyacen en gran parte del área subsahariana y se muestran en la figura 8.2 (MacDonald et al., 2012).

1. *Rocas volcánicas*: acuíferos complejos de varias capas que subyacen en gran parte del Cuerno de África, con rendimientos variables en los que el agua subterránea suele aparecer en las fracturas;
2. *Acuífero poco profundo*, extenso pero irregular, de bajo rendimiento de perforación, de aproximadamente 1 l/s, y bajo potencial de almacenamiento;
3. *Formaciones no consolidadas mayores y depósitos aluviales menores*: acuíferos no consolidados poco profundos que proporcionan rendimientos moderados y a menudo tasas de recarga favorables debido a su conexión con los ríos; y
4. *Rocas sedimentarias consolidadas*: acuíferos más gruesos de recarga variable, pero con perspectivas de mayor rendimiento con mayores costes de perforación.

El uso actual de las aguas subterráneas para la irrigación es limitado, en parte debido a las implicaciones de los costes asociados a la exploración y construcción de aguas subterráneas, y a las dificultades de financiación. Según Siebert et al. (2010), solo entre el 3 y el 5 % del total de las tierras cultivadas en el África Subsahariana está bajo riego, y la mayoría se concentra en tres países: Madagascar, Sudáfrica y Sudán. Sin embargo, la agricultura es la principal fuente de sustento para muchas personas. El sector agrícola representa alrededor del 30 % del producto interior bruto (PIB) en el África Subsahariana, pero emplea a cerca del 65 % de la población, la mayoría de la cual son mujeres (Banco Mundial, 2018a), y sin embargo los cultivos se producen casi en su totalidad en condiciones de secano. Dada la importancia del sector agrícola en África, cualquier mejora en el sector tiene el potencial de transformar las condiciones de vida de la población. El desarrollo de las aguas subterráneas podría actuar como catalizador del crecimiento económico al aumentar la extensión de las áreas de regadío y, por tanto, mejorar el rendimiento agrícola y la diversidad de los cultivos y, en última instancia, transformar toda la cadena de valor (Schoengold y Zilberman, 2007).

Figura 8.2

Distribución de los principales tipos de acuíferos en África



Fuente: MacDonald et al. (2012, fig. 4B, p. 6). Contiene material del British Geological Survey © UKRI 2012. Bajo licencia CC BY 3.0 IGO.

8.1.4 Desafíos relacionados con la explotación de las aguas subterráneas

A pesar del gran potencial de desarrollo de las aguas subterráneas en la región Subsahariana, hay varios factores que dificultan un mayor uso del recurso. La mayoría de estos retos son comunes a todos los países. El principal reto en materia de gobernanza consiste en superar la inercia de la estructura institucional. Hasta la última década, las aguas subterráneas han recibido poca atención por parte de los responsables políticos. Por ejemplo, mientras que los países del sudeste asiático aprovecharon sus recursos hídricos subterráneos para transformar la actividad agrícola en los años setenta y ochenta, en África no se hizo un esfuerzo semejante. África también se ha perdido muchas otras tendencias mundiales de desarrollo de las aguas subterráneas. A nivel mundial, muchos países empezaron a crear bases de datos de aguas subterráneas y a elaborar mapas hidrogeológicos en la década de 1980, pero en África todavía son escasos. El control regular de los niveles o la calidad de las aguas subterráneas, el primer paso para su gestión, se limita a unos pocos países (IGRAC, 2020). Hay pocas universidades que impartan clases de aguas subterráneas como asignatura, y pocos organismos profesionales de hidrogeólogos o perforadores. El intercambio de datos e información aún está en pañales, a pesar del rápido crecimiento y la disponibilidad de herramientas de captura de datos. Los marcos normativos para proteger y salvaguardar las aguas subterráneas a nivel nacional son débiles o no se aplican. Hay indicios de que las aguas subterráneas están empezando a tomarse más en serio, posiblemente debido a la constatación del importante papel que desempeñan en la consecución de los objetivos

de abastecimiento de agua. Por ejemplo, recientemente se han creado varias iniciativas a nivel continental, regional y nacional. Entre ellas se encuentran, por ejemplo, el Instituto de Gestión de Aguas Subterráneas de la Comunidad Sudafricana de Desarrollo (SADC) y la Oficina de Aguas Subterráneas y su programa asociado de aguas subterráneas dentro del Consejo Ministerial Africano sobre el Agua (AMCOW).

La financiación sigue siendo un problema crítico para el desarrollo de los recursos hídricos subterráneos. La brecha de financiación entre el gasto actual y lo que se necesita para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 es mayor en el caso del África Subsahariana, donde la consecución del abastecimiento universal de agua requeriría diez veces el nivel actual de inversión de 13 200 millones de dólares (Watts et al., 2021). Una gran parte de esta cantidad es necesaria para el funcionamiento, el mantenimiento y la rehabilitación de los sistemas existentes, que a menudo no consiguen atraer financiación.

El personal cualificado con capacidad para realizar estudios hidrogeológicos y geofísicos es escaso

El personal cualificado con capacidad para realizar estudios hidrogeológicos y geofísicos es escaso. Por lo tanto, los trabajos suelen ser realizados por personal semicualificado, lo que a menudo da lugar a una construcción de mala calidad o a perforaciones mal ubicadas, lo que provoca problemas de funcionalidad a largo plazo. Para ubicar y construir las perforaciones de mayor rendimiento necesarias para la irrigación a gran escala o el abastecimiento de las ciudades, el complejo entorno hidrogeológico que se encuentra en gran parte de África exige una experiencia considerable, que —de nuevo— es difícil de encontrar. La falta generalizada de profesionales de las aguas subterráneas repercute en la dotación de personal de las instituciones y de las oficinas gubernamentales locales y nacionales de muchos países, lo que obstaculiza las iniciativas emergentes para supervisar el seguimiento, la planificación y el desarrollo eficaces de las aguas subterráneas.

La naturaleza de los recursos hídricos subterráneos también puede suponer un reto para su desarrollo. Gran parte del continente se encuentra bajo acuíferos de roca cristalina, lo que generalmente limita el rendimiento de las perforaciones a menos de 1 l/s. En varios países de África Oriental subyacen acuíferos de roca volcánica, que tienen un almacenamiento limitado y trayectorias de flujo complejas (figura 8.2).

Los grandes acuíferos sedimentarios del norte de África suelen estar alejados del punto de necesidad. La calidad de las aguas subterráneas en el Rift de África Oriental puede ser un reto debido a los elevados niveles de flúor, y la contaminación antropogénica en las áreas urbanas se ve a menudo agravada por un saneamiento deficiente. Todavía no se ha detectado una contaminación generalizada por nitratos o pesticidas, aunque puede seguir las pautas observadas en otras partes del mundo a medida que se intensifican las prácticas agrícolas. Aunque su tratamiento suele ser más barato que el de las aguas superficiales, es probable que los costes de tratamiento de las aguas subterráneas aumenten.

8.1.5 Estudios de caso y mejores prácticas

Hay muchos ejemplos de desarrollo de aguas subterráneas en el África Subsahariana. El cuadro 8.1 ofrece el ejemplo de Ciudad del Cabo y las medidas que la ciudad adoptó para garantizar que los grifos siguieran fluyendo. Históricamente, Ciudad del Cabo dependía de las fuentes de agua superficiales para satisfacer sus necesidades de agua. Sin embargo, el aumento de la población unido al cambio climático provocó una crisis de escasez de agua, y las aguas subterráneas se convirtieron en parte de la solución.

Cuadro 8.1 Crisis de abastecimiento de agua en Ciudad del Cabo

Ciudad del Cabo es la segunda ciudad más grande de Sudáfrica, con una población de unos 3,7 millones de habitantes. Seis embalses en las montañas que rodean Ciudad del Cabo abastecen la mayor parte del agua de la ciudad, almacenando un máximo combinado de unos 900 millones de m³. A partir de 2015, una grave sequía redujo los volúmenes almacenados en estos embalses a niveles críticos. Sin buenas lluvias en 2018, existía la posibilidad real de un "Día Cero", cuando los grifos de la ciudad se secarán.

Ciudad del Cabo respondió a la crisis de varias maneras. Las fugas en el sistema se redujeron a cerca del 17 %, la mitad de la media nacional. Las campañas y las restricciones de agua redujeron a la mitad el uso total de agua en la ciudad, hasta unos 200 millones de m³/año. Las plantas desalinizadoras temporales y las aguas subterráneas de emergencia reforzaron el abastecimiento (con 6 millones de m³/año y 55 millones de m³/año, respectivamente). Se perforaron pozos independientes en escuelas, hospitales y otros lugares importantes para reducir su vulnerabilidad al Día Cero.

Fuente: Adaptado del Banco Mundial (2018a, cuadro 6, p. 34).

En 1990, el Ayuntamiento de Nairobi cerró los pozos utilizados para abastecer de agua a la ciudad cuando se puso en marcha el abastecimiento de agua de superficie desde el río Tana (con una capacidad de 520 Ml/día). Sin embargo, en 2002, la rotura de la red de abastecimiento (debido a un corrimiento de tierras), unida a las elevadas y persistentes fugas y pérdidas fiscales del sistema de distribución, hizo que la demanda de la ciudad no pudiera seguir satisfaciéndose y la disponibilidad de agua se redujera a menos de 200 Ml/día. En consecuencia, se perforaron muchos pozos de sondeo y se aumentó la capacidad a unos 300 Ml/día. Así, esta perforación (principalmente) privada ha conseguido mitigar una crisis de abastecimiento de agua (Tuinhof et al., 2011).

Otra herramienta utilizada en la región es la Recarga Artificial Dirigida (MAR) de los acuíferos, que implica la modificación del paisaje o el desarrollo de infraestructuras para mejorar la infiltración del agua en el suelo para su uso durante los periodos de sequía (véase el cuadro 7.1 y la sección 11.5). Un ejemplo de esta tecnología es su adopción en Windhoek (cuadro 8.2).

Cuadro 8.2 Plan de Recarga Artificial Gestionada (MAR) de Windhoek

Windhoek (la capital de Namibia) recibe una precipitación anual de 360 mm, lo que la convierte en una de las capitales más secas del planeta. A principios de la década de 1990, las fuentes de agua existentes en Windhoek (tres presas y un campo de pozos de agua subterránea) empezaron a tener problemas para satisfacer la creciente demanda de agua. Los estudios demostraron que las nuevas fuentes de agua, como el agua de mar desalinizada que habría que bombear desde la costa, estaban lejos y serían costosas de desarrollar.

Los planificadores de la ciudad respondieron con un conjunto de soluciones innovadoras: en épocas de superávit, el agua tratada se almacenaba bajo tierra en acuíferos, para protegerla de la evaporación y poder utilizarla en épocas de escasez. Windhoek también empezó a reutilizar una parte de sus aguas residuales, tratándolas según los estándares del agua potable en una nueva planta de tratamiento. Otras estrategias empleadas fueron la gestión de la demanda, destinada a identificar fugas, restringir el riego de jardines y aumentar la concienciación pública. A continuación, Windhoek comenzó a aplicar un abastecimiento de agua de "doble tubería" en algunas áreas: las aguas residuales semipurificadas de una antigua planta de tratamiento de aguas se distribuyeron a campos deportivos, parques y cementerios para su irrigación, ahorrando aún más agua potable. El plan MAR de Windhoek y otras acciones de gestión del agua han resultado mucho menos costosas que otras soluciones de abastecimiento de agua, y han convertido a Windhoek en un líder mundial en el uso sostenible del agua regenerada, y en el MAR.

Fuente: Adaptado del Banco Mundial (2018a, cuadro 7, p. 36).

8.1.6 Oportunidades y respuestas de la región

Está claro que existen oportunidades en el África Subsahariana para el aumento del desarrollo de los recursos hídricos subterráneos con el fin de satisfacer la creciente demanda causada por el crecimiento demográfico y económico, la rápida urbanización y las crecientes demandas de irrigación. A medida que el cambio climático sigue afectando a los patrones de precipitación, causando una mayor presión sobre los recursos hídricos superficiales existentes, las aguas subterráneas ofrecen la capacidad de amortiguación para proteger contra estas incertidumbres y proporcionar un abastecimiento de agua más fiable. El uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales ofrece un potencial considerable, ya que el abastecimiento de aguas subterráneas añade resistencia y capacidad a los recursos hídricos superficiales existentes, especialmente en las ciudades de rápido crecimiento (Jacobsen et al., 2013).

En la actualidad, el desarrollo de las aguas subterráneas en el África Subsahariana no está limitado por la falta de agua subterránea, sino por la falta de inversión

Sin embargo, el creciente desarrollo de las aguas subterráneas puede amenazar el servicio ecosistémico que estas proporcionan como flujo de base a los ríos y ecosistemas acuáticos. Ya se ha demostrado que el flujo de base se reduce en Nairobi, donde las aguas subterráneas se han desarrollado ampliamente (Oiro et al., 2020), y la descarga de aguas subterráneas a los ríos desde minas abandonadas ha causado una amplia contaminación en Sudáfrica (Ochieng et al., 2010). Los acuíferos transfronterizos también requieren una gestión particular, pero en muchas circunstancias, promueven el trabajo conjunto y el entendimiento, en lugar de causar conflictos.

En la actualidad, el desarrollo de las aguas subterráneas en el África Subsahariana no está limitado por la falta de agua subterránea, sino por la falta de inversión. Hay una necesidad apremiante de encontrar formas de liberar el potencial de las aguas subterráneas, con el fin de ayudar a desarrollar medios de vida sostenibles y lograr un crecimiento equitativo. Esto implica inversiones en infraestructuras, instituciones, profesionales formados y conocimiento del recurso.

Los avances tecnológicos (como la observación de la Tierra, las energías renovables y los métodos avanzados de perforación) pueden apoyar el desarrollo de las aguas subterráneas, pero deben ir acompañados de una sólida comunidad profesional de aguas subterráneas, para obtener lo mejor de las tecnologías.

Históricamente, las inversiones en aguas subterráneas se consideraban menos favorables que los planes de aguas superficiales, ya que gran parte de la infraestructura era invisible y, por lo tanto, se pensaba que estaba más sujeta a la corrupción. Sin embargo, los estudios realizados en el África Subsahariana han demostrado que el desarrollo de las aguas subterráneas no sufre de manera desproporcionada la corrupción (Plummer, 2012). Para mejorar la funcionalidad de los puntos de agua serán necesarias inversiones que promuevan normas de construcción más seguras y eficientes. Las inversiones en las instituciones necesarias para la gestión de las aguas subterráneas también son necesarias para garantizar que el desarrollo futuro no amenace la sostenibilidad del recurso.

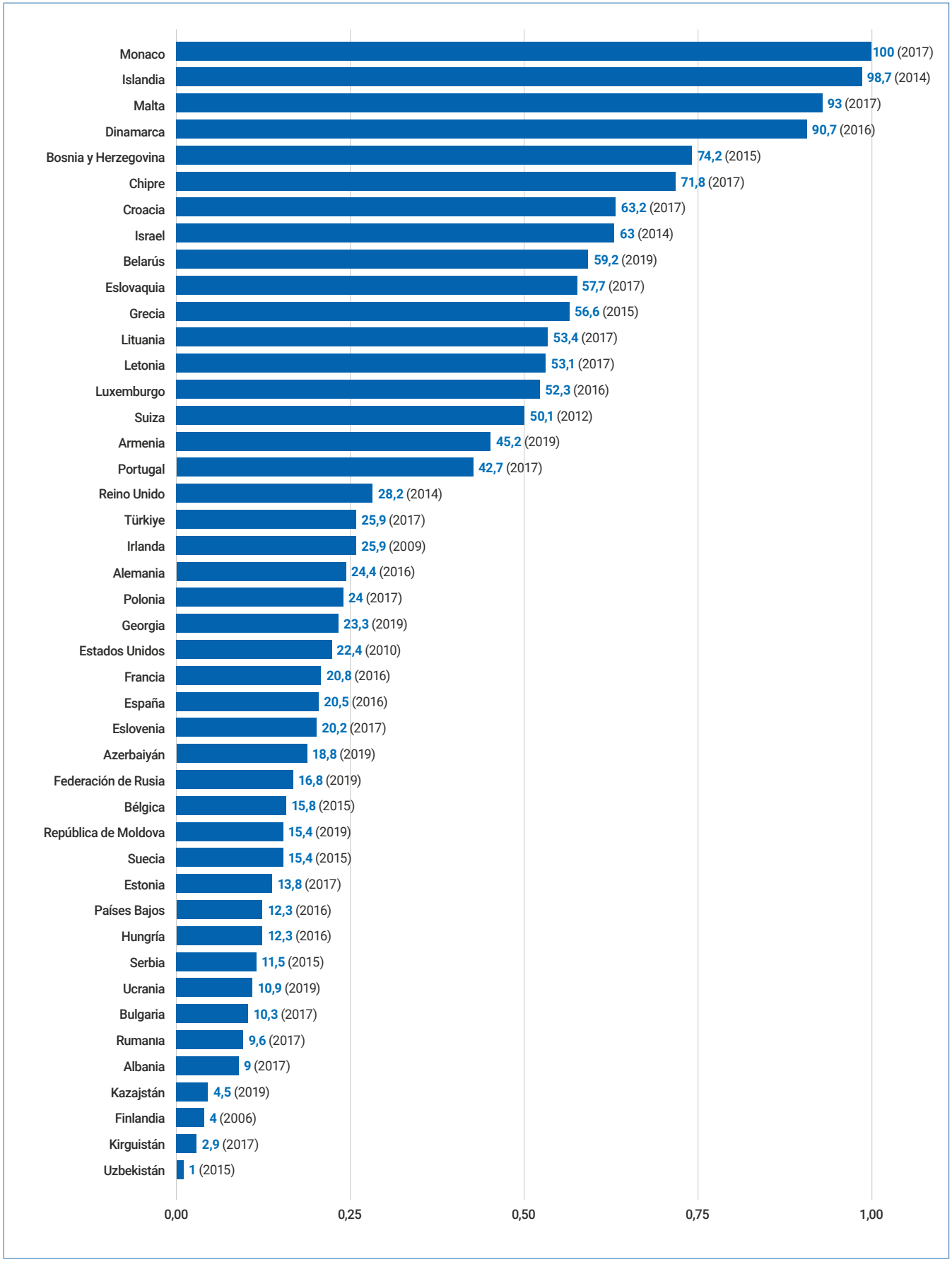
8.2 Europa y América del Norte

Las características de los recursos hídricos subterráneos y su disponibilidad varían entre y dentro de Europa y América del Norte, lo que refleja las diferencias en la geología y la hidrología (véase el prólogo, figura 6). En este capítulo se describe brevemente la extracción de aguas subterráneas en las distintas subregiones, las particularidades de la gobernanza en cada una de ellas y algunos retos urgentes específicos de las aguas subterráneas (por ejemplo, la contaminación).

8.2.1 Extracción y uso de los recursos hídricos subterráneos

El porcentaje que representan las aguas subterráneas respecto a la extracción total de agua dulce varía mucho según el país en toda Europa y América del Norte, oscilando entre el 1 y el 100 % (figura 8.3).

Figura 8.3 Agua dulce subterránea extraída como porcentaje del agua dulce total (bruta) extraída en países seleccionados (último año disponible)



Fuente: UNSD, a partir de datos de Eurostat, la OCDE y el Cuestionario de Medio Ambiente de la UNSD.

En 2017, el 24 % de la extracción total de agua en el área de la Unión Europea, Islandia, Liechtenstein, Noruega, Suiza y Türkiye procedía de aguas subterráneas (AEMA, 2019). Las aguas subterráneas constituyen una importante fuente de agua doméstica: alrededor del 75 % de los habitantes de la Unión Europea (UE) dependen de las aguas subterráneas para su abastecimiento (Comisión Europea, 2008). Para la industria y la agricultura (irrigación), las aguas subterráneas también son importantes.

En los Estados Unidos, la extracción de agua dulce subterránea en 2015 se estimó en 311,5 millones de m³/día, aproximadamente un 8 % más que en 2010 (Dieter et al., 2018), mientras que las extracciones totales de agua dulce han tendido a la baja desde 2005. En el Canadá, el 30,3 % de la población depende de las aguas subterráneas para su uso municipal, doméstico y rural (Gobierno del Canadá, 2013).

8.2.2 La evolución de la gestión y gobernanza de las aguas subterráneas

La tabla 8.1 ofrece una visión general indicativa de algunos aspectos de integración regional de la gobernanza de las aguas subterráneas en las subregiones analizadas en este capítulo.

Tabla 8.1 Algunas características generales de la gobernanza de las aguas subterráneas para cada subregión, desde una perspectiva de integración regional (solo a título indicativo)

Subregión	Unión Europea (UE)	Europa del Este, Cáucaso y Asia Central	América del Norte
Nivel de integración regional y coherencia de los enfoques de la gobernanza de las aguas subterráneas	La Directiva Marco del Agua (DMA) y la Directiva de Aguas Subterráneas incorporan un enfoque integrado de las aguas superficiales y subterráneas. La Estrategia Común de Aplicación de la UE, incluido su Grupo de Trabajo sobre Aguas Subterráneas, fomenta la armonización regional y la coherencia de las políticas.	Históricamente, el área tenía un enfoque común, que se ha diversificado con el tiempo dentro de los países. Por lo general, las aguas subterráneas dependen de autoridades diferentes a las de las aguas superficiales. El enfoque de la DMA (masas de agua subterránea, etc.) se ha ido adoptando progresivamente en los países vecinos de la UE.	Descentralización: los estados individuales (federados) (Estados Unidos) y las provincias y territorios (Canadá) desempeñan un papel fundamental en la gestión de las aguas subterráneas. Existen importantes diferencias entre los estados de los Estados Unidos en cuanto a la política de aguas subterráneas, también en lo que respecta a la vinculación con las aguas superficiales.

Los objetivos medioambientales de la Directiva Marco del Agua (DMA) de la UE, que desde el año 2000 ha proporcionado un marco jurídico regional en la política del agua, obligan a los Estados miembros de la UE a prevenir el deterioro del buen estado y a proteger, mejorar y restablecer el buen estado de las aguas subterráneas, lo que implica la consideración del estado cuantitativo y químico (cuadro 8.3).

La DMA ha contribuido a armonizar los enfoques de delimitación y evaluación de las masas de agua subterránea

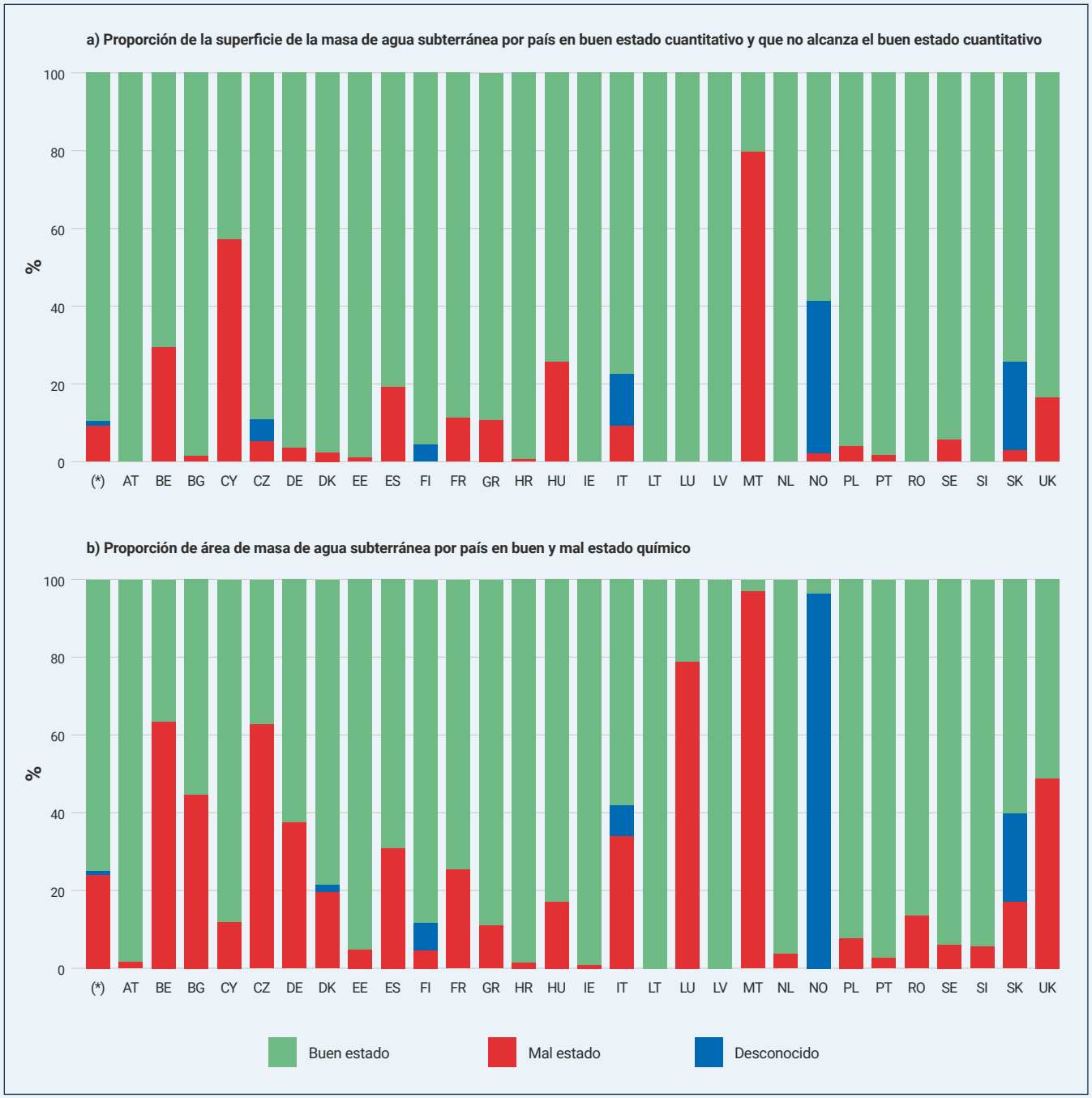
La DMA exige que se identifiquen y caractericen las masas de agua subterránea y que, junto con los datos de seguimiento, se evalúen los impactos de las presiones humanas sobre las aguas subterráneas. También aborda los riesgos de incumplimiento de los objetivos medioambientales y establece medidas para alcanzar y mantener un buen estado cuantitativo y químico. La DMA ha contribuido a armonizar los enfoques de delimitación y evaluación de las masas de agua subterránea, también en los países vecinos de la UE (cuadro 8.4).

En varios países de Europa del Este, el Cáucaso y Asia Central, el principio de la gestión integrada de las aguas superficiales y subterráneas ha estado ausente hasta hace poco en la legislación sobre el agua. Se necesitaba una mejor protección ya que, por ejemplo, la concesión de licencias de extracción no se utilizaba ni se controlaba suficientemente (CEPE, 2011). En muchos de estos países, el seguimiento y la evaluación de las aguas subterráneas se degradaron tras la desintegración de la Unión Soviética, aunque algunos países mantienen una sólida tradición científico-técnica. Georgia es un ejemplo de ello: no

Cuadro 8.3 Estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea en la Unión Europea

Durante el segundo ciclo de los planes de gestión de las cuencas hidrográficas (2016-2021) en la UE, se evaluó el estado de las masas de agua subterránea (AEMA, 2018a; véase la figura siguiente), mostrando que se había alcanzado un buen estado químico para el 74 % de las masas de agua subterránea (GWB, una unidad de gestión), mientras que se había alcanzado un buen estado cuantitativo para el 89 % de las masas de agua subterránea (AEMA, 2019). Para un buen estado cuantitativo, el recurso de agua subterránea disponible no debe reducirse por la extracción, pero también deben evitarse los impactos en las aguas superficiales vinculadas o en los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas, entre otros.

Estado cuantitativo y químico de las masas de agua subterránea



Nota: (*): Media regional; AT (Austria), BE (Bélgica), BG (Bulgaria), CY (Chipre), CZ (República Checa), DE (Alemania), DK (Dinamarca), EE (Estonia), ES (España), FI (Finlandia), FR (Francia), GR (Grecia), HR (Croacia), HU (Hungría), IE (Irlanda), IT (Italia), LT (Lituania), LU (Luxemburgo), LV (Letonia), MT (Malta), NT (Países Bajos), NO (Noruega), PL (Polonia), PT (Portugal), RO (Rumania), SE (Suecia), SI (Eslovenia), SK (Eslovaquia) y UK (Reino Unido).

Fuente: AEMA (2018a), a partir de los datos comunicados por los Estados miembros de la UE en virtud de la Directiva Marco del Agua.

hubo actividades de seguimiento centralizadas desde 1990 hasta 2013, y desde 2013 se han añadido o reactivado gradualmente estaciones de seguimiento, con el apoyo de diferentes proyectos (EUWI+, 2020). Los frecuentes cambios políticos y administrativos han dado lugar en muchos casos a la fragmentación, y el seguimiento y la evaluación de las aguas subterráneas siguen estando comúnmente separados de la gestión general del agua.

En los Estados Unidos también se han producido cambios sustanciales en la gobernanza de las aguas subterráneas, y existen diferencias significativas entre los marcos legales de cada estado para las aguas subterráneas, incluso en la forma en que se refleja la conexión hidrológica entre las aguas superficiales y las subterráneas (Megdal et al., 2014). La mayoría de los marcos jurídicos tratan la cantidad y la calidad del agua por separado, con organismos estatales distintos a cargo (Gerlak at al., 2013). En California, la Ley de Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas (Departamento de Recursos Hídricos de California, 2014) introdujo un marco de gobernanza de las aguas subterráneas en todo el estado que estableció agencias locales de sostenibilidad de las aguas subterráneas. Estas agencias tienen la responsabilidad de desarrollar y aplicar los controles reglamentarios relativos a la gestión de las aguas subterráneas (Kiparsky at al., 2017). En el Canadá, la Constitución establece que las provincias y los territorios tienen jurisdicción legal primaria sobre el agua y las aguas subterráneas, mientras que el Gobierno federal tiene poderes para gestionar las aguas subterráneas en tierras federales, incluidos los parques nacionales (Rivera, 2014).

Para los 42 países que comparten aguas en Europa y América del Norte, los marcos jurídicos e institucionales de cooperación transfronteriza abarcan cada vez más los acuíferos

Para los 42 países que comparten aguas en Europa y América del Norte, los marcos jurídicos e institucionales de cooperación transfronteriza abarcan cada vez más los acuíferos. De los 36 países que comparten acuíferos transfronterizos en la región, 24 han informado de que los acuerdos operativos cubren el 70 % o más de su área de acuíferos transfronterizos (CEPE/UNESCO, 2021). Los marcos institucionales y jurídicos, en particular la Convención sobre la Protección y el Uso de los Cursos de Agua Transfronterizos y los Lagos Internacionales, han reforzado la cooperación en la región (Lipponen y Chilton, 2018).

8.2.3 Retos y oportunidades relacionados con las aguas subterráneas

A continuación, se ilustran con ejemplos tres retos que afectan a los recursos hídricos subterráneos y, por tanto, a los usos y actividades socioeconómicas que dependen de ellos, o en los que las aguas subterráneas son parte de la solución: el cambio climático y la escasez de agua, los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas y, por último, la contaminación, incluidos los contaminantes emergentes.

Cuadro 8.4 El desafío de la transición de la evaluación hidrogeológica a la contabilización de las presiones humanas

La Iniciativa del Agua de la Unión Europea Plus para los países de la Asociación Oriental (EUWI+, 2016-2021) apoyó la aplicación de los principios de gestión integrada de la Directiva Marco del Agua (DMA) a las aguas superficiales y subterráneas en los países de la Asociación Oriental: Armenia, Azerbaiyán, Belarús, Georgia, República de Moldova y Ucrania. En particular, en el caso de las aguas subterráneas, fue un cambio desafiante, ya que se pasó del enfoque tradicional anterior, centrado en problemas locales individuales y en la descripción de la situación hidrogeológica y la química de las aguas subterráneas únicamente, a una perspectiva más holística de delimitación de las masas de agua subterránea (GWB, las unidades de gestión de la DMA) y a la consideración de las presiones humanas pertinentes y su impacto en la cantidad y la química de las aguas subterráneas. Con el apoyo de la EUWI+, se delimitaron en total 117 masas de agua subterránea (incluidas 42 transfronterizas). La cooperación entre Belarús y Ucrania, que están tomando medidas para aplicar la DMA, para identificar las masas de agua subterránea transfronterizas (Lyuta et al., 2021) demuestra el proceso y subraya la necesidad de armonizar a través de las fronteras.

Cambio climático y escasezes de agua

Los Estados de la región se enfrentan al reto de hacer frente a las presiones de extracción de agua, agravadas por el cambio climático, y las aguas subterráneas son un recurso crucial en este sentido, que ofrece algunas soluciones posibles.

En 2015, durante los meses de verano, el 33 % de la población de la región que abarca la Unión Europea, así como Liechtenstein, Noruega y Suiza, estuvo expuesta a condiciones de estrés hídrico[27] (AEMA, 2019). Los Estados miembros de la UE están intercambiando información sobre buenas prácticas para hacer frente a las presiones de extracción de agua, teniendo en cuenta el cambio climático. En la UE se está elaborando un documento de orientación sobre el MAR.

Las medidas previstas por el Gobierno de Kazajstán (2018) tienen como objetivo reducir la escasez de agua, tanto a nivel nacional como regional, asignar los recursos hídricos transfronterizos, utilizar las aguas subterráneas de forma eficiente y sostenible, construir nuevas infraestructuras, aumentar la cubierta forestal de las áreas de captación y aplicar liberaciones ambientales. En los Estados Unidos, el descenso de los niveles de las aguas subterráneas y los conflictos entre los usuarios se encuentran entre las principales prioridades comunes para la gobernanza de las aguas subterráneas que han identificado los funcionarios de las agencias estatales (junto con la calidad del agua y la contaminación) (Megdal et al., 2014; Petersen-Perlman et al., 2018). En los Estados Unidos se ha estudiado la comercialización del agua como medio para incentivar económicamente a los titulares de derechos de aguas subterráneas para que inviertan en la conservación del agua con el fin de obtener un beneficio por el agua no utilizada o por la transferencia a otros usuarios. En el estado de Arizona, la disminución de la disponibilidad de agua ha conducido al uso de efluentes como fuente alternativa, mientras que los cambios estatutarios autorizan los créditos de almacenamiento comercializables a largo plazo mediante la recarga de acuíferos a partir del agua del río Colorado o de efluentes (Bernat et al., 2020).

Ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas

En la UE, el ciclo del plan de gestión de cuencas fluviales que finaliza en 2021 muestra que los Estados miembros tienen cada vez más en cuenta la relación entre las aguas subterráneas y sus ecosistemas acuáticos asociados y los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas. Esto sirve para identificar mejor esos ecosistemas, para considerar más los aspectos de cantidad y calidad y para seguir estableciendo valores umbral adecuados para las aguas subterráneas derivados de las necesidades de los ecosistemas. Los avances se apoyan en informes técnicos (por ejemplo, Comisión Europea, 2011, 2014a, 2015).

El MAR proporciona formas de aprovechar el almacenamiento subterráneo en los acuíferos para los caudales variables (véase el cuadro 7.1 y la sección 11.5). Las organizaciones no gubernamentales (ONG) medioambientales cuantifican la recarga de aguas subterráneas en los acuíferos locales, así como sus beneficios para el ecosistema y la reducción del riesgo de inundaciones, lo que ayuda a crear asociaciones con múltiples beneficios. En California, los agricultores pueden recibir una compensación monetaria por recargar las aguas subterráneas a principios del otoño, cuando el agua es especialmente escasa. Estas prácticas de inundación controlada también proporcionan hábitats de humedales temporales críticos para las aves playeras que migran a lo largo de la ruta migratoria del Pacífico, que a menudo no tienen ningún lugar donde hacer escala en sus largas migraciones (The Nature Conservancy, s.f.). Otras experiencias de los Estados Unidos muestran que los fondos para el agua han permitido proteger los espacios verdes en las

[27] Como se define aquí, el "estrés hídrico" ocurre cuando el porcentaje de uso de agua contra los recursos renovables de agua dulce en un momento y lugar determinados (en este ejemplo a nivel de cuenca hidrográfica) supera el 20 %.

comunidades locales y sus alrededores y, en el caso del Acuífero Edwards de Texas que abastece a la ciudad de San Antonio, mejorar la calidad del agua que está recargando los acuíferos (The Nature Conservancy, 2019).

Calidad de las aguas subterráneas, contaminantes y riesgos para la salud

Los contaminantes que más comúnmente causan un mal estado químico en la UE son los nitratos, así como los pesticidas. Aunque predominan los contaminantes procedentes de la agricultura (y este problema no se limita a Europa), los productos químicos industriales y las sustancias relacionadas con la minería también provocan la contaminación química de las aguas subterráneas en varias demarcaciones hidrográficas (Figura 8.4 – AEMA, 2018b). Se necesita más información sobre los "nuevos" (o "emergentes") contaminantes en las aguas subterráneas. Se inició un proceso de establecimiento de una "lista de vigilancia" para las sustancias presentes en las aguas subterráneas en consonancia con la Directiva 2014/80/UE (que modifica la Directiva sobre aguas subterráneas, 2006/118/CE, en el marco de la DMA) tanto para "*aumentar la disponibilidad de datos de seguimiento sobre las sustancias que suponen un riesgo o un riesgo potencial para las masas de agua subterránea, y facilitar la identificación de las sustancias, incluidos los contaminantes emergentes, para las que deberían establecerse normas de calidad de las aguas subterráneas o valores umbral*" (Comisión Europea, 2014b). Hasta ahora, se han considerado los productos farmacéuticos, las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoradas (PFAS) y los metabolitos de plaguicidas no relevantes.

En muchos países de Europa, las aguas subterráneas se utilizan principalmente para el agua potable, lo que subraya la necesidad de controlar la calidad del agua para detectar posibles riesgos para la salud

En muchos países de Europa, las aguas subterráneas se utilizan principalmente para el agua potable, lo que subraya la necesidad de controlar la calidad del agua para detectar posibles riesgos para la salud. Estos esfuerzos se ven respaldados por la información sobre los objetivos nacionales que se fijaron los países en el marco del Protocolo sobre el Agua y la Salud de la CEPE/OMS (CEPE/OMS, 2019). Reflejando una cuestión más ampliamente emergente, los Países Bajos informaron de la gestión de nuevas sustancias, como los productos farmacéuticos, los microplásticos y las nanopartículas, entre los retos que preocupan a las aguas subterráneas, junto con las aguas superficiales (OCDE, 2019a). En un estudio realizado en los Estados Unidos, se detectó al menos un compuesto hormonal o farmacéutico en el 6 % de 844 emplazamientos de aguas subterráneas utilizadas para el abastecimiento público, lo que sugiere que los acuíferos tenían una vulnerabilidad limitada a la contaminación por estos compuestos (Bexfield at al., 2019). Sin embargo, algunos de estos contaminantes orgánicos emergentes y sus metabolitos pueden suponer una amenaza para las masas de agua subterránea, posiblemente durante décadas en determinadas condiciones, debido a los largos tiempos de residencia (Lapworth et al., 2012).

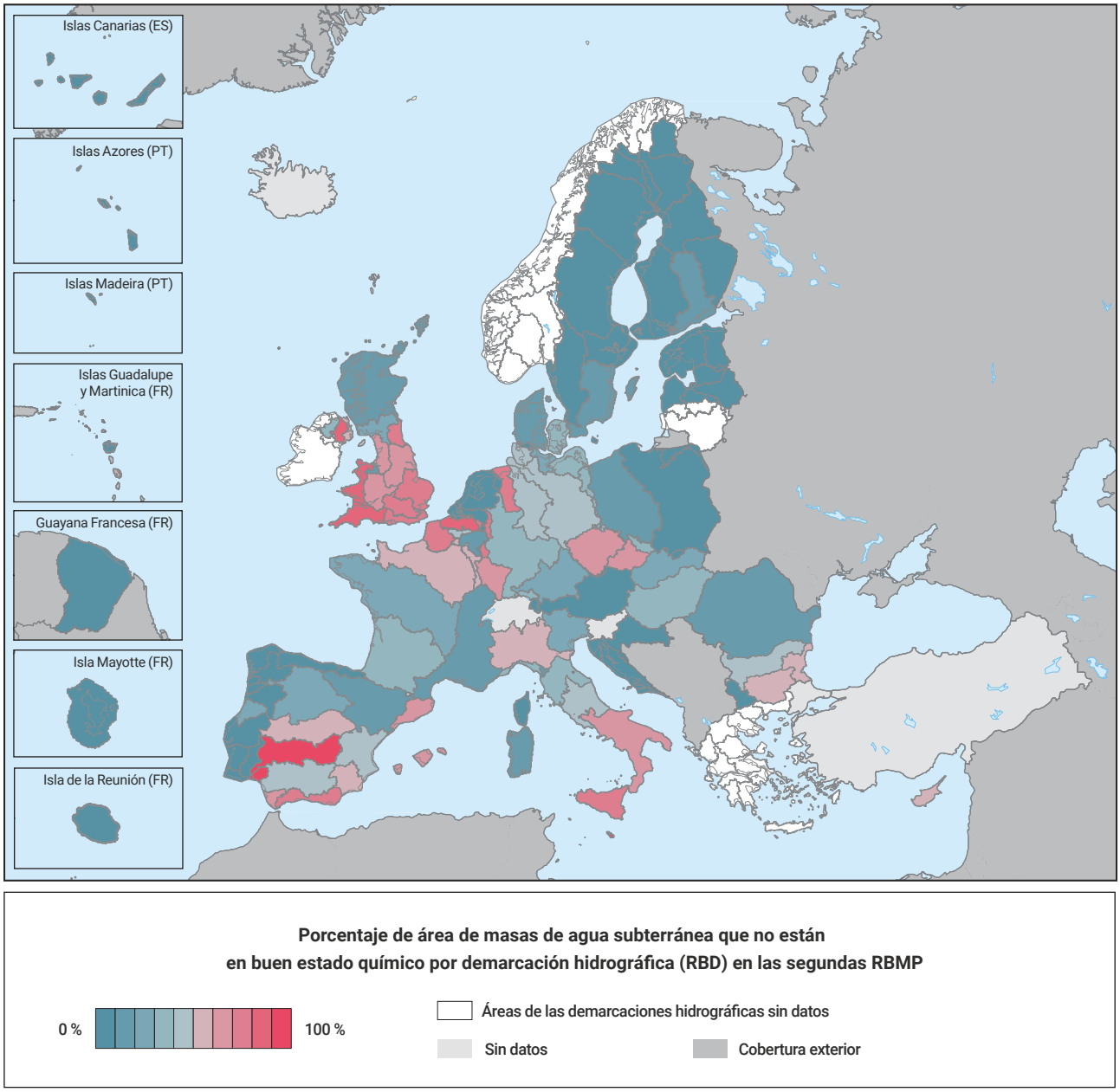
En Europa del Este y el Cáucaso, el alcance limitado del control (sustancias y/o frecuencia) y/o la forma restrictiva en que se ha establecido en la legislación está obstaculizando a veces la aplicación de un enfoque de control basado en el riesgo y rentable (vigilancia y control operativo)[28].

8.2.4 Respuestas a los desafíos de las aguas subterráneas

La diversidad de sistemas jurídicos y de gobernanza hace que se apliquen soluciones diferentes en la Unión Europea, en la paneuropea oriental (Europa del Este, el Cáucaso y Asia Central) y en América del Norte (tabla 8.2). Además de la necesidad de colaboración entre los distintos usuarios del agua en una región determinada, cada vez se es más consciente del carácter transfronterizo de muchos recursos de aguas subterráneas y, por tanto, de la necesidad de cooperación interjurisdiccional (véase el capítulo 12).

[28] UBA (inédito).

Figura 8.4 Porcentaje de área de masas de agua subterránea "no en buen estado químico" por demarcación hidrográfica



Fuente: Adaptado de AEMA (2018b, mapa 4.1, p. 51).

Tabla 8.2
Respuestas seleccionadas de gobernanza y/o gestión a los desafíos de las aguas subterráneas en cada subregión (solo indicativo)

Unión Europea (UE)	Europa del Este, Cáucaso y Asia Central	América del Norte
Mejora del estado cuantitativo y químico de las aguas subterráneas en el objetivo general del marco de los planes de gestión de las cuencas hidrográficas. Armonización de los enfoques en toda la UE. Mejorar la coherencia de las políticas (con el apoyo de estrategias transversales como el Plan de Acción de la UE "Hacia una ambición de contaminación cero para el aire, el agua y la tierra – Construir un planeta más saludable para personas más saludables").	Aplicar soluciones técnicas a las aguas subterráneas (por ejemplo, modernizar las infraestructuras hídricas y mejorar la eficiencia). Reforzar la protección del medio ambiente, incluida la de los recursos hídricos subterráneos.	Estados Unidos: Mecanismos basados en el mercado e incentivos. Mercados de agua, reasignación de derechos de agua o créditos de almacenamiento. Asociaciones entre organizaciones de conservación y sectores económicos para proyectos de beneficios múltiples.

Al igual que la cantidad de agua subterránea, los problemas de calidad del agua subterránea son primordiales. Los estudios e investigaciones de la región han revelado problemas de calidad de las aguas subterráneas, incluso debido a contaminantes emergentes. Para que el seguimiento sea rentable y sostenible a largo plazo, hay que establecer algunas prioridades para lograr un equilibrio entre tener una cobertura suficiente de seguimiento, pero también una atención adecuada a contaminantes específicos. El control y los conocimientos de las aguas subterráneas suelen estar en manos de instituciones especializadas, mientras que la aplicación de los instrumentos de la política del agua (por ejemplo, la DMA, como se indica en la tabla 8.1) exige la cooperación entre instituciones. De hecho, muchas de las presiones y de los impulsores son los mismos para las aguas subterráneas y superficiales. Se están desarrollando políticas integradas y esfuerzos para garantizar la coherencia.

8.3 América Latina y el Caribe

8.3.1 Introducción

En América Latina y el Caribe, las aguas subterráneas representan una fuente de agua relevante, ya que vierten aproximadamente 3 700 km³/año en los ríos de la región (Campuzano et al., 2014). Esto se traduce en 10 200 m³ per cápita/año de recursos hídricos subterráneos renovables, lo que representa algo más de un tercio de la dotación media de agua per cápita al año en la región. Además, debido a la relativa abundancia de aguas superficiales y al limitado nivel de uso de las aguas subterráneas, menos del 30 % del agua dulce extraída procede de fuentes subterráneas. En el caso de los países que sí dependen de las aguas subterráneas, aproximadamente la mitad de la extracción se destina a la irrigación, un tercio al uso doméstico y el resto al uso industrial (Aguilar-Barajas et al., 2015). Es probable que la dependencia del abastecimiento de aguas subterráneas aumente en los próximos años debido al crecimiento de la población, la urbanización y el cambio climático, entre otros factores.

En las zonas áridas y semiáridas, el agua subterránea representa un recurso clave y estratégico (Espíndola et al., 2020; UNESCO, 2007). Este es el caso en particular del llamado Corredor Seco de Centroamérica, así como de la Ciudad de México, entre otras áreas. Sin embargo, en toda la región existen deficiencias en la protección y monitoreo de las aguas subterráneas, dando paso a su explotación intensiva y/o contaminación, lo que en última instancia pone en peligro su sostenibilidad (Campuzano et al., 2014) así como el acceso al agua de las poblaciones más vulnerables, que dependen de estas fuentes subterráneas para su abastecimiento de agua potable (WWAP, 2019). Véase la figura 8.5 para una visión general de los recursos de agua subterránea y los niveles de recarga en la región.

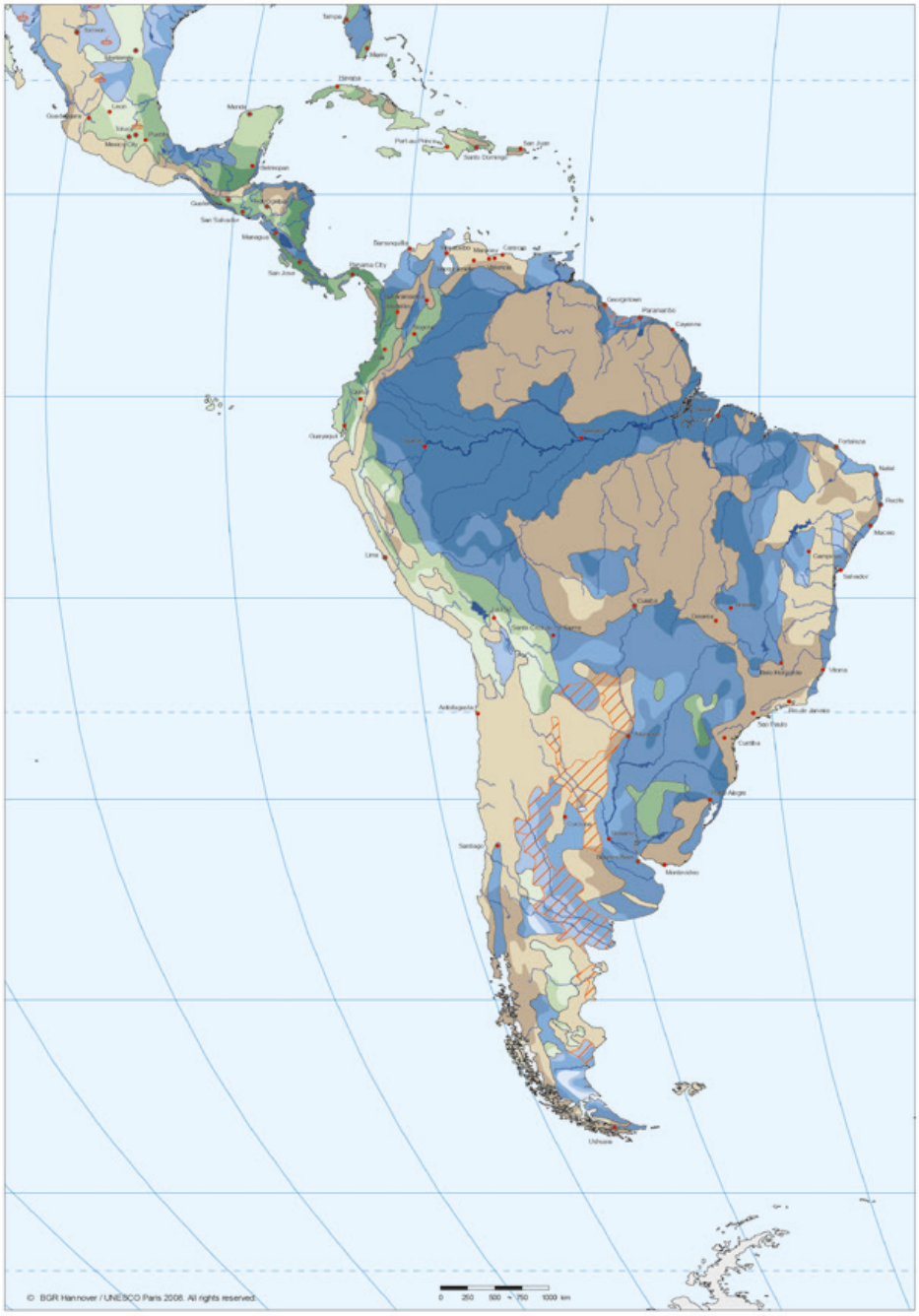
8.3.2 Principales usos de las aguas subterráneas

En el norte y centro de México, el noreste del Brasil, las costas del Perú y Chile y la zona preandina de la Argentina, las aguas subterráneas se utilizan principalmente para la irrigación de cultivos en las áreas más áridas (Foster y Garduño, 2009). Las aguas subterráneas y el subsuelo que las contiene desempeñan un papel importante en los sistemas de abastecimiento de agua de la mayoría de las ciudades latinoamericanas, y no solo en aquellas en las que las aguas subterráneas son la principal fuente de abastecimiento (por ejemplo, León, Lima, Ciudad de México, Natal, San José y São Paulo, entre varias otras[29]). En países como Costa Rica y México, el agua subterránea abastece al 70 % de los hogares en áreas urbanas, y prácticamente sostiene toda la demanda doméstica en áreas rurales. También representa el 50 % del agua utilizada por el sector industrial (Campuzano et al., 2014). En otros países, los acuíferos apenas se explotan por falta de información y otros factores (UNESCO, 2007). La industria minera de la región también utiliza el agua subterránea de forma intensiva y compite por ella con los sectores agrícola y doméstico. En Chile, por ejemplo, el 63 % del

[29] En Buenos Aires, donde el uso de las aguas subterráneas ha disminuido considerablemente como consecuencia de la "importación de aguas superficiales", comenzaron a producirse problemas sanitarios y de drenaje en varias áreas extensas (Foster y Garduño, 2009).

Figura 8.5

Tasa de recarga en los principales sistemas de aguas subterráneas de América Latina y el Caribe



Recarga de agua subterránea (mm/año)

Recursos hídricos subterráneos

	muy alta	alta	media	baja	muy baja
	300	100	20	2	0
en las principales cuencas subterráneas					
en áreas con una estructura hidrogeológica compleja					
en áreas con acuíferos locales y poco profundos					

Características especiales de las aguas subterráneas

- área de aguas subterráneas salinas (>5 g/l de sólidos disueltos totales)
- ciudad seleccionada
- área de descarga natural de aguas subterráneas en regiones áridas
- área de fuerte extracción de aguas subterráneas con sobreexplotación
- área de extracción de aguas subterráneas

Geografía

- río importante
- gran lago de agua dulce
- gran lago de agua salada
- capa de hielo continua
- ciudad seleccionada

Fuente: BGR/UNESCO (2008).

agua utilizada por el sector minero procede de aguas subterráneas. El uso de las aguas subterráneas en la minería representa un importante riesgo de contaminación de los acuíferos, que puede producirse si hay fugas de aguas residuales (Ruz et al., 2020).

8.3.3 Retos de la gestión de las aguas subterráneas

Varios países, incluyendo partes de la Argentina, el Brasil, México, el Paraguay y el Perú, se enfrentan a una importante sobreexplotación y contaminación de sus aguas subterráneas. México ha probado múltiples enfoques[30] para mejorar la gestión de sus acuíferos sobreexplotados (Arroyo et al., 2015). En toda la región, los problemas de calidad de las aguas subterráneas más comunes están asociados a elementos no deseados de origen natural (principalmente arsénico y fluoruro), contaminantes antropogénicos (nitratos, contaminantes fecales, plaguicidas), diversos compuestos de origen industrial (subproductos mineros, disolventes organoclorados, hidrocarburos, compuestos fenólicos, etc.) y contaminantes emergentes, como cosméticos, antibióticos, hormonas y nanomateriales. Por ejemplo, en Bolivia, la calidad de las aguas subterráneas se ve amenazada por la contaminación industrial, agrícola y doméstica, mientras que, en Honduras, la gran demanda de agua en las áreas urbanas amenaza la disponibilidad futura de este recurso (Ruz et al., 2020).

Los retos mencionados anteriormente hacen que aumente el número de conflictos sobre el acceso y el uso del agua en la región. Estos conflictos suelen estar relacionados con las decisiones de gestión del agua entre diferentes usuarios, y/o con conflictos de acceso a la tierra[31], o giran en torno a los impactos de las actividades relacionadas con los minerales y la extracción de materiales de construcción, los combustibles fósiles, la justicia climática o los proyectos energéticos. Se estima que el número de conflictos relacionados con la contaminación y el agotamiento de las aguas subterráneas iniciados entre 2000 y 2019 es más de cuatro veces superior a los iniciados entre 1980 y 1999 (ICTA-UAB, s.f.).

8.3.4 Desafíos específicos de los pequeños Estados insulares en desarrollo (PEID) y otras áreas costeras

En el Caribe, donde las aguas superficiales tienden a ser relativamente escasas, las aguas subterráneas representan alrededor del 50 % del agua extraída. Países como Bahamas, Barbados y Jamaica dependen en gran medida de los recursos hídricos subterráneos como principal fuente de abastecimiento. En Barbados, las aguas subterráneas representan incluso el 90 % del abastecimiento total, en Jamaica se calcula que son el 84 % y en Saint Kitts y Nevis, alrededor del 70 %. Sin embargo, en Granada, Dominica y Santa Lucía apenas se utilizan las aguas subterráneas, lo que ilustra la variabilidad existente en el Caribe. La sobreexplotación de los acuíferos, la intrusión salina y la contaminación suponen importantes amenazas para los recursos hídricos subterráneos de esta subregión, convirtiéndolos en fuentes insostenibles. "*Uno de los principales retos a los que se enfrentan los gestores de recursos hídricos, así como los proveedores de servicios, es la dificultad asociada a la posibilidad de determinar los rendimientos seguros de los acuíferos y de realizar evaluaciones periódicas del balance rendimiento-demanda. A menudo escasean los datos hidrogeológicos necesarios, los modelos y el personal cualificado*" (Cashman, 2014, p. 1192).

En Belice, así como en muchas otras áreas costeras de la región que experimentan un rápido crecimiento urbano, los efectos de la intrusión salina amenazan la calidad de las aguas subterráneas (Campuzano et al., 2014; IGRAC, 2014; Ruz et al., 2020). Además, el cambio y la variabilidad del clima, en particular el aumento de la frecuencia e intensidad de los huracanes, también suponen mayores amenazas para los PEID del Caribe, debido a las mareas de tempestad y a la infiltración de los pozos. Freeport, la capital de la isla de Gran Bahama, es un

[30] Esfuerzos para recopilar y analizar información, el uso de herramientas de planificación y modelización, programas orientados a la política para reducir la sobredistribución de los derechos de agua y la eliminación de los subsidios a la electricidad rural.

[31] Gestión forestal, agrícola, pesquera y ganadera.

ejemplo de ello. La ciudad se abastece totalmente de aguas subterráneas. En 2019, el paso del huracán Dorian provocó marejadas que inundaron los principales campos de pozos de la isla, salinizando sus aguas hasta niveles salobres. Aunque los valores elevados de salinidad no causan problemas de salud inmediatos, incluso si se ingiere, el agua salobre es muy desagradable de consumir (Chaves, 2019).

8.3.5 Seguimiento, gestión y gobernanza

En América Latina y el Caribe, las redes de vigilancia varían en su modalidad. Algunos países tienen programas nacionales de vigilancia, como el Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, El Salvador, México, el Perú y Venezuela. Otros tienen redes locales, como la Argentina, mientras que Bolivia, el Paraguay y el Uruguay monitorean acuíferos de interés específico (es decir, los acuíferos Pura-Purani, Patiño y Raigón - Ruz et al., 2020). Además de mejorar la cobertura, la frecuencia y la continuidad de los instrumentos y sistemas de monitoreo, la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos también requiere conocimientos técnicos, cambios institucionales, instrumentos legales y económicos, y participación social. En este sentido, un sistema formal de concesiones y derechos de uso de las aguas subterráneas puede contribuir directamente a la asignación racional, y en algunos casos a la reasignación de las aguas subterráneas. El cobro de tasas de extracción de aguas subterráneas puede ser también una importante herramienta de gestión de la demanda, pero requiere una base común transparente y aceptada para cuantificar la extracción y el uso del agua (Foster y Garduño, 2009). Por último, también es importante que la información de las aguas superficiales se cruce con la de las aguas subterráneas, ya que ambos recursos suelen ser interdependientes.

A través de la Iniciativa sobre la Gestión de Recursos de Acuíferos Transnacionales (ISARM) de las Américas (UNESCO, 2007; UNESCO/OEA, 2010), se han identificado en la región 52 sistemas acuíferos transfronterizos con diferentes grados de conocimiento.

El Sistema Acuífero de la Amazonia subyace en un área que se estima que cubre 3,95 millones de km² (OTCA, 2018) La Agencia Nacional del Agua del Brasil (ANA) realizó estudios para ampliar el conocimiento hidrogeológico del Sistema Acuífero de la Amazonia en el Brasil (SAAB), el más grande del país y uno de los mayores del mundo. El SAAB está formado por sedimentos cretácicos a cenozoicos de naturaleza arenosa, limosa y arcillosa que cubren las provincias hidrogeológicas del Amazonas y del Orinoco. Forma parte de un sistema acuífero transfronterizo que subyace en partes de Bolivia, el Brasil, Colombia, Ecuador, el Perú y Venezuela. En el Brasil, tiene un área de 2 millones de km² en los estados de Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia y Roraima, con una reserva permanente estimada de 124 000 km³, situada en las cuencas sedimentarias de Marajó, Amazonas, Solimões y Acre. Los estados brasileños de Pará y Amapá, frecuentemente afectados por las sequías, dependen de esta fuente para el 79 % y el 64 % de sus extracciones de agua dulce, respectivamente (UNESCO, 2007; UNESCO/OEA, 2010; Hu et al., 2017).

El Sistema Acuífero Guaraní (GAS) es un acuífero transfronterizo compartido por cuatro países de América Latina: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. El GAS cubre un área estimada de 1,09 millones de km² (OEA, 2009). En términos regionales, desde las zonas de reposición (áreas de afloramiento del GAS) hasta las zonas de descarga, el agua subterránea del GAS tiende a fluir de norte a sur, acompañando la orientación de la Cuenca Sedimentaria del Paraná. En el 80 % del área, el GAS está confinado por rocas basálticas, con aguas antiguas a muy antiguas (de 4 000 a >100 000 años – Sindico et al., 2018). La explotación de las aguas subterráneas ha sido intensa en algunas áreas, debido a la expansión de las actividades económicas y a la contaminación de las aguas superficiales, así como a las sequías periódicas. Alrededor del 80 % del agua subterránea que se bombea se utiliza para el abastecimiento público, el 15 % para procesos industriales y el 5 % por los balnearios geotérmicos (Foster y Garduño, 2009). Una de las principales características del GAS es su sistema de gobernanza (cuadro 8.5).

Cuadro 8.5 El Acuerdo sobre al Acuífero Guaraní (GAA)

En 2010, los cuatro países que comparten el GAA (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay) decidieron negociar un tratado (el primero de este tipo) centrado en la gestión del Acuífero Guaraní, lo que también es destacable por la ausencia de conflictos graves sobre el recurso natural (Villar y Costa Ribeiro, 2011). Las negociaciones se prolongaron durante una década y el Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní fue ratificado por todas las partes y entró en vigor el 26 de noviembre de 2020. El Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní establece un marco de gobernanza de los acuíferos transfronterizos. Contiene las normas generales del derecho internacional aplicables a los recursos hídricos transfronterizos (tanto de superficie como subterráneos). Los países son soberanos, pero al mismo tiempo se comprometen a cooperar y a no causar daños significativos a los Estados vecinos (GAA, art. 6). Los países procurarán utilizar el acuífero de forma racional, sostenible y equitativa (GAA, art. 4). El significado exacto de estos conceptos será un ejercicio de ponderación y equilibrio basado en varios factores. Aunque estos no se enumeran en el GAA, pueden encontrarse en el emergente marco jurídico internacional aplicable a los acuíferos transfronterizos (Naciones Unidas, 1997, art. 6; y CDI, 2008, art. 5). El tratado incluye otras prácticas de gestión, como el intercambio de información y las actividades que puedan afectar al acuífero (GAA, art. 8). Es especialmente importante el compromiso de informar a otros Estados si una actividad prevista puede tener un impacto transfronterizo (GAA, art. 9). Otra disposición que merece la pena destacar es la referencia a las áreas transfronterizas críticas (GAA, art. 14), que pueden merecer una especial atención conjunta.

Nota: La GAA (2020) está disponible en: www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-English.pdf.

La importancia de los acuíferos para los ecosistemas, el desarrollo social y las actividades económicas de la región no hará más que aumentar en un futuro próximo debido al cambio climático y sus repercusiones en el ciclo del agua

Otro acuífero importante es el Sistema Acuífero Transfronterizo del Pantanal, situado en la cuenca del río Paraguay. El área estimada del acuífero es de aproximadamente 141 500 km² (102 000 km² en el Brasil, 21 500 km² en Bolivia, 18 000 km² en el Paraguay) (UNESCO/OEA, 2010). Este sistema acuífero destaca por su papel clave en el mantenimiento de los ecosistemas del Pantanal, la regulación natural del régimen de lluvias y el abastecimiento de agua de las comunidades locales y las poblaciones indígenas. Al ser un acuífero no confinado, es vulnerable a la contaminación, principalmente relacionada con las actividades agrícolas y ganaderas (García, 2015). En la última década, se ha visto amenazada por la excesiva sedimentación en los ríos y en los humedales, causada por la acelerada erosión debida a la deforestación en las tierras altas y a las plantaciones de soja. Esta sedimentación reduce la infiltración y la consiguiente capacidad de recarga (UNESCO, 2007).

En 2006, el ISARM-Américas identificó un acuífero transfronterizo denominado Esquipulas-Ocotepeque-Citalá, situado en el área trinacional del Trifinio que comparten El Salvador, Guatemala y Honduras. El proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas en Acuíferos Transfronterizos (GGRETA), destinado a adquirir experiencia en la buena gobernanza y gestión de las aguas subterráneas, tomó este acuífero como proyecto de demostración. En su investigación sobre el acuífero, se recopiló, ordenó, analizó, priorizó y sistematizó toda la información disponible sobre el acuífero transfronterizo, lo que dio lugar a la identificación de lagunas de información. Este estudio ha demostrado que lo que originalmente se suponía que era un solo acuífero está, de hecho, compuesto por dos acuíferos (el acuífero de Esquipulas y el acuífero de Ocotepeque-Citalá) en el fondo del valle de la cuenca alta del río Lempa. Estos dos acuíferos mantienen su carácter transfronterizo. El acuífero de Esquipulas es compartido trilateralmente y el sistema Ocotepeque-Citalá es compartido bilateralmente por El Salvador y Honduras. En este contexto, existe una presión creciente para lograr acuerdos adecuados de supervisión y gobernanza. Otra característica innovadora del proyecto GGRETA es que incorpora una perspectiva de género en el seguimiento, la evaluación y la presentación de informes sobre el agua. Los indicadores desagregados por sexo incluyen: las percepciones de hombres y mujeres sobre la adecuación de la disponibilidad actual de agua en calidad y cantidad; las percepciones de hombres y mujeres sobre la igualdad de género en las decisiones domésticas sobre el agua, el saneamiento y la higiene (WASH); y la presencia de mujeres en cooperativas e industrias relacionadas con el agua (UNESCO, 2016).

Para concluir, los Estados soberanos con acuíferos tanto nacionales como transfronterizos necesitarán marcos que ayuden a garantizar el uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos. En el caso de los entornos transfronterizos, estos pueden requerir el desarrollo y el mantenimiento de instituciones supranacionales, pero eso por sí solo no garantiza un uso equitativo y sostenible (véase el capítulo 12). Del mismo modo, las instituciones nacionales necesitan tanto información como autoridad para fomentar un uso sostenible. La región necesita avanzar hacia procesos políticos que armonicen la toma de decisiones, el control y la gestión de las aguas subterráneas tanto a nivel nacional como internacional. La importancia de los acuíferos para los ecosistemas, el desarrollo social y las actividades económicas de la región no hará más que aumentar en un futuro próximo debido al cambio climático y sus repercusiones en el ciclo del agua. Aunque los recursos hídricos subterráneos de la región siguen siendo relativamente abundantes, es urgente mejorar la gestión y la gobernanza para garantizar su uso sostenible. Por lo tanto, se espera que la investigación, el trabajo de campo y el seguimiento cubran las lagunas de conocimiento existentes y proporcionen una base más sólida para una toma de decisiones informada y coordinada.

8.4 Asia y el Pacífico

8.4.1 Entorno hidrogeológico general

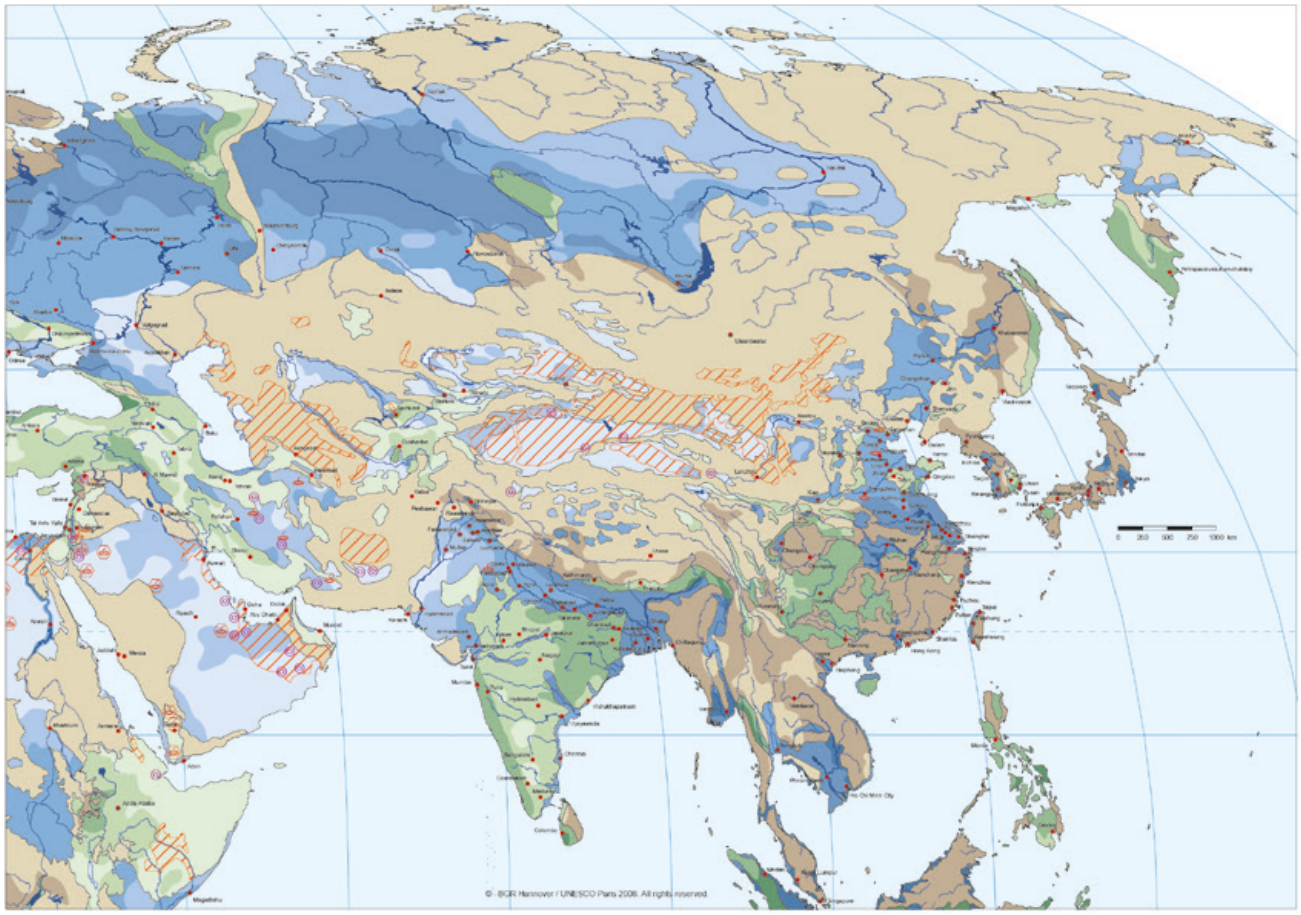
Asia y el Pacífico es la mayor región del mundo tanto en términos de área (28 millones de km²) como de población (4 700 millones). Las aguas subterráneas son una importante fuente de abastecimiento de agua dulce y han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico de la región. Sin embargo, la extracción insostenible de recursos hídricos subterráneos, unida a los efectos del cambio climático, ha provocado el agotamiento de los acuíferos y el aumento de la escasez de agua en varias áreas. Además, la calidad de las aguas subterráneas está amenazada por una serie de factores antropogénicos y geogénicos que contribuyen al estrés hídrico en la región. Los acuíferos sedimentarios, compuestos principalmente por depósitos aluviales de llanura de inundación, discurren a lo largo de grandes ríos como el Ganges, el Mekong y el Yangtze, y ofrecen condiciones favorables para la productividad de las aguas subterráneas. En las regiones montañosas de Asia Central y Septentrional, las aguas subterráneas suelen encontrarse en acuíferos formados por rocas duras articuladas. Aunque las áreas áridas del interior de Asia Central reciben pocas precipitaciones y tienen condiciones de alta evaporación, el deshielo de la nieve y los glaciares en las altas montañas proporcionan una recarga esencial de las aguas subterráneas. Los acuíferos compuestos por roca carbonatada están ampliamente distribuidos en el sudeste asiático, en el sur de China y en partes de la península de Indochina se pueden encontrar sistemas kársticos desarrollados compuestos por piedra caliza estratificada, y los acuíferos bajo las islas del Circumpacífico están compuestos por roca volcánica cuaternaria (Lee et al., 2018b; Villholth, 2013b). La figura 8.6 ilustra los recursos de aguas subterráneas de la región y su recarga.

8.4.2 Importancia de las aguas subterráneas

La región de Asia-Pacífico es la que más aguas subterráneas extrae en el mundo, ya que en ella se encuentran siete de los diez países que más aguas subterráneas extraen: Bangladesh, China, India, Indonesia, Irán, Pakistán y Türkiye (véase la tabla 5.1). Solo estos países representan aproximadamente el 60 % de la extracción total de agua subterránea del mundo (Aquastat, s.f.). El motor fundamental del desarrollo de las aguas subterráneas en la región es el aumento de la demanda de agua debido al crecimiento de la población, el rápido desarrollo económico y la mejora del nivel de vida. La utilización de los recursos hídricos subterráneos ha proporcionado numerosos beneficios para la irrigación, la actividad industrial, el uso doméstico, la resistencia a la sequía y la mejora de los medios de vida.

Estos beneficios socioeconómicos han sido especialmente cruciales para el sector agrícola, un sector que es clave para el desarrollo económico de muchos países en desarrollo de la región, y que representa aproximadamente el 82 % de las extracciones totales de agua (Aquastat, s.f.). El rápido crecimiento de la irrigación de aguas subterráneas, especialmente en la Llanura del Norte de China y en el Sur de Asia entre 1970 y 1995, fue el principal motor del auge agrario

Figura 8.6 Recursos hídricos subterráneos de Asia y Australia y Oceanía



Recursos hídricos subterráneos

Recarga de agua subterránea (mm/año)

muy alta | alta | media | baja | muy baja

300 | 100 | 20 | 2 | 0

en las principales cuencas subterráneas

en áreas con una estructura hidrogeológica compleja

en áreas con acuíferos locales y poco profundos

Características especiales de las aguas subterráneas

- área de aguas subterráneas salinas (>5 g/l de sólidos disueltos totales) ciudad seleccionada
- área de descarga natural de aguas subterráneas en regiones áridas
- área de fuerte extracción de aguas subterráneas con sobreexplotación
- área de extracción de aguas subterráneas

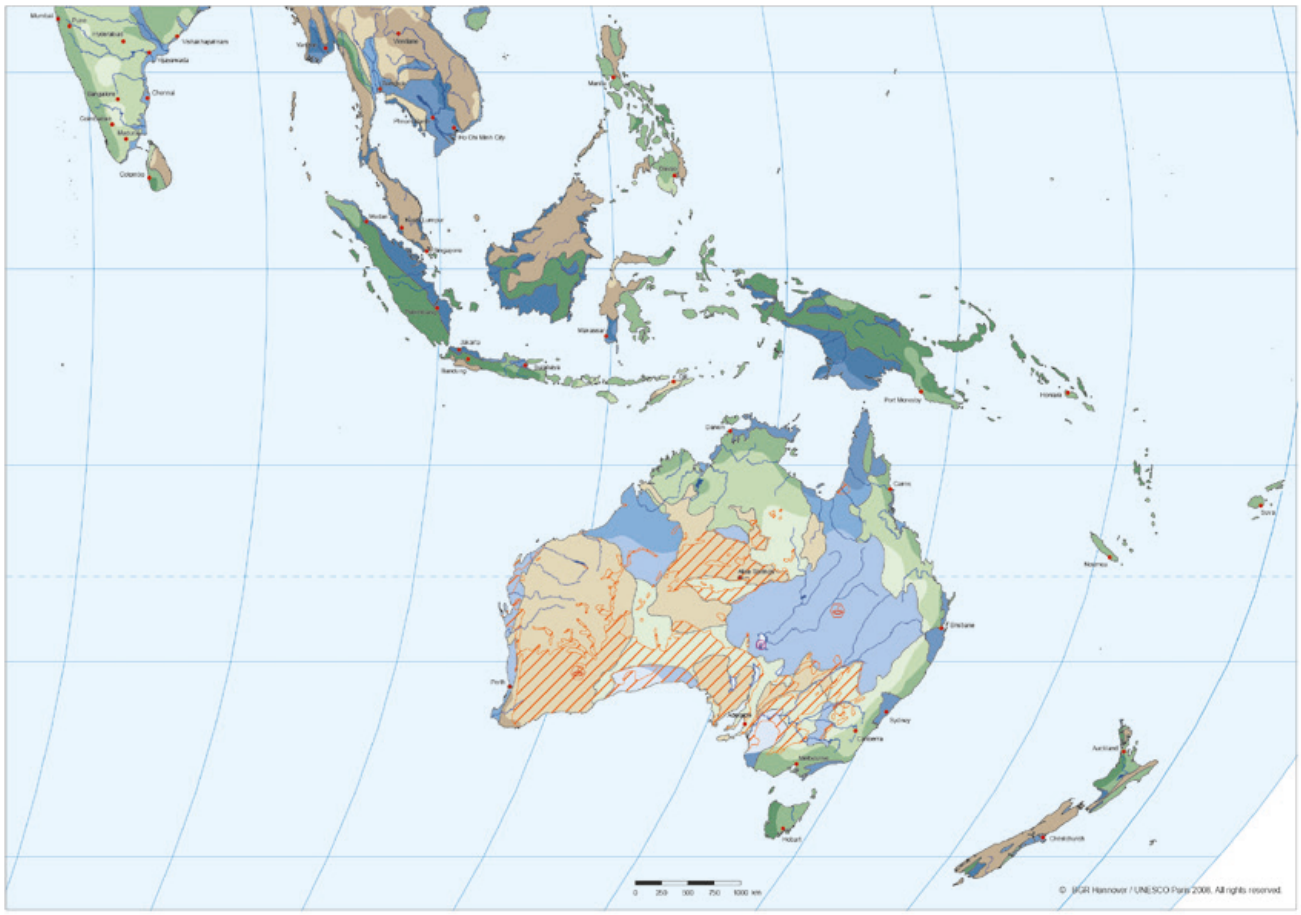
Geografía

- ciudad seleccionada
- ciudad seleccionada, en gran parte dependiente de las aguas subterráneas
- río importante
- gran lago de agua dulce
- gran lago de agua salada
- capa de hielo continua

Fuente: BGR/UNESCO (2008).

en la región (Shah et al., 2003). Al ser un recurso fundamental para la irrigación, las aguas subterráneas contribuyen a la seguridad alimentaria y al alivio de la pobreza. La dependencia de la región de las aguas subterráneas está asociada al aumento de la productividad alimentaria o a la falta de abastecimiento de aguas superficiales. Por ejemplo, de 1960 a 2015, la población de la India casi se duplicó y, junto con ella, el índice de producción de alimentos del país aumentó un 330 % (Lee et al., 2018b). Si bien la dependencia de la agricultura de regadío de las aguas subterráneas es evidente en todo el sur de Asia y China, los sectores industrial y municipal también son grandes usuarios de las aguas subterráneas en los centros urbanos (Kataoka y Shivakoti, 2013). Las aguas subterráneas son también la fuente preferida de agua para las necesidades de consumo e irrigación en el sur de Asia, ya que los canales

Figure 8.6 Recursos hídricos subterráneos de Asia y Australia y Oceanía



Fuente: BGR/UNESCO (2008).

de agua superficial se utilizaban históricamente como vías para los residuos domésticos e industriales, lo que los hacía no aptos para el consumo (Mukherjee, 2018). Además, los acuíferos proporcionan una gran capacidad de amortiguación frente a las variaciones climáticas, lo que ayuda a estabilizar el abastecimiento de agua durante las temporadas de máxima sequía.

8.4.3 Retos

Las aguas subterráneas son abundantes en la mayor parte de la región de Asia-Pacífico, pero, sin embargo, el agotamiento de las aguas subterráneas ha suscitado preocupación por la sostenibilidad de su uso en diferentes áreas de Asia Central, China, Asia Meridional y algunos

centros urbanos del Sudeste Asiático (Jia et al., 2019; Kataoka y Shivakoti, 2013; Lee et al., 2018b; Mukherjee, 2018). El grave agotamiento amenaza la producción de alimentos, los medios de subsistencia y el abastecimiento de agua industrial, y provoca el hundimiento de la tierra, la intrusión de agua de mar y daños ecológicos. El cambio climático también influye en la variabilidad de las precipitaciones en la región, lo que agrava aún más la presión sobre los recursos hídricos subterráneos, sobre todo en áreas con climas entre semiáridos y áridos y en los PEID del Pacífico, donde las aguas subterráneas constituyen la única fuente fiable de agua dulce, pero se ven amenazadas por el aumento del nivel del mar (Ashfaq et al., 2009; Asoka et al., 2017; Bouchet et al., 2019; Dixon-Jain et al., 2014). Además, como se espera que la extracción de agua subterránea aumente en el futuro debido a la intensificación de la demanda de agua de las actividades económicas y domésticas, mientras que la recarga de agua subterránea disminuirá debido a las variaciones climáticas, también se espera que aumente el riesgo de escasez de agua (Hofmann et al., 2015).

Las aguas subterráneas son una importante fuente de abastecimiento de agua dulce y han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo socioeconómico de la región

Además del agotamiento de las aguas subterráneas, la contaminación de las aguas subterráneas por procesos antropogénicos y geogénicos es un problema adicional igualmente preocupante, ya que el agua no apta para el consumo también contribuye al estrés hídrico en la región (Hirji et al., 2017; MacDonald et al., 2016). La movilización de contaminantes geogénicos como el arsénico (acuífero de la cuenca indogangética, delta del río Rojo, delta del río Mekong), el flúor (islas del Pacífico, sur de la India peninsular, Sri Lanka, centro y oeste de China) y el uranio (China, India) supone importantes riesgos para la salud de las personas en toda la región (Coyte et al., 2018; Hara, 2006; Ministerio de Medio Ambiente del Japón/IGES, 2018; Le Luu, 2019; Mukherjee, 2018). Los contaminantes antropogénicos en las aguas subterráneas, como los metales pesados (es decir, el cadmio, el cromo, el plomo, el mercurio), los coliformes, la salinidad y los contaminantes emergentes[32] son un problema cada vez mayor (Lapworth et al., 2018; Sui et al., 2015), ya que la rápida urbanización, la intrusión del agua de mar, la agricultura intensiva y la actividad industrial siguen aumentando en la región de Asia-Pacífico. Además, los subproductos de la desinfección (DBP) requieren atención, ya que la cloración de las aguas subterráneas con haluros y carbono orgánico disuelto (DOC) puede promover la formación de DBP tóxicos en el agua potable (Coyte et al., 2019).

El rápido crecimiento económico y demográfico, unido a una planificación deficiente y a una gobernanza inadecuada, ha dado lugar a la sobreexplotación y a la degradación de la calidad del agua en determinadas áreas, amenazando la vida y los medios de subsistencia de las poblaciones que dependen de este recurso vital (Kataoka y Shivakoti, 2013; Lall et al., 2020; Shah et al., 2003). Por ejemplo, la cuenca del río Kharaa, en Mongolia, es un área que está experimentando un importante desarrollo económico e industrial —con beneficios económicos positivos derivados de la minería, la agricultura, la ganadería y el turismo—, pero estas actividades, combinadas con la aceleración de la urbanización, contribuyen a aumentar la contaminación de las aguas subterráneas (Hofmann et al., 2010, 2015).

Se ha demostrado que la contaminación asociada al uso excesivo de productos químicos agrícolas afecta a la calidad de las aguas subterráneas muy por debajo de la superficie. En la llanura del norte de China se han detectado nitratos a 24 m de profundidad (Chen et al., 2005).

Por lo tanto, es fundamental que el desarrollo y la utilización continuos de las aguas subterráneas se realicen de manera sostenible, con el fin de reducir la presión sobre estos recursos. Si bien existen prácticas de gestión y sistemas institucionales, legales y reglamentarios para abordar los problemas de las aguas subterráneas en toda la región de Asia y el Pacífico, la gobernanza de las aguas subterráneas se enfrenta a desafíos debido a su acceso abierto sin restricciones en muchos países de la región (Kataoka y Shivakoti, 2013).

[32] Los contaminantes emergentes consisten en productos farmacéuticos, pesticidas, productos químicos industriales, microplásticos, tensioactivos y productos de cuidado personal.

Por lo tanto, se necesita urgentemente una mejor gobernanza de las aguas subterráneas, con apoyo popular y capacidad de ejecución. Los problemas de agotamiento de las aguas subterráneas, el hundimiento de la tierra y la contaminación de las aguas subterráneas requieren una acción urgente y la cooperación transfronteriza, con el fin de mitigar las tendencias negativas actuales y garantizar la seguridad hídrica futura en la región.

8.4.4 Respuestas

Los sistemas de aguas subterráneas y las actividades que dependen de ellos son complejos. Por lo tanto, es necesario comprender adecuadamente las condiciones hidrogeológicas de un acuífero, la demanda de agua y las necesidades sociales y económicas para poder elaborar políticas eficaces. Aunque no existe una solución única para los diversos retos a los que pueden enfrentarse los sistemas de aguas subterráneas, hay una serie de acciones y vías que los gobiernos nacionales pueden adoptar para abordar estas cuestiones. A continuación, se presentan tres ejemplos de medidas adoptadas por los gobiernos para hacer frente a sus problemas con las aguas subterráneas.

Se necesita urgentemente una mejor gobernanza de las aguas subterráneas, con apoyo popular y capacidad de ejecución

Recarga de aguas subterráneas en Rajastán (India)

Rajastán, el estado más árido de la India, es propenso a sufrir frecuentes sequías y depende en gran medida de las aguas subterráneas tanto para la irrigación como para el consumo. Con precipitaciones irregulares, sobreexplotación de las aguas subterráneas y las mayores pérdidas por evaporación del país, las comunidades agrícolas de la región se enfrentan a crecientes problemas para satisfacer sus necesidades de agua. En 2016, el Gobierno de Rajastán puso en marcha *Mukhyamantri Jal Swavlamban Abhiyan* (MJSA), un programa para ayudar a las comunidades rurales a ser autosuficientes para satisfacer las necesidades de agua. Centrándose en el MAR (véase el cuadro 7.1 y la sección 11.5), el programa construyó tanques de irrigación, presas, zanjas y otras estructuras de recolección de agua para captar el escurrimiento. El programa también promovió la conservación del agua a través de la microirrigación y mejoró la cuenca hidrográfica mediante la plantación de árboles en terrenos baldíos y el desarrollo de pastos. Los resultados provisionales tras dos monzones mostraron que, de los 21 distritos no desérticos, en 16 se produjo un aumento del nivel de las aguas subterráneas en una media de 1,4 m. Las evaluaciones de impacto internas también informaron de que las aldeas participantes redujeron el transporte de agua (es decir, los camiones cisterna) en un 56 % en comparación con las aldeas no participantes (Verma y Shah, 2019).

Intervenciones para el agotamiento de las aguas subterráneas en la llanura del norte de China

La llanura del norte de China tiene una de las menores disponibilidades de recursos hídricos per cápita de China y del mundo. El rápido desarrollo económico de los últimos 40 años se ha sustentado en la explotación de las aguas subterráneas, lo que ha provocado un grave descenso del nivel de estas que ha limitado el desarrollo de la región. En los últimos años se han puesto en marcha múltiples planes de gestión del agua para solucionar este problema. Entre las medidas adoptadas figuran la recogida de agua de lluvia, el desvío de aguas fluviales desde el sur, la promoción de tecnologías de irrigación que ahorran agua, la subvención de cultivos resistentes a la sequía y los proyectos[33] "Grain for Green". Como resultado de estas y otras medidas, la tasa del descenso de las aguas subterráneas parece haberse reducido en Beijing y en parte de la provincia de Hebei (Shao et al., 2017; Xu et al., 2018; Zhao et al., 2020).

Programa de adaptación de Kiribati

La República de Kiribati está formada principalmente por islas de atolones de baja altitud con un área total de 726 km², situadas en el Océano Pacífico central y occidental. Kiribati es uno de los países más pequeños y remotos, geográficamente dispersos y vulnerables al cambio climático del mundo. El país está sometido a sequías frecuentes y prolongadas, mientras que el aumento del nivel del mar amenaza de forma significativa el abastecimiento de agua dulce del país (agua

[33] Conocido oficialmente como Programa de Conversión de Tierras de Cultivo en Bosques (CCFP), el programa paga a los agricultores para que planten árboles en sus tierras y proporciona tierras degradadas a las familias rurales para que las restauren.

de lluvia y aguas subterráneas poco profundas no confinadas). En todo el país, el agua potable se obtiene principalmente de lentes de agua subterránea poco profundas y frescas que flotan sobre el agua de mar, más densa, dentro del acuífero. Debido a la naturaleza frágil de estas lentes, si el equilibrio de las mismas se altera debido a las sequías o a la extracción excesiva, las aguas subterráneas se vuelven salobres y no son aptas para el consumo y la irrigación. Entre 2011 y 2018, el Gobierno de Kiribati realizó varios esfuerzos para aumentar la resiliencia del país al cambio climático a nivel nacional, insular y comunitario, con el apoyo y las contribuciones de los socios de desarrollo.

Ampliando las medidas de las dos fases piloto anteriores, la Fase III del Programa de Adaptación de Kiribati (KAP)[34] aplicó un enfoque holístico que incluía:

- mejorar el uso y la gestión del agua mediante la instalación de sistemas de recogida de aguas pluviales, además de sistemas de extracción de aguas subterráneas que utilizan tuberías de infiltración horizontales colocadas a poca profundidad para extraer el agua dentro de la lente de agua dulce;
- reducir las fugas y el desperdicio de agua en los sistemas existentes;
- proteger las reservas de agua;
- mejorar la planificación a largo plazo de la gestión del agua a nivel local;
- proteger la costa contra la erosión invirtiendo en protección, como muros de contención y plantación de manglares; y
- reforzar la capacidad del gobierno y de las comunidades para gestionar los impactos del cambio climático y los peligros naturales mediante una política nacional de gestión costera, además de planes de adaptación gestionados localmente.

Los informes de evaluación indican que, a través del proyecto, el número de personas con acceso a fuentes de agua mejoradas aumentó de la línea de base de 5 000 (de 2017) a 12 780, superando el objetivo final original del proyecto de 11 000 personas en un 116 %. Los esfuerzos de rehabilitación de los sistemas de agua existentes detectaron y eliminaron pérdidas de agua de 645 m³/día y las medidas combinadas de ingeniería y basadas en la naturaleza proporcionaron 1,87 km de protección contra la erosión costera (Banco Mundial, 2019).

8.5 Región árabe

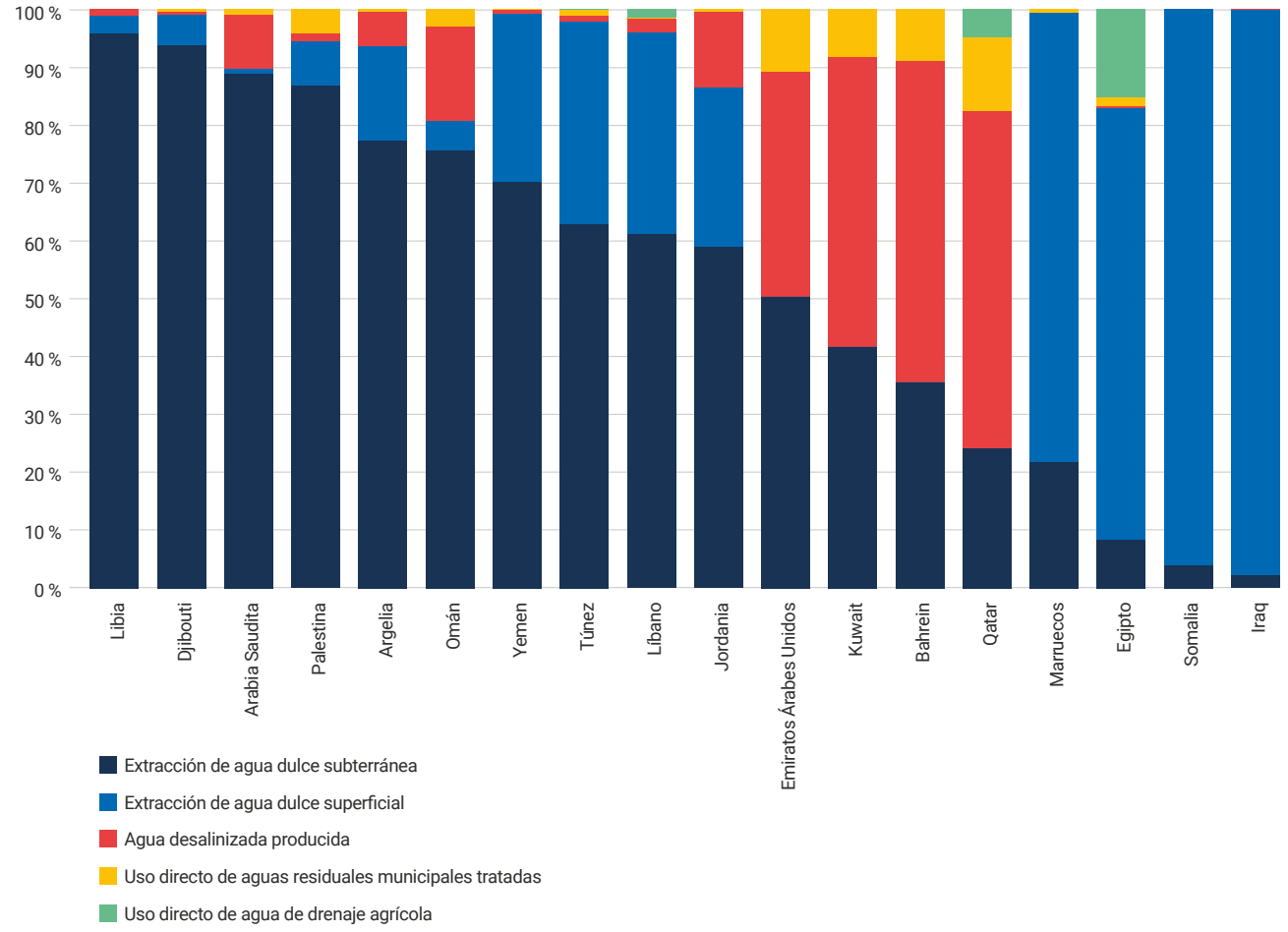
8.5.1 Entorno regional

La región árabe es una de las regiones con mayor escasez de agua del mundo. En 2020, 19 de los 22 Estados árabes se encuentran por debajo del umbral de escasez de agua renovable de 1 000 m³ per cápita al año, y 13 Estados se sitúan por debajo del umbral de escasez absoluta de agua de 500 m³ per cápita al año (UNDESA, 2020; Aquastat, s.f.). Se espera que para el año 2050, 17 países árabes estén por debajo del umbral de escasez absoluta de agua (UNDESA, 2020; Aquastat, s.f.). Esto ha empujado a los países a recurrir a otros recursos hídricos convencionales y no convencionales para satisfacer sus necesidades de agua dulce. Las aguas subterráneas son la fuente de agua más utilizada en al menos 11 de los 22 Estados árabes y representan más del 80 % de las extracciones de agua dulce en Libia, Djibouti, la Arabia Saudita y Palestina (figura 8.7) (Aquastat, s.f.).

Además, las aguas subterráneas de la región suelen abarcar grandes áreas geográficas y traspasar las fronteras políticas. La mayoría de los recursos de aguas subterráneas de la región no son renovables y deben gestionarse teniendo en cuenta que son un recurso finito. Sin embargo, el control de la extracción de aguas subterráneas sigue siendo difícil, a pesar de la aparición de nuevas tecnologías. Esto complica la gestión de las aguas subterráneas,

[34] projects.worldbank.org/es/projects-operations/project-detail/P112615.

Figura 8.7 Origen de las extracciones de agua en determinados Estados árabes, por fuente



Nota: No todos los datos corresponden al mismo año. Se utilizan los últimos datos disponibles para cada país.

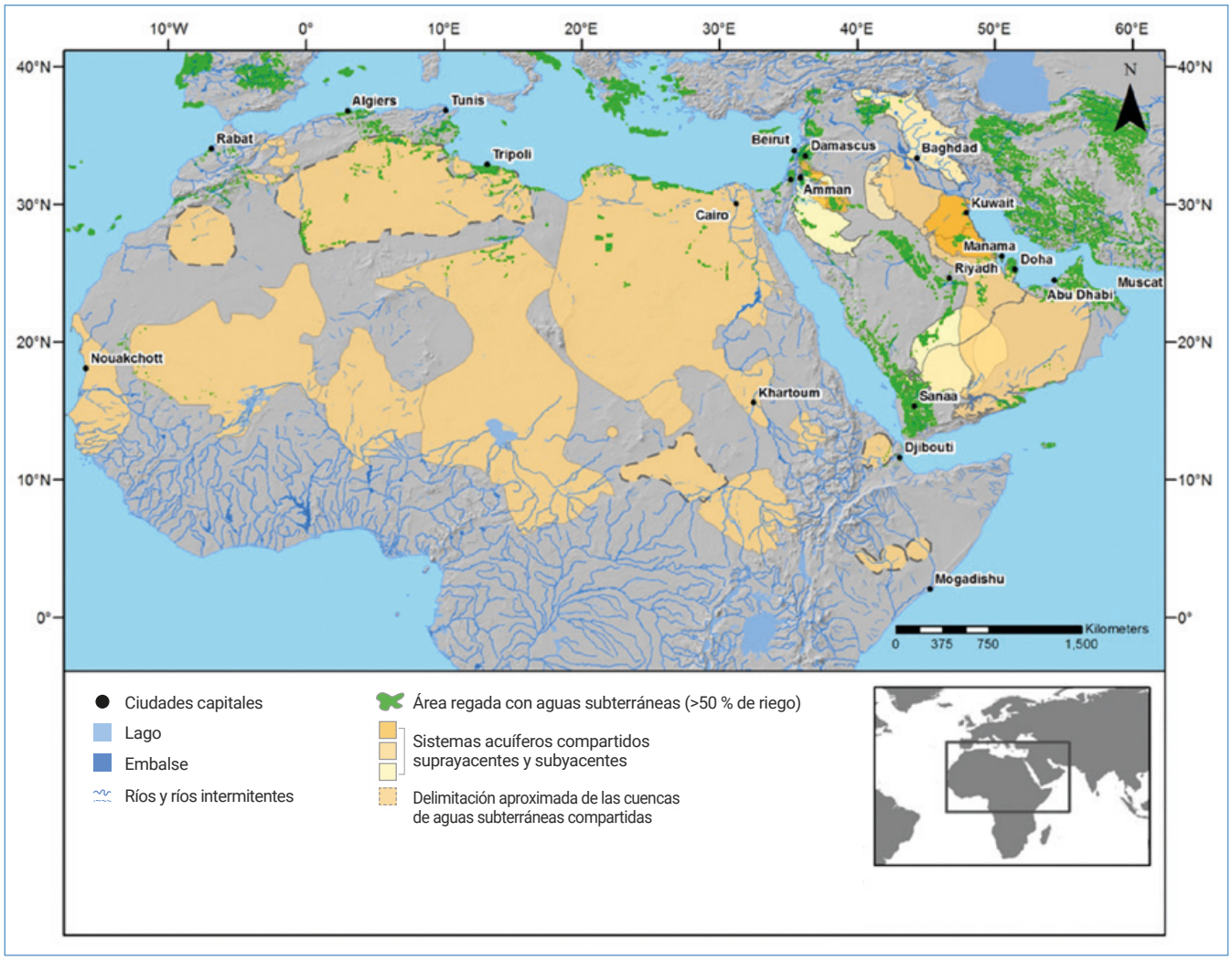
Fuente: Basado en datos de Aquastat (s.f.), Al-Zubari y Alajjawi (2020) (para Kuwait), y Abd-El-Mooty et al. (2016) (para el Iraq).

especialmente en un contexto transfronterizo. Todos los Estados árabes, excepto las Comoras, utilizan uno o más recursos de aguas subterráneas transfronterizas, con 42 sistemas acuíferos transfronterizos que cubren casi el 58 % del área de la región árabe (figura 8.8).

Es necesaria una estrecha cooperación para garantizar la correcta gestión de los acuíferos transfronterizos. Lamentablemente, solo existen muy pocos casos de cooperación en materia de aguas subterráneas en la región. Jordania y la Arabia Saudita firmaron un acuerdo de cooperación sobre el acuífero Al-Disi/Saq-Ram en 2015, con el objetivo de garantizar una gestión, utilización y sostenibilidad adecuadas de las aguas subterráneas, bajo la supervisión de un comité técnico conjunto[35]. La cooperación en el acuífero transfronterizo de Nubia, que comparten el Chad, Egipto, Libia y el Sudán, se lleva a cabo a través de una Autoridad Conjunta encargada del estudio y desarrollo de las aguas subterráneas. La cooperación y el intercambio de datos en el Sistema Acuífero del Sáhara Noroccidental (NWSAS), compartido por Argelia, Libia y Túnez, se facilita a través de un mecanismo de consulta albergado por el Observatorio del Sáhara y el Sahel (OSS) (CESPAO, 2019).

[35] Acuerdo entre el Gobierno del Reino Hachemita de Jordania y el Gobierno del Reino de la Arabia Saudita para la gestión y utilización de las aguas subterráneas de la capa de Al-Sag/Al-Disi, 30 de abril de 2015, www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Disi_Aquifer_Agreement-English2015.pdf.

Figura 8.8 Sistemas acuíferos transfronterizos en la región árabe

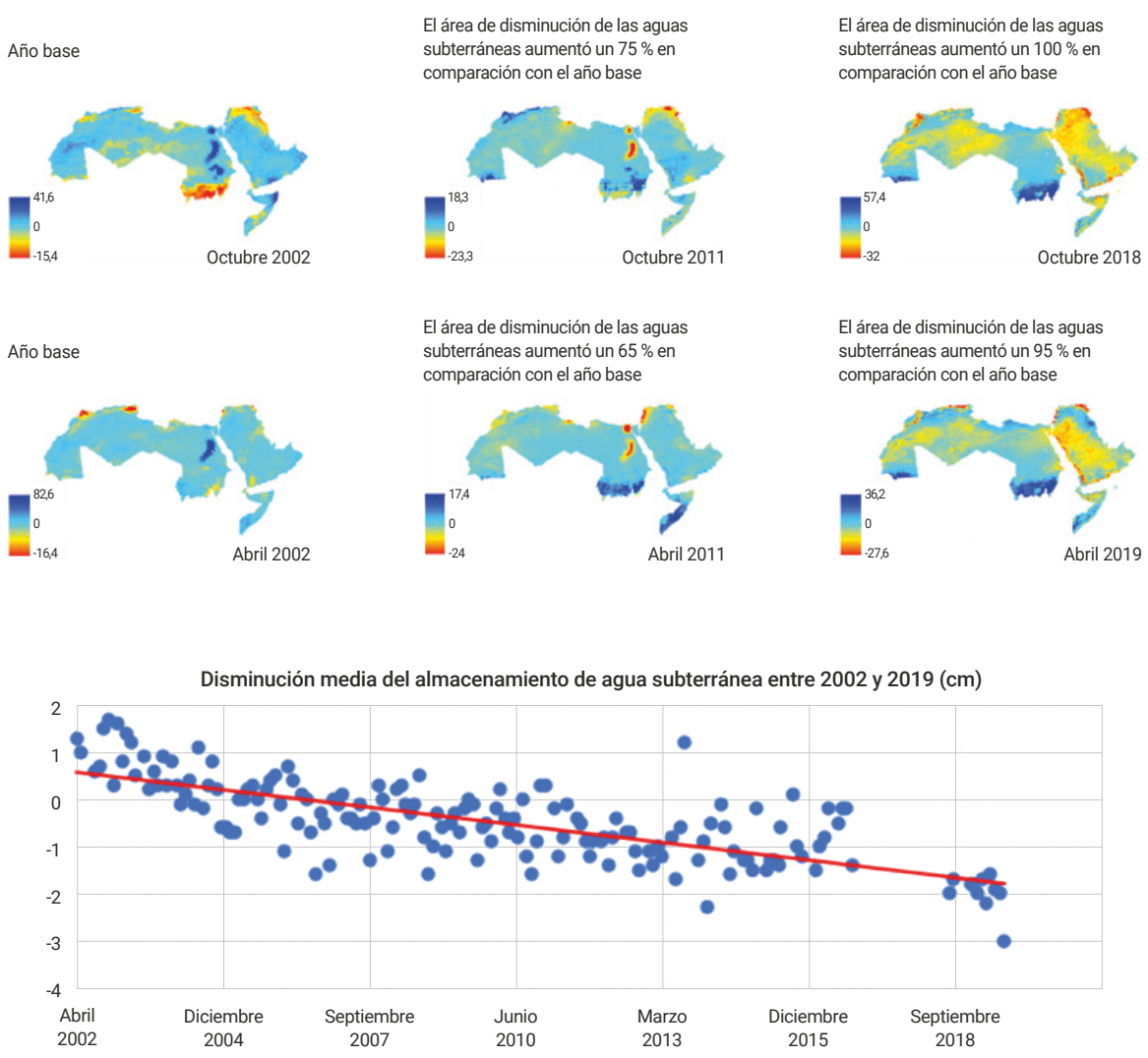


Fuente: CESPAO (2015, Mapa 2, p. 33).

8.5.2 Retos relacionados con las aguas subterráneas

El crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio climático están aumentando el estrés de las aguas subterráneas y amenazando la seguridad hídrica de la región. La sobreexplotación de las aguas subterráneas en muchas partes de la región ha provocado el descenso de la capa freática, especialmente en áreas muy pobladas y agrícolas. Esto es especialmente alarmante, ya que las aguas subterráneas son la principal fuente de agua para los grupos vulnerables que no están formalmente conectados o no tienen acceso a fuentes públicas de agua. El análisis de los datos de la misión Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) ha confirmado una tendencia general a la disminución del almacenamiento de aguas subterráneas en la región árabe. De hecho, las anomalías de almacenamiento de aguas subterráneas de la media (2004-2009) muestran que el área que experimenta un descenso en el almacenamiento de aguas subterráneas había aumentado un 75 % en octubre de 2011 y un 100 % en octubre de 2018 en comparación con octubre de 2002, mientras que había aumentado un 65 % en abril de 2011 y un 95 % en abril de 2019 en comparación con abril de 2002 (figura 8.9). Esto muestra no solo la importante tendencia a la disminución del almacenamiento de aguas subterráneas entre 2002 y 2019 (figura 8.9 – gráfico), sino que también pone de manifiesto el efecto de la variabilidad estacional en el almacenamiento de aguas subterráneas, combinado con las excesivas extracciones de agua subterránea en el periodo seco. Además, el agotamiento de las aguas subterráneas en los acuíferos y, concretamente, en los acuíferos con recursos de aguas subterráneas no renovables se ha estimado en un 317 % del volumen renovable en los Estados miembros del Consejo de Cooperación del Golfo (Al-Zubari et al., 2017).

Figura 8.9 Cambio en el almacenamiento de agua subterránea (espesor equivalente de agua líquida) en la región árabe entre 2002 y 2019 utilizando los datos de la misión GRACE (en cm)



Fuente: Compilado por la CESPAO, basado en McStraw (2020) y en GRACE 2.0 (s.f.).

Otra de las principales tensiones que amenazan la disponibilidad de aguas subterráneas dulces de buena calidad es la contaminación. Las prácticas agrícolas insostenibles, así como las industrias y la urbanización, están afectando significativamente a la calidad de las aguas subterráneas. La salinidad de las aguas subterráneas es el problema de calidad de las aguas subterráneas que se observa con más frecuencia en las ciudades costeras, donde la extracción excesiva provoca la intrusión de agua de mar. Por ejemplo, el sistema acuífero Umm er Radhuma-Dammam tiene agua entre salobre y salina en su área costera, que incluye partes de Bahrein, Kuwait, Qatar, la Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos (EAU), con un valor de Sólidos Disueltos Totales (TDS) superior a 1 g/l (CESPAO/BGR, 2013).

El cambio climático está afectando aún más a la disponibilidad de las aguas subterráneas debido a la disminución de la recarga de los acuíferos y a la reducción de la disponibilidad de las aguas superficiales, lo que provoca un aumento del bombeo. La Comisión Económica y

Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental (CESPAO), basándose en proyecciones de modelos climáticos regionales para informar sobre los modelos hidrogeológicos, descubrió que se espera que el nivel freático del acuífero Ben Tadla en Marruecos disminuya entre 10 m y más de 25 m bajo diferentes escenarios climáticos entre 2020 y 2100, dejando algunas áreas del acuífero completamente secas (CESPAO, de próxima publicación).

Las limitaciones de la gobernanza de las aguas subterráneas en la región árabe complican la respuesta a estos retos. Un informe de diagnóstico regional sobre la gobernanza de las aguas subterráneas en la región señalaba la existencia de políticas y legislaciones inadecuadas o inexistentes sobre las aguas subterráneas, junto con una voluntad política insuficiente para su aplicación. Otros problemas de gobernanza son la financiación limitada, la debilidad de las instituciones y de la coordinación, la debilidad de los sistemas de seguimiento y la falta de información, lo que da lugar a una mala comprensión de los sistemas de aguas subterráneas (Al-Zubari, 2014).

8.5.3 Innovaciones

La creciente concienciación sobre la mayor importancia y dependencia de las aguas subterráneas ha llevado a algunos países árabes a buscar nuevas formas de gestionar este recurso vital. En Marruecos, se han introducido contratos de acuíferos como una nueva medida de gestión participativa de las aguas subterráneas para mejorar la sostenibilidad basada en las necesidades locales (véase el cuadro 8.6). También se siguen aplicando los conocimientos tradicionales, como los aflaj, que son antiguos túneles utilizados para transportar el agua por gravedad para la irrigación, sobre todo a partir de fuentes de agua subterránea. En Omán, más de 3 000 transportadores de aflaj en funcionamiento siguen abasteciendo de agua a la agricultura. Las prácticas comunales y los acuerdos tradicionales también apoyan la distribución justa del agua entre los interesados de una generación a otra (Ministerio de Municipios Regionales, Medio Ambiente y Recursos Hídricos del Sultanato de Omán, 2006).

La creciente concienciación sobre la mayor importancia y dependencia de las aguas subterráneas ha llevado a algunos países árabes a buscar nuevas formas de gestionar este recurso vital

Muchos países árabes también están recurriendo cada vez más al MAR (véase el cuadro 7.1 y la sección 11.5) para compensar el agotamiento de las aguas subterráneas y mejorar su calidad. Por ejemplo, en Túnez, desde 2008 se han vertido aguas residuales tratadas en una cuenca de infiltración para el MAR en el acuífero de Korba. Los resultados mostraron cierta mejora en cuanto a la salinidad de las aguas subterráneas, pero la obstrucción disminuyó la eficacia de este método (Jarraya-Horriche et al., 2020). En Qatar se están aplicando tres tipos de MAR. La primera consiste en la recarga a través de pozos situados en áreas de depresión donde el agua de lluvia se acumula de forma natural; se aplica en áreas no urbanas para recargar las cuencas de agua subterránea. El segundo tipo utiliza agua reciclada, principalmente aguas residuales tratadas, para recargar pozos profundos en la cuenca de Doha. El tercer tipo recoge y trata las aguas pluviales urbanas y las mezcla con aguas subterráneas poco profundas para recargar pozos profundos en el acuífero de Doha con el fin de reducir la salinidad (Al-Muraikhi y Shamrukh, 2017). Los Emiratos Árabes Unidos empezaron a trabajar en el MAR en 2001, con el proyecto de Nizwa, en Sharjah, como primer ejemplo de éxito de almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR) para un acuífero no confinado en los Emiratos Árabes Unidos (Autoridad de Electricidad y Agua de Sharjah, 2015). Posteriormente, Abu Dabi se convirtió en el hogar de la mayor iniciativa de ASR del mundo (véase el cuadro 8.7), utilizando agua desalinizada para recargar un acuífero de arena de dunas del desierto cerca del oasis de Liwa.

El agua almacenada aquí puede recuperarse en condiciones de emergencia (Stuyfzand et al., 2017). En Omán, la Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos, las presas de contención construidas en los lechos de los ríos para desviar el escurrimiento y recargar los acuíferos siguen siendo el enfoque de MAR más practicado en la región.

Cuadro 8.6 Contratos de gestión de los acuíferos en Marruecos

Marruecos se enfrenta a una creciente inseguridad hídrica, que ha contribuido a un uso insostenible de las aguas subterráneas. En respuesta, el gobierno adoptó en 2006 un nuevo enfoque de gestión que emite contratos de acuíferos a todos los consumidores de agua subterránea en una región acuífera designada. En este marco participativo, se forjan acuerdos entre las partes interesadas locales, incluidas las organizaciones gubernamentales, las instituciones públicas, las asociaciones de usuarios de agua agrícola y las instituciones de investigación, para identificar las necesidades y garantizar los beneficios mutuos con el fin de mejorar la gestión y la disponibilidad de las aguas subterráneas. Esto se aleja directamente de los acuerdos de gestión centralizados administrados a nivel nacional.

El uso de contratos de acuíferos se puso a prueba por primera vez en la cuenca del río Souss Massa-Draa, que incluye tres acuíferos. El contrato del acuífero de Souss, firmado entre el gobierno y las partes interesadas en 2006, establece unos objetivos generales de uso del agua definidos conjuntamente, pero centrados especialmente en las aguas subterráneas, e incluye una lista de las actividades necesarias acordadas que deben llevarse a cabo para alcanzar estos objetivos. Las partes interesadas locales tienen una responsabilidad compartida por la sostenibilidad de las aguas subterráneas, lo que representa un incentivo para la aplicación y el desarrollo del contrato del acuífero.

El contrato del acuífero del Souss dio lugar a la firma del "Acuerdo Marco para la Protección y el Desarrollo de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Souss-Massa", al que siguieron otros seis Acuerdos de Asociación Específicos acordados por las partes interesadas locales. En ellos se esbozaron objetivos y actividades específicos inspirados en el Acuerdo Marco (Closas y Villholth, 2016).

Este enfoque de contrato de acuíferos es el primero en la región árabe y muestra las oportunidades que ofrece la descentralización y la integración de los usuarios locales del agua en los procesos participativos de toma de decisiones. Sin embargo, para que este enfoque participativo se traduzca en resultados concretos, hay que hacer más para garantizar la inclusión de los pequeños agricultores, incluidas las mujeres y los grupos marginados, por no mencionar la armonización de las políticas en todos los sectores.

Otros países todavía están probando enfoques de recarga artificial o los están aplicando a menor escala. Por ejemplo, Kuwait lleva estudiando y probando la recarga artificial en los acuíferos de Dammam y del grupo de Kuwait desde la década de 1980, utilizando agua desalada y aguas residuales tratadas (Al-Rukaibi, 2010). En Bahrein, un estudio reciente identificó seis sitios óptimos para aplicar la MAR mediante la recolección de agua de lluvia (Kadhem y Zubari, 2020). En el Líbano, se completaron las evaluaciones preliminares de 22 sitios que utilizan fuentes de agua naturales (ríos y manantiales), y diez sitios que utilizan aguas residuales tratadas, con el fin de recargar 12 cuencas de aguas subterráneas que están siendo agotadas o contaminadas con agua de mar. La técnica de recarga fue principalmente la inyección a través de pozos, por su idoneidad en un entorno kárstico y su rentabilidad (PNUD/ Ministerio de Energía y Agua del Líbano, 2014).

Cuadro 8.7 Aplicación del MAR en Abu Dabi

El proyecto de Liwa, en los Emiratos Árabes Unidos, se puso en marcha en 2004 y es el mayor proyecto de MAR del mundo. Se aplica la técnica de almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR), que consiste en infiltrar agua desalinizada en un acuífero de arena de dunas del desierto y recuperar el agua en condiciones de emergencia, sin tratamiento. El proceso de recarga comenzó en 2015 y el acuífero alcanzó su plena capacidad en 2017.

El sistema de ASR de Liwa no es típico, ya que la ASR suele consistir únicamente en pozos. En cambio, esta aplicación consta de tres cuencas de recarga subterráneas, cada una de las cuales está rodeada por 105 pozos de recuperación. El objetivo es infiltrar 26 500 m³/día de agua desalada durante 824 días con una concentración de sólidos totales disueltos (TDS) inferior a 250 ppm, y poder recuperar el agua a un ritmo de 170 280 m³/día durante 90 días con un TDS de aproximadamente 400 ppm en caso de emergencia. La eficacia de recuperación probada oscila entre el 60 y el 85 %, y ha demostrado la capacidad del MAR para reducir los riesgos de catástrofe y apoyar la respuesta de emergencia.

Fuente: Stuyfzand et al. (2017).

Capítulo 9

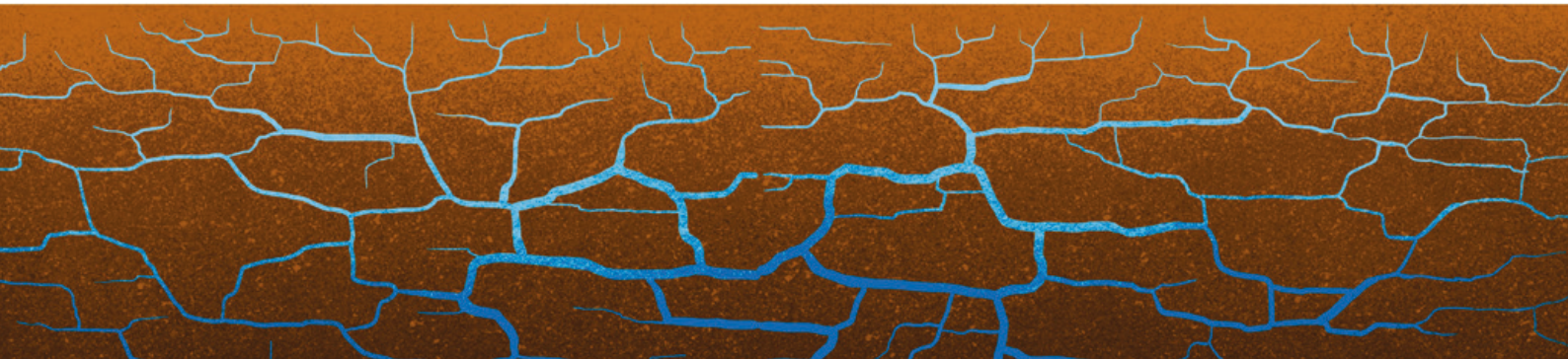
Construir y actualizar la base de conocimientos

UNESCO-PHI
Bruce Misstear* **y Alice Aureli**

IGRAC
Arnaud Sterckx, Claudia Ruz Vargas, Konstantin Scheihing y Neno Kukurić

Con contribuciones de Viviana Re (AIH), Christina Copeland (CDP), Aldo Fiori y Christophe Cudennec (AICH) y Kerstin Danert (Ask for Water GmbH en nombre de la Red de Abastecimiento de Agua Rural)

* Afiliado con el Trinity College de Dublín, Universidad de Dublín.



9.1 Introducción

Una sólida base de conocimientos sobre las aguas subterráneas es esencial para una toma de decisiones eficiente y sostenible. Desde que surgió como ciencia en el siglo XIX, la hidrogeología se ha basado en un conjunto de métodos y herramientas destinados a evaluar los recursos hídricos subterráneos a diferentes escalas y en diversos entornos ambientales y sociales. Los datos de las aguas subterráneas obtenidos mediante un seguimiento periódico permiten identificar las tendencias y los patrones de los sistemas de aguas subterráneas, lo cual es indispensable para modelar/simular los procesos actuales, o para predecir las posibles condiciones futuras mediante el análisis de escenarios. Los resultados de los cálculos de los modelos deben ir siempre acompañados de análisis de incertidumbre. Los datos recogidos y la información generada deben compartirse con todos los que dependen de las aguas subterráneas o se dedican a su gestión. Además, la construcción de la base de conocimientos y su aplicación sobre el terreno o en el nivel de toma de decisiones de gestión requieren una formación adecuada de los especialistas en aguas subterráneas.

Una sólida base de conocimientos sobre las aguas subterráneas es esencial para una toma de decisiones eficiente y sostenible

Aunque las evaluaciones de las aguas subterráneas requieren datos suficientes y fiables, su obtención puede ser a menudo un reto. Sin embargo, los avances significativos en el campo de la hidrogeología han permitido una amplia comprensión de las propiedades de los acuíferos y de los principios físicos y químicos que rigen el flujo de las aguas subterráneas y el transporte de contaminantes. Paralelamente, se han desarrollado diversos métodos y herramientas para la adquisición y el análisis de datos (por ejemplo, pruebas de acuíferos, geofísica, estudios hidrológicos e hidroquímicos, modelización numérica). Aunque todavía hay cuestiones científicas que merecen más atención, la investigación está avanzando rápidamente, impulsando los horizontes de la hidrogeología y, al adoptar un enfoque interdisciplinario, salvando las distancias con otras disciplinas como las ciencias medioambientales, la sociología, la sanidad, la economía, el derecho y la política. Además, cada vez se presta más atención al fortalecimiento de la cooperación entre las diversas partes interesadas mediante enfoques transdisciplinarios como la socio-hidrogeología (Re, 2015; Hynds et al., 2018). Los conocimientos científicos en hidrogeología y los métodos y herramientas disponibles son suficientes para abordar la mayoría de los problemas de gestión de las aguas subterráneas, como la ubicación de los pozos, la optimización de la extracción y la predicción de sus efectos a escala local y regional, la prevención de la contaminación, etc. El reto reside más bien en la escasez de datos fiables para las evaluaciones de las aguas subterráneas en áreas específicas y los análisis de escenarios, especialmente en los países de bajos ingresos, y en la limitada difusión de datos, información y conocimientos entre los investigadores, los profesionales y los responsables de la toma de decisiones.

9.2 Estudio de las aguas subterráneas: caracterización y evaluación

Dado que todos los acuíferos y sus condiciones de contorno son únicos, siempre es necesario realizar evaluaciones de las aguas subterráneas sobre el terreno para poder aplicar políticas y gestionar los recursos hídricos subterráneos con conocimiento de causa. Los estudios de aguas subterráneas que se limitan a los sistemas físicos de aguas subterráneas, en los que solo se consideran las características del acuífero (incluidas las entradas y salidas), se clasifican aquí en la categoría de *caracterización hidrogeológica*. Los estudios que incluyen otros aspectos, ya sean ambientales (por ejemplo, ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas), socioeconómicos (por ejemplo, aspectos de género y costes del abastecimiento de agua), legales (por ejemplo, normativas) y/o institucionales (por ejemplo, capacidad, autorización), se describen aquí como *evaluaciones de sistemas de aguas subterráneas*. Las evaluaciones de los sistemas de aguas subterráneas a escala regional/continental/global se basan principalmente en la agregación y ampliación de las evaluaciones locales.

9.2.1 Caracterización hidrogeológica

La caracterización hidrogeológica abarca la estimación de los parámetros y variables del acuífero, incluida la extensión del mismo (por ejemplo, profundidad, espesor) y sus propiedades hidrogeológicas (conductividad hidráulica, estraticidad, etc.). Las variables se refieren a la entrada (recarga), la salida (descarga) y el estado del acuífero. La recarga procede

principalmente de las precipitaciones (y también de las entradas de agua superficial), mientras que la descarga tiene lugar a través de los manantiales y el flujo de base hacia las aguas superficiales, la evapotranspiración (en los acuíferos poco profundos) y a través de los pozos de extracción. Las principales variables que describen el estado del acuífero son los niveles de agua subterránea y las variables de calidad del agua subterránea, como la temperatura del agua, el pH y la conductividad eléctrica (una medida indirecta de la salinidad). La tabla 9.1 ofrece una lista de los parámetros que se incluyen con frecuencia en el control de la calidad de las aguas subterráneas.

Tabla 9.1

Parámetros incluidos frecuentemente en el control de la calidad de las aguas subterráneas

Parámetros de atención básica	
CE	Conductividad eléctrica
pH	Acidez
T	Temperatura
NO_3	Nitrato
Cl	Cloruro
Parámetros suplementarios a baja frecuencia	
Ca, Mg, Na, K	Cationes principales
Cl, HCO_3, SO_4	Aniones principales
TDS	Sólidos disueltos totales
Control microbiológico de las fuentes de agua potable	
FC	Coliformes fecales
FS	Estreptococos fecales
E. Coli	Escherichia coli
Parámetros suplementarios (necesarios en entornos hidrogeológicos específicos)	
F	Fluoruro
Fe	Arsénico soluble
As	Uranio soluble
Mn	Amonio
U	Hierro soluble
P	Manganeso soluble
NH_4	Ortofosfato
Parámetros adicionales (si se identifican presiones agrícolas o industriales específicas)	
Plaguicidas específicos	Metales pesados
Productos orgánicos volátiles seleccionados	Algunos contaminantes emergentes
Hidrocarburos seleccionados	

Fuente: Adaptado de AIH (2017, p. 6).

Dado que el subsuelo suele estar formado por diferentes unidades geológicas con distintas propiedades hidráulicas, las aguas subterráneas pueden tener una serie de propiedades físicas y químicas en distintos lugares y a distintas profundidades. Como la recarga y la descarga de las aguas subterráneas son procesos complejos que varían en el espacio y en el tiempo, solo se pueden hacer estimaciones numéricas fiables sobre la base de observaciones detalladas sobre el terreno.

Debido a la diversidad y complejidad de sus procesos, a menudo es difícil reconocer el papel de las aguas subterráneas e incorporarlas adecuadamente en los procesos de toma de decisiones

Sin embargo, las observaciones directas de las aguas subterráneas y del subsuelo se limitan sobre todo a los pozos y manantiales, donde solo pueden medirse algunos datos, como el nivel de las aguas subterráneas, el rendimiento de los pozos, la descarga de los manantiales y la calidad de las aguas subterráneas. Otros datos se estiman mediante métodos indirectos, como las pruebas de bombeo, la geofísica, el rastreo de colorantes, los métodos de estimación de la recarga y la modelización numérica. Estas estimaciones conllevan cierto grado de incertidumbre, y los distintos métodos de estimación pueden arrojar resultados diferentes. Esto se aplica incluso a la estimación de una variable importante como la recarga de agua subterránea (Scanlon et al., 2002; Healy, 2010; Walker et al., 2019). Las estimaciones de parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica o la estratificación pueden diferir en un orden de magnitud dependiendo de las pruebas de bombeo y los métodos de interpretación utilizados. Además, algunas variables y parámetros rara vez se cuantifican en el campo a través de métodos directos o indirectos: en su lugar, se extrapolan basándose en valores comunes disponibles en la literatura publicada. La dispersividad, por ejemplo, un parámetro que controla los procesos de transporte de solutos, suele inferirse a partir de la litología y la escala del proceso de transporte de solutos (Schulze-Makuch, 2005).

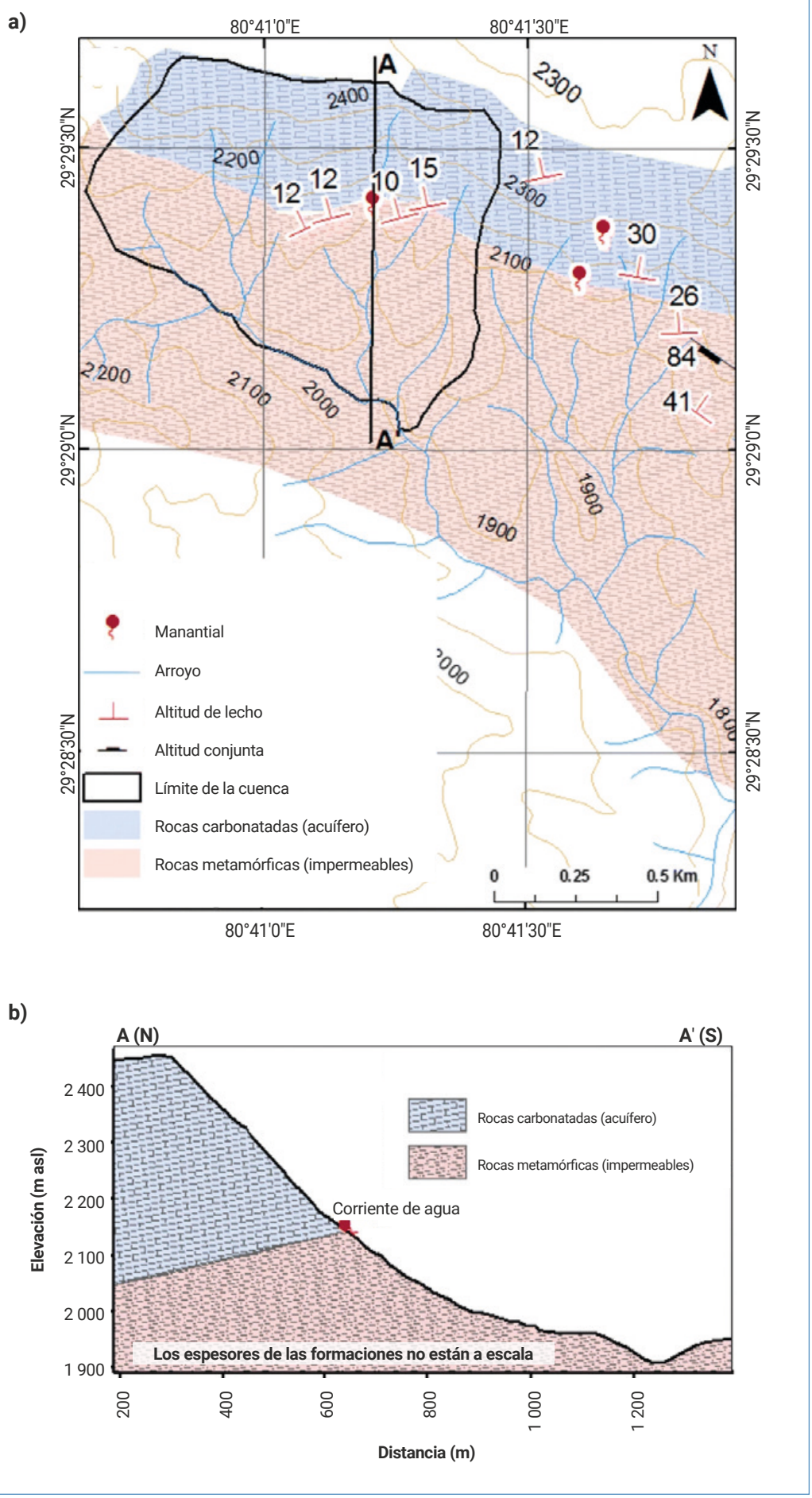
Dado que los datos puntuales medidos o estimados sobre el terreno tienen una representatividad espacial limitada, deben interpolarse cuidadosamente, utilizando información continua y/o complementaria (por ejemplo, teledetección, geofísica) siempre que sea posible. La calidad de la investigación de campo es crucial para una evaluación, y a menudo se recomienda un trabajo de campo/verificación adicional. Los mapas hidrogeológicos y las sesiones transversales que los acompañan (figura 9.1) son una parte necesaria de cualquier caracterización de acuíferos.

Además de los datos hidrogeológicos, la caracterización hidrogeológica requiere otros datos relacionados con el ciclo del agua (por ejemplo, datos meteorológicos, datos sobre las aguas superficiales, cobertura del suelo). También es fundamental recopilar datos sobre las extracciones de aguas subterráneas. En las jurisdicciones en las que se exige el registro de nuevas perforaciones o pozos, esta normativa puede permitir a las autoridades públicas controlar las extracciones de aguas subterráneas. La mayoría de los formularios de registro de pozos indican dónde se bombean las aguas subterráneas, quién las bombea, con qué fin y en qué cantidad. A veces, como en el caso de los pozos equipados con bombas de alto rendimiento, los propietarios de los pozos tienen que pagar una tasa o solicitar una licencia, que es una forma más de controlar las extracciones de aguas subterráneas, al tiempo que constituye una fuente de ingresos para las autoridades encargadas de la gestión de las aguas subterráneas. El registro de nuevos pozos ofrece otra oportunidad para recopilar datos significativos sobre las aguas subterráneas de los propietarios o perforadores de los pozos, incluidos los registros estratigráficos, la información sobre la calidad de las aguas subterráneas y los niveles de agua tras la finalización del pozo, así como los datos de las pruebas de los pozos. Hacer cumplir el registro y la licencia de los pozos puede ser un reto, y localizar los pozos ilegales suele ser difícil y llevar mucho tiempo. En consecuencia, hay muchos pozos ilegales, especialmente en los países en desarrollo, donde a menudo no se recogen datos y la extracción puede ser incontrolada.

9.2.2 Evaluación de los sistemas de aguas subterráneas

Como se ha destacado en capítulos anteriores, las aguas subterráneas desempeñan un papel importante en diversos aspectos y procesos medioambientales y sociales, desde los humedales hasta la producción de alimentos, y desde la salud y el saneamiento hasta la lucha contra el cambio climático. Debido a la diversidad y complejidad de sus procesos, a menudo es difícil reconocer el papel de las aguas subterráneas e incorporarlas adecuadamente en los procesos de toma de decisiones. Por lo tanto, es necesario evaluar los sistemas de aguas subterráneas en el contexto de las cuestiones sociales y/o medioambientales pertinentes, de forma interdisciplinaria, complementando la caracterización hidrogeológica con análisis

Figura 9.1
Un ejemplo de mapa hidrogeológico con una sección transversal



Fuente: Adaptado de Matheswaran et al. (2019, fig. 2, p. 2186).

medioambientales, socioeconómicos y, quizás, políticos/institucionales. Además de los servicios de abastecimiento (es decir, el suministro de agua a los hogares, la agricultura y la industria), las aguas subterráneas también proporcionan servicios de regulación (por ejemplo, la capacidad de amortiguación del acuífero), socioculturales (por ejemplo, los baños termales) y de apoyo (por ejemplo, la prevención del hundimiento del terreno) (véase la figura 1.3). Todos estos aspectos deben tenerse en cuenta al evaluar los sistemas de aguas subterráneas.

Los datos necesarios para una evaluación interdisciplinar son muy diversos y proceden de diferentes fuentes. Algunos datos sociológicos relevantes para las evaluaciones interdisciplinarias (como las consideraciones de género en relación con el abastecimiento de agua) pueden recopilarse sobre el terreno entre los propietarios de los pozos y los usuarios de las aguas subterráneas, junto con los datos hidrogeológicos. La participación de las comunidades locales durante las evaluaciones de las aguas subterráneas promueve la posterior adopción de medidas de gestión de las aguas subterráneas que se ajustan a sus necesidades, lo que resulta ser clave para la sostenibilidad de dichas medidas. Este enfoque es promovido por la red de socio-hidrogeología[36] de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) (véase también Re, 2015).

9.3 Supervisión de las aguas subterráneas

9.3.1 Control *in situ*

Las aguas subterráneas deben ser controladas a lo largo del tiempo en términos de cantidad y calidad, con el fin de conocer el comportamiento y el estado de los acuíferos, y para identificar posibles cambios negativos como la extracción excesiva, la reducción de la recarga (incluidos los efectos del cambio climático) y la contaminación. Los niveles de las aguas subterráneas, como indicadores del estado cuantitativo del sistema de aguas subterráneas, se controlan en pozos (figura 9.2), manualmente o con registradores automáticos (data loggers). Además, los registradores pueden estar equipados con sensores que permiten la transmisión telemétrica de datos a una base de datos. La recarga de las aguas subterráneas suele estimarse, mientras que varios componentes de la descarga de las aguas subterráneas (extracción de pozos, descarga de manantiales, caudales base de los ríos) pueden, en principio, controlarse, utilizando diferentes métodos y dispositivos.

El control de la calidad de las aguas subterráneas implica el muestreo de pozos y manantiales. Dado que la química de una muestra de agua subterránea puede cambiar rápidamente una vez que el agua subterránea llega a la superficie, algunos parámetros inestables (como el pH y la temperatura del agua) deben medirse *in situ* (en la boca del pozo o en el manantial), mientras que los análisis completos se realizan normalmente en muestras llevadas a un laboratorio. Cuando no se dispone de laboratorios a nivel local, pueden utilizarse kits de campo.

Los programas de control de las aguas subterráneas deben planificarse con arreglo a objetivos bien definidos, que determinen qué parámetros deben controlarse (cuadro 9.1), cómo, dónde y con qué frecuencia.

Los objetivos de los programas nacionales de seguimiento suelen ser proporcionar datos sobre el estado y las tendencias a largo plazo de las aguas subterráneas, así como aportaciones para la planificación de la política del agua (IGRAC, 2020). Un programa de seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas pretende evaluar los cambios naturales o antropogénicos en la química y la microbiología del agua. Otros objetivos podrían ser la investigación de problemas específicos de contaminación, o un área de estudio específica. El seguimiento detallado a escala local de los caudales de los manantiales y de los niveles de las aguas subterráneas es especialmente importante para los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.

[36] Para obtener más información, consulte: sociohydrogeo.iah.org.

Figura 9.2

Piezómetro moderno con un registrador de datos y una explicación para el público (Parque Nacional De Alde Feanen, Provincia de Frisia, Países Bajos)



Foto: Claudia Ruz Vargas.

En muchos países, el control de las aguas subterráneas es responsabilidad de instituciones públicas como los ministerios del agua y las agencias de protección del medio ambiente (IGRAC, 2020), aunque otras organizaciones, como las compañías de agua y los institutos de investigación, pueden tener sus propios programas de control. Sin embargo, muchos países de bajos ingresos tienen redes de monitoreo muy limitadas o no están en funcionamiento (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019a; IGRAC, 2020), principalmente debido a los costos de desarrollo, operación y mantenimiento de dichas redes.

Los programas de control de las aguas subterráneas deben planificarse con arreglo a objetivos bien definidos, que determinen qué parámetros deben controlarse, cómo, dónde y con qué frecuencia

El seguimiento de las aguas subterráneas es un reto debido a la naturaleza oculta y tridimensional del flujo de las aguas subterráneas, el tiempo de viaje generalmente largo de las aguas subterráneas y la complejidad del transporte de contaminantes. Pueden ser necesarios pozos de observación separados (figura 9.3) o grupos de piezómetros dentro de un pozo a diferentes profundidades, ya que los niveles de agua y los gradientes hidráulicos pueden variar entre (y dentro de) los acuíferos (Misstear et al., 2017). La ubicación de los pozos de control también desempeña un papel importante. Las muestras de aguas subterráneas deben tomarse en lugares y profundidades específicos debido a la (a menudo) compleja hidrogeología; además, las fuentes de contaminación cercanas o los métodos de construcción adoptados para los pozos de control pueden influir mucho en los resultados obtenidos. Además, la frecuencia de observación debe estar bien definida en función de los objetivos de seguimiento y de las características de las series temporales supuestas de la variable controlada. Los niveles de las aguas subterráneas deben registrarse a intervalos suficientemente frecuentes para identificar las variaciones estacionales y las tendencias a largo plazo derivadas de los cambios en las pautas de extracción o de las variaciones climáticas. La frecuencia de muestreo dependerá también del sistema de flujo de las aguas subterráneas y de las presiones del uso del suelo sobre la calidad de las aguas subterráneas. Los acuíferos muy vulnerables que prestan servicios a las personas y al medio ambiente deben ser objeto de un seguimiento más frecuente. Por todas estas razones, los programas de seguimiento de las aguas subterráneas deben definirse cuidadosamente y basarse en conocimientos hidrogeológicos sólidos, incluido un modelo conceptual suficientemente detallado del acuífero considerado.

Figura 9.3

Grupo de sondeos para controlar los niveles de agua a diferentes profundidades (sobrecarga, lecho de roca poco profundo y profundo) en un lugar del este de Irlanda



Foto: Bruce Misstear.

Aunque suele ser relativamente caro, el seguimiento es una inversión inteligente: identificar los problemas en una fase temprana puede ser muy rentable (Kim y Kim, 2019), lo que permite introducir medidas de mitigación antes de que se produzca un deterioro grave del recurso. Los programas de seguimiento convencionales pueden ser complementados con iniciativas de ciencia ciudadana, en las que los voluntarios realizan mediciones/muestras adicionales[37]. El muestreo manual puede apoyarse en las nuevas tecnologías, como las aplicaciones para teléfonos inteligentes para la recogida de datos, que hacen que los formularios en papel queden obsoletos y, por tanto, disminuyen los errores en el manejo de datos. La ciencia ciudadana va más allá de la mera toma de mediciones: la participación del público (por ejemplo, a través de entrevistas semiestructuradas) y el desarrollo de capacidades para las mediciones *in situ* pueden ayudar a garantizar la integración de los conocimientos locales en las evaluaciones hidrogeológicas (Re, 2015). De este modo, se puede evitar la comunicación unidireccional de la comunidad científica hacia la sociedad civil. Aunque hasta ahora se ha aplicado principalmente a las aguas superficiales, la ciencia ciudadana se está abriendo paso gradualmente también a las aplicaciones de las aguas subterráneas, incluso a través de proyectos en el Líbano (Baalbaki et al., 2019) y la India (Maheshwari et al., 2014).

Las técnicas de teledetección también han sido utilizadas por la comunidad científica para mejorar el seguimiento y la estimación de los recursos de aguas subterráneas

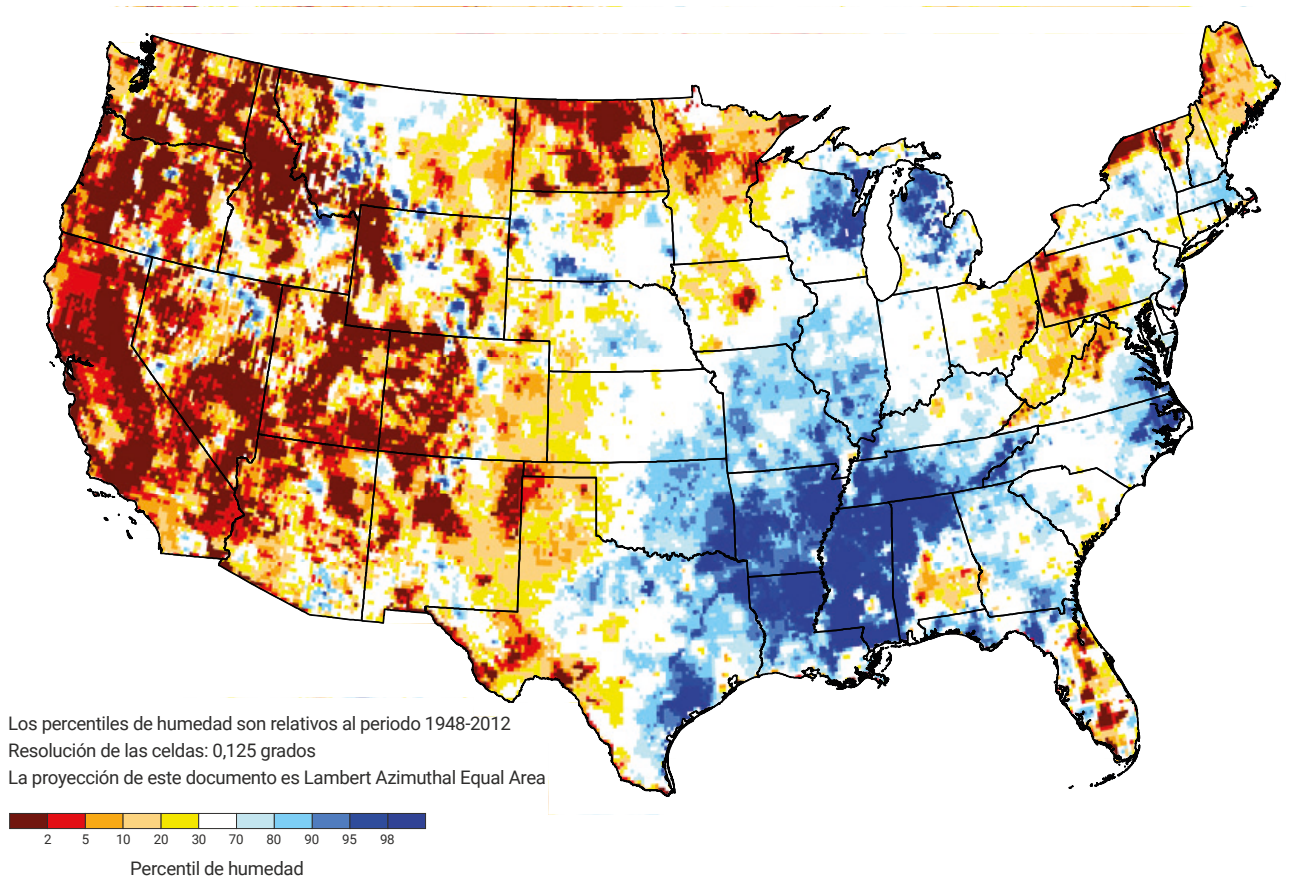
9.3.2 Teledetección

La teledetección (observaciones aéreas y por satélite) se utiliza ampliamente para estudiar y predecir los procesos hidrológicos. Dado que los cambios en las masas de agua superficiales pueden detectarse directamente a partir de observaciones remotas, la teledetección ha encontrado una amplia aplicación en la ciencia hidrológica y en la gestión de ríos y lagos. Las técnicas de teledetección también han sido utilizadas por la comunidad científica para mejorar el seguimiento y la estimación de los recursos de aguas subterráneas (Güntner et al., 2007; Scanlon et al., 2002, 2012b; y Shamsudduha et al., 2017). En particular, los resultados del

[37] Véanse, por ejemplo, las experiencias del proyecto MARVI: www.marvi.org.in.

Experimento de Recuperación de la Gravedad y el Clima (GRACE) han mostrado su potencial como fuente adicional de información sobre los cambios en el almacenamiento de las aguas subterráneas y se utilizan en combinación con los modelos para generar diversos resultados, como los indicadores de sequía (figura 9.4).

Figura 9.4 Indicador de sequía de aguas subterráneas poco profundas basado en GRACE para los Estados Unidos



Fuente: NASA/NDMC (2021).

El objetivo científico principal de GRACE es medir las variaciones del campo gravitatorio de la Tierra. Estas mediciones pueden utilizarse para derivar el cambio total de almacenamiento de agua (ΔTWS) en la Tierra (Rodell et al., 2018). Restando de ΔTWS el cambio de volumen de agua almacenada en los otros componentes terrestres del ciclo del agua (a saber, la humedad del suelo, los ríos, los lagos y los embalses, el hielo y los glaciares) para el mismo periodo, se puede estimar el cambio de almacenamiento de las aguas subterráneas (ΔGWS).

La principal limitación de la aplicación de GRACE es la resolución gruesa de los datos derivados del satélite. Además, como ΔGWS se calcula indirectamente, puede incluir errores acumulados de los otros componentes del agua considerados, algunos de los cuales se estiman mediante modelización[38]. A pesar de estas limitaciones, el enfoque se ha utilizado y combinado con otras fuentes de datos para mejorar la precisión de las estimaciones de los cambios en el almacenamiento de las aguas subterráneas. El proyecto en curso Global Gravity-based Groundwater Product (G3P)[39] proporcionará un conjunto de datos global, coherente y de libre acceso sobre ΔGWS.

[38] Un estudio reciente de Shamsudduha y Taylor (2020) mostró que el rango de incertidumbre de las estimaciones de ΔGWS derivadas de GRACE para 37 sistemas acuíferos varía entre el 36 % y el 219 %.

[39] Para más información, véase: www.g3p.eu.

Aunque los satélites no dan indicaciones directas sobre la calidad de las aguas subterráneas, pueden proporcionar información sobre el uso del suelo y la geología, que pueden estar relacionados con la calidad de las aguas subterráneas y la vulnerabilidad a la contaminación. Además, los resultados de la teledetección pueden utilizarse como variables adicionales para apoyar la elaboración de modelos predictivos. Por ejemplo, las predicciones de ciertos contaminantes pueden derivarse de la información sobre actividades antropogénicas, como los problemas de salinidad del suelo derivados de la irrigación intensiva (WWQA, 2021; PNUMA, 2020). Asimismo, la información sobre el hundimiento del terreno recogida mediante teledetección (por ejemplo, utilizando un radar interferométrico de apertura sintética - InSAR) puede vincularse a los cambios en el nivel de las aguas subterráneas y a la extracción de las mismas.

9.4 Análisis de escenarios e incertidumbre de las predicciones

Los datos históricos sobre las variables del sistema de aguas subterráneas (por ejemplo, los niveles de las aguas subterráneas o la salinidad), adquiridos a través del seguimiento, se utilizan para identificar las tendencias y las pautas del comportamiento del acuífero. Esta información es indispensable cuando se intenta prever la evolución de la cantidad y la calidad de las aguas subterráneas en el futuro. Esta previsión suele llevarse a cabo mediante un análisis de escenarios utilizando modelos numéricos, en los que se prueban y analizan los resultados de diversas entradas o intervenciones posibles en el sistema de aguas subterráneas.

Los datos históricos sobre las variables del sistema de aguas subterráneas (por ejemplo, los niveles de las aguas subterráneas o la salinidad), adquiridos a través del seguimiento, se utilizan para identificar las tendencias y las pautas del comportamiento del acuífero

Para el análisis de un escenario se utilizan modelos numéricos tanto deterministas como estocásticos (probabilísticos). Un modelo determinista se basa en un modelo conceptual hidrogeológico, siendo una simplificación de un entorno subterráneo normalmente complejo y simulando el flujo y el transporte a través de ese entorno. Un modelo estocástico se fija principalmente en las variables (de entrada, de estado y de salida), desarrollando diversos algoritmos (mediante el "aprendizaje automático") para simular los procesos que las conectan.

Los modelos estocásticos se utilizan ampliamente en la hidrología de las aguas superficiales debido a la disponibilidad de datos y a los rápidos tiempos de respuesta del sistema. Estas ventajas, junto con la complejidad de los entornos hidrogeológicos, son las dos razones principales para utilizar modelos estocásticos en la modelización de sistemas kársticos de aguas subterráneas.

Los modelos numéricos deterministas, basados en las propiedades físicas y químicas del medio, son herramientas poderosas para simular y predecir el estado de un acuífero en diversos escenarios. Sin embargo, hay que subrayar que los modelos son una simplificación del mundo real y que conllevan un cierto nivel de incertidumbre, que depende de varios factores, como el número y la complejidad de los procesos físicos y químicos simulados, la heterogeneidad del subsuelo, la calidad y la cantidad de los datos de entrada y la calibración del modelo. Esta incertidumbre puede ser significativa y, por lo tanto, debe evaluarse y comunicarse siempre antes de utilizar los resultados de cualquier modelo. Con los avances en las capacidades computacionales y los algoritmos, es posible (y muy recomendable) llevar a cabo análisis de incertidumbre, mediante los cuales se puede estimar el nivel de confianza de las predicciones del modelo.

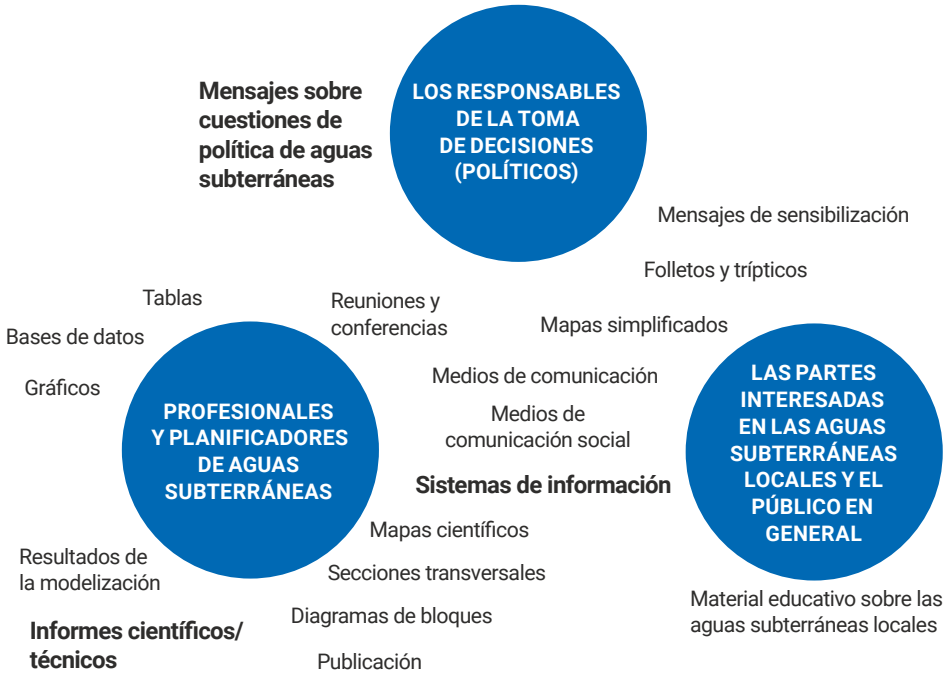
Independientemente de los modelos que se utilicen, un análisis de escenarios requiere una buena comprensión de las fuerzas motrices antropogénicas y medioambientales que afectan a los sistemas de aguas subterráneas, y de las formas en que pueden evolucionar. En la actualidad, los modelos de aguas subterráneas también se utilizan como componente de marcos de modelización hidroeconómica mucho más complejos, en los que los análisis de escenarios abarcan los resultados de varios modelos, abordando una diversidad de temas y cuestiones.

9.5 Compartir la base de conocimientos y crear capacidades

Los beneficios de los datos y la información se multiplican si se comparten entre las comunidades y organizaciones que están, o podrían estar, implicadas en el uso, la protección, el desarrollo y la gestión de las aguas subterráneas, o en su financiación. El conocimiento del estado de las aguas subterráneas es el primer requisito para gestionar este recurso de forma eficiente y sostenible. El abanico de comunidades y organizaciones que tienen interés en las aguas subterráneas es amplio, y cada una de ellas tiene diferentes necesidades de información, a diferentes escalas, que van desde los acuíferos locales a los sistemas acuíferos, y desde las cuencas fluviales o lacustres a otras unidades geográficas como países, subregiones o continentes. Por lo tanto, es necesario agregar la información y los conocimientos sobre las aguas subterráneas a escala regional, nacional y mundial para comprender el papel y el impacto de las aguas subterráneas en el contexto de los desafíos sociales y medioambientales interconectados. Los impactos del cambio climático (por ejemplo, las sequías, el aumento del nivel del mar), la producción y el comercio de alimentos, los conflictos y las migraciones son solo algunos ejemplos de procesos y cuestiones que requieren una política coherente en materia de aguas subterráneas a múltiples niveles. En consecuencia, la información sobre las aguas subterráneas debe adaptarse adecuadamente a audiencias específicas. Como se ilustra en la figura 9.5, esto puede ser en forma de informes científicos, sistemas de información, publicaciones en las redes sociales, folletos y presentaciones en conferencias, entre otros (Re y Misstear, 2018).

Figura 9.5

Formas seleccionadas de presentar los datos y la información sobre las aguas subterráneas, en relación con los usuarios previstos



Fuente: Van der Gun (2018, fig. 10.4, p. 207).

Mientras que el intercambio de información se promueve desde hace tiempo (por ejemplo, en el Principio 10 de la Declaración de Río, 1992), también se ha reconocido la importancia del intercambio de datos y de los datos abiertos (por ejemplo, a través de la Directiva INSPIRE en la UE, 2007). Sin embargo, el intercambio de datos e información es a menudo deficiente, especialmente en los países de bajos ingresos. Los datos pueden ser de difícil acceso y no estar disponibles gratuitamente (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019a). Esto se debe a los problemas técnicos (lagunas en la recopilación de datos, bases de datos anticuadas y capacidades informáticas limitadas), pero a veces también hay una reticencia a compartir datos "sensibles", o a compartirlos gratuitamente. Los datos sobre aguas subterráneas recogidos con fondos públicos deberían ser de libre acceso.

Asimismo, las empresas privadas deberían divulgar los datos y la información pertinentes sobre los parámetros relacionados con el agua del subsuelo que mejorarían la evaluación y la gestión de las aguas subterráneas. Por ejemplo, los datos geofísicos y de perforación adquiridos durante la exploración de petróleo y gas podrían mejorar el conocimiento de la extensión y los parámetros del acuífero. Además, las empresas mineras están divulgando cada vez más su uso del agua (Northey et al., 2019). Los grandes productores internacionales de bebidas y agua embotellada se arriesgan a una publicidad negativa si se les asocia con el agotamiento y/o la contaminación de acuíferos en situaciones en las que no existe claridad sobre el estado del acuífero y las presiones, los impactos y las tendencias relacionadas. Esto debería motivar a las empresas a evaluar sus riesgos, a utilizar las aguas subterráneas de forma sostenible y basada en pruebas y, en última instancia, a compartir sus datos relacionados con el agua.

Las empresas privadas deberían divulgar los datos y la información pertinentes sobre los parámetros relacionados con el agua del subsuelo que mejorarían la evaluación y la gestión de las aguas subterráneas

Además, si quieren crecer de forma sostenible, las empresas tienen que actuar más allá de las operaciones del sitio y ayudar a mejorar la gobernanza del agua en todo el acuífero. Esto lo reconocen algunas empresas líderes y se denomina administración del agua. Una investigación de CDP descubrió que el 64 % de las empresas informantes redujeron o mantuvieron sus extracciones de agua en una comparación interanual entre 2019 y 2020. Sin embargo, la participación de las empresas informantes sigue siendo baja, y el seguimiento de los vertidos de aguas residuales dista mucho de ser suficiente. Cada vez son más las empresas que incorporan las cuestiones relacionadas con el agua a sus objetivos empresariales, estrategias y planificación financiera a largo plazo. A pesar de ello, los ejemplos de inversiones de capital que ya se han realizado para reducir el uso de agua potable y los riesgos de contaminación son mucho menos numerosos. El control regular y la divulgación del uso de las aguas subterráneas, las evaluaciones exhaustivas de los riesgos medioambientales y la gestión activa del agua son los principales parámetros para distinguir entre el lavado verde y la gestión responsable y ética de una empresa (IGRAC, 2016). El CEO Water Mandate se ha creado para hacer frente a los retos mundiales del agua mediante la gestión empresarial del agua, en colaboración con las Naciones Unidas, los gobiernos, las organizaciones de la sociedad civil y otras partes interesadas[40].

La defensa de los datos abiertos está creciendo y se está desarrollando una infraestructura en línea para apoyar el intercambio de datos e información sobre las aguas subterráneas. Asimismo, el número de portales nacionales e internacionales con acceso a datos e información sobre aguas subterráneas no deja de crecer. Algunos ejemplos internacionales son: el Portal de Información sobre Aguas Subterráneas de la Comunidad para el Desarrollo del África Meridional (SADC), el Atlas de Aguas Subterráneas de África y el Archivo de Literatura (desarrollado por el Servicio Geológico Británico) y el Sistema mundial de información sobre las aguas subterráneas (GGIS) desarrollado por el Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC – figura 9.6).

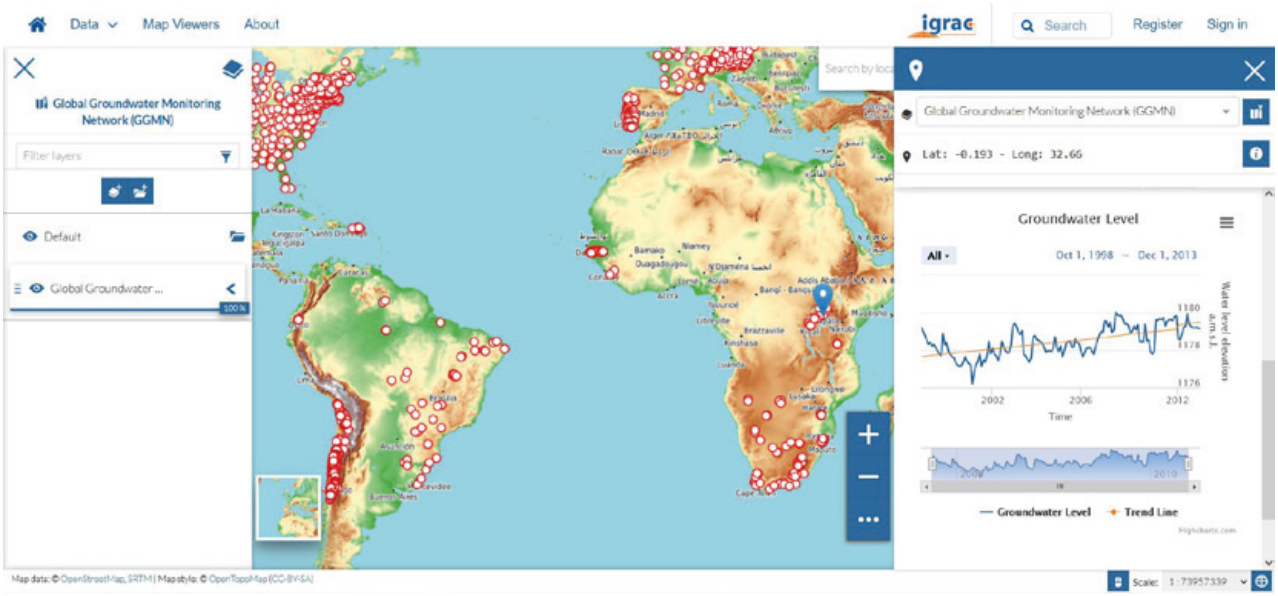
La difusión de datos científicos sobre las aguas subterráneas se realiza cada vez más en publicaciones de libre acceso, como artículos de revistas, libros de texto y manuales. Una iniciativa notable es el llamado Proyecto de Aguas Subterráneas[41], que promueve el libre acceso a los conocimientos sobre aguas subterráneas, a través de libros en línea y otros materiales educativos. Es importante compartir los conocimientos científicos con todos, especialmente en los países de bajos ingresos, donde el precio de los libros y las suscripciones a las revistas científicas puede ser una barrera para acceder a la información científica.

Dada la creciente relevancia de los recursos hídricos subterráneos en el contexto del cambio global, los especialistas en aguas subterráneas no solo deben aportar a la base de conocimientos, sino también ayudar a desarrollar políticas y participar en la toma de

[40] Para más información sobre el Mandato del Agua de los Directores Generales, véase: ceowatermandate.org.

[41] Para más información, consulte: gw-project.org.

Figura 9.6 Sistema mundial de información sobre las aguas subterráneas (GGIS)



Fuente: IGRAC (s.f.).

En muchos países de ingresos bajos y medios, falta capacidad hidrogeológica, incluso cuando las aguas subterráneas constituyen la mayor parte de sus recursos hídricos gestionados

decisiones. Sin embargo, a menudo no se reconoce su contribución potencial (Gleeson et al., 2020b; Gorelick y Zheng, 2015). Las organizaciones dedicadas a la gestión de las aguas subterráneas, como las compañías de agua, los organismos de agua, saneamiento e higiene (WASH), los organismos de cuenca y las agencias medioambientales se beneficiarían de la participación de los hidrogeólogos en el desarrollo de sus actividades.

En muchos países de ingresos bajos y medios, falta capacidad hidrogeológica, incluso cuando las aguas subterráneas constituyen la mayor parte de sus recursos hídricos gestionados (Foster, 2020). Esta falta de capacidad suele abarcar tanto la capacidad humana como la institucional (Abdolvand et al., 2015; Albrecht et al., 2017). Una gobernanza y gestión institucional débil de las aguas subterráneas, a su vez, socava la seguridad hídrica asociada (Naciones Unidas, 2018). Por lo tanto, los planes de creación de capacidades bien fundados son un elemento esencial para pasar de un círculo vicioso de sobreexplotación de las aguas subterráneas y degradación ambiental a un círculo virtuoso de creación de campeones locales de las aguas subterráneas que acaben fomentando prácticas de gestión sostenible y fortaleciendo la capacidad institucional (Ortigara et al., 2018; Jadeja et al., 2018; Taylor et al., 2012b). En consecuencia, la meta 6a de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) identifica la cooperación internacional y la creación de capacidades como factores clave para lograr una gestión sostenible de los recursos hídricos.

Para garantizar que las medidas de creación de capacidades tengan un impacto que perdure, las actividades respectivas deben ser específicas para el grupo objetivo, ofrecer perspectivas interdisciplinarias, permitir la retroalimentación de los aprendices e implicar mecanismos de verificación del éxito (Re y Misstear, 2018; Ferrero et al., 2019). Entre los marcos ejemplares que fomentan la creación de capacidades institucionales se encuentran las asociaciones comunales binacionales o los acuerdos de cooperación gubernamental en los que participan los organismos especializados pertinentes. Esto también puede abarcar la creación de centros de excelencia nacionales o regionales en el país receptor. Lograr el éxito institucional a través de la creación de capacidades hidrogeológicas suele requerir un esfuerzo duradero, que debería complementarse con programas de desarrollo que permitan a los nuevos campeones locales de las aguas subterráneas aportar su experiencia. A menor escala, la formación de capacidades humanas puede reforzarse, por ejemplo, con programas bilaterales de intercambio académico u oportunidades de formación de postgrado.

Capítulo 10

Políticas y planificación en materia de aguas subterráneas

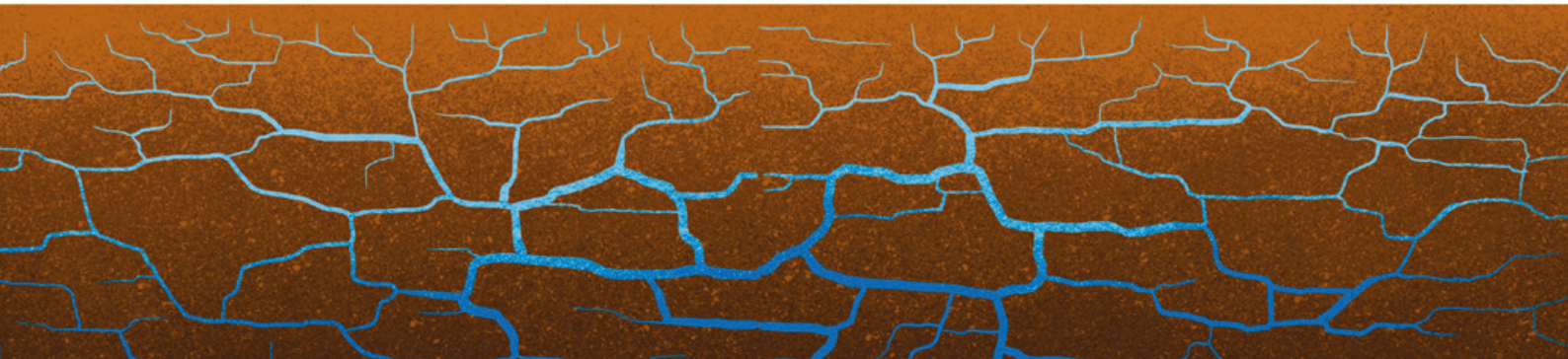
PNUD

Jenny Grönwall[*] y Marianne Kjellén

Con contribuciones de Gabriel Eckstein (Facultad de Derecho de la Universidad de Texas A&M), Kerstin Danert[**] y Lesha Witmer (WfWP), Rebecca Welling (UICN), Viviana Re (AIH), Katharina Davis (PNUD) y Lulu Zhang (UNU-FLORES)

[*] Encargado a través del Fondo para la Gobernanza del Agua, acogido por el SIWI.

[**] Ask for Water GmbH en nombre de la Red de Abastecimiento de Agua Rural.

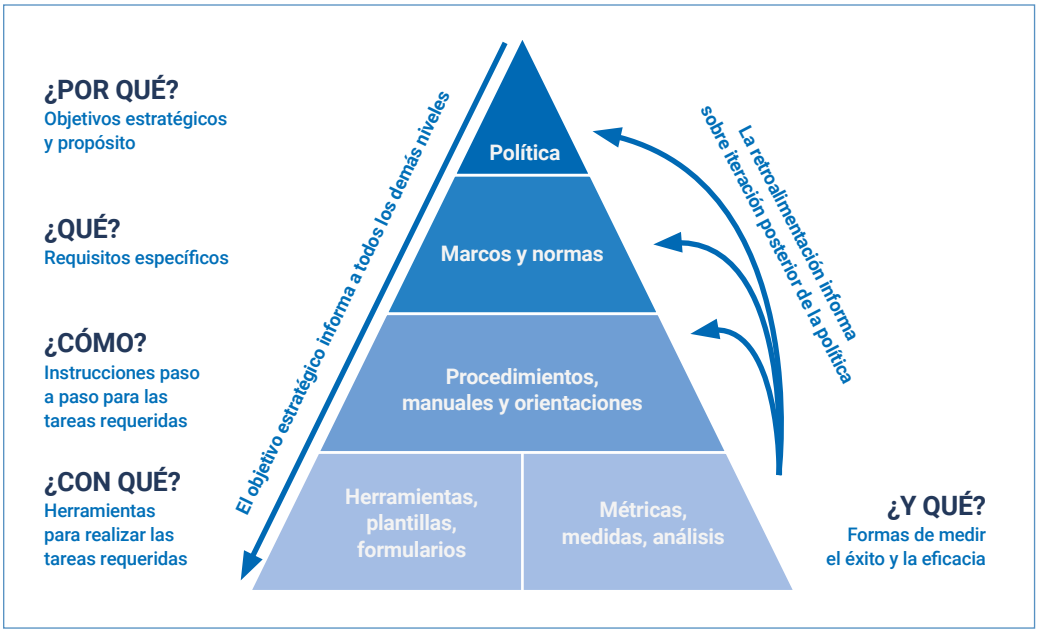


La política de aguas subterráneas define los objetivos, las ambiciones y las prioridades de la gestión de los recursos hídricos subterráneos, en beneficio de la sociedad. La planificación traduce la política en programas de acción. Ambas forman a menudo parte de un marco más amplio de política y planificación de los recursos hídricos, pero los retos específicos de las aguas subterráneas han recibido tradicionalmente menos atención que los de las aguas superficiales. Los términos "política", "estrategia" y "planes" se utilizan indistintamente en muchos países y contextos.

10.1 Políticas en materia de aguas subterráneas

Las políticas pretenden representar valores e ideas que se consideran de interés público. A través de declaraciones ampliamente formuladas, un documento político establece objetivos estratégicos, establece por qué son importantes y fija requisitos específicos para guiar el curso de acción de las decisiones presentes y futuras (Torjman, 2005; De Sousa y Berrocal Capdevila, 2019). La figura 10.1 indica cómo la política se relaciona con los requisitos específicos (¿Qué?); los procedimientos, manuales y orientaciones (¿Cómo?); y las herramientas de apoyo (¿Con qué?), ilustrando cómo traducir la política en acción (De Sousa y Berrocal Capdevila, 2019; Smith, 2003).

Figura 10.1
¿Qué es la política? Un modelo del estado de Nueva Gales del Sur (Australia)



Fuente: De Sousa y Berrocal Capdevila (2019).

En un contexto nacional, los "responsables políticos" suelen ser un organismo elegido o designado públicamente con el mandato de elaborar la política y su alcance. Los estados federales suelen tener políticas de aguas subterráneas a nivel nacional y estatal. La política puede estar destinada principalmente a las autoridades, organizaciones, jurisdicciones y organizaciones no gubernamentales, y estar relacionada con sus mandatos.

El desarrollo de políticas requiere tomar decisiones sobre los medios más apropiados para alcanzar un fin deseado. Los principios económicos (véase la figura 13.1) pueden utilizarse para orientar las elecciones, asignando valor a los recursos de aguas subterráneas (Smith et al., 2016). Los valores y principios instrumentales, intrínsecos y relacionales también son esenciales para defender la ética medioambiental, las necesidades humanas y los valores culturales e históricos (véase la figura 2.1 y Naciones Unidas, 2021).

El primer paso es determinar una "visión nacional de la gestión de las aguas subterráneas" que esté integrada en una visión nacional de los recursos hídricos, en diálogo con actores que van desde los usuarios locales de las aguas subterráneas y los técnicos hasta los científicos, los responsables políticos y los inversores, para catalizar y gestionar los cambios necesarios (Smith et al., 2016), como en Sudáfrica (República de Sudáfrica, 2010). La política de aguas subterráneas debe depender de la situación jurídica y la naturaleza de la propiedad de las aguas subterráneas (pública o privada), de los usuarios del agua, de las características de las aguas superficiales interrelacionadas y del uso del suelo en las áreas de recarga de los acuíferos (Foster y Chilton, 2018). Asimismo, debe prever la toma de decisiones integrada para los recursos hídricos subterráneos y los sistemas acuíferos, y conectar con otros sectores y ámbitos de la sociedad más allá del sector del agua, como el desarrollo socioeconómico, la igualdad de género y el alivio de la pobreza, la alimentación y la energía, los ecosistemas, el cambio climático y la salud humana.

Los estados federales suelen tener políticas de aguas subterráneas a nivel nacional y estatal

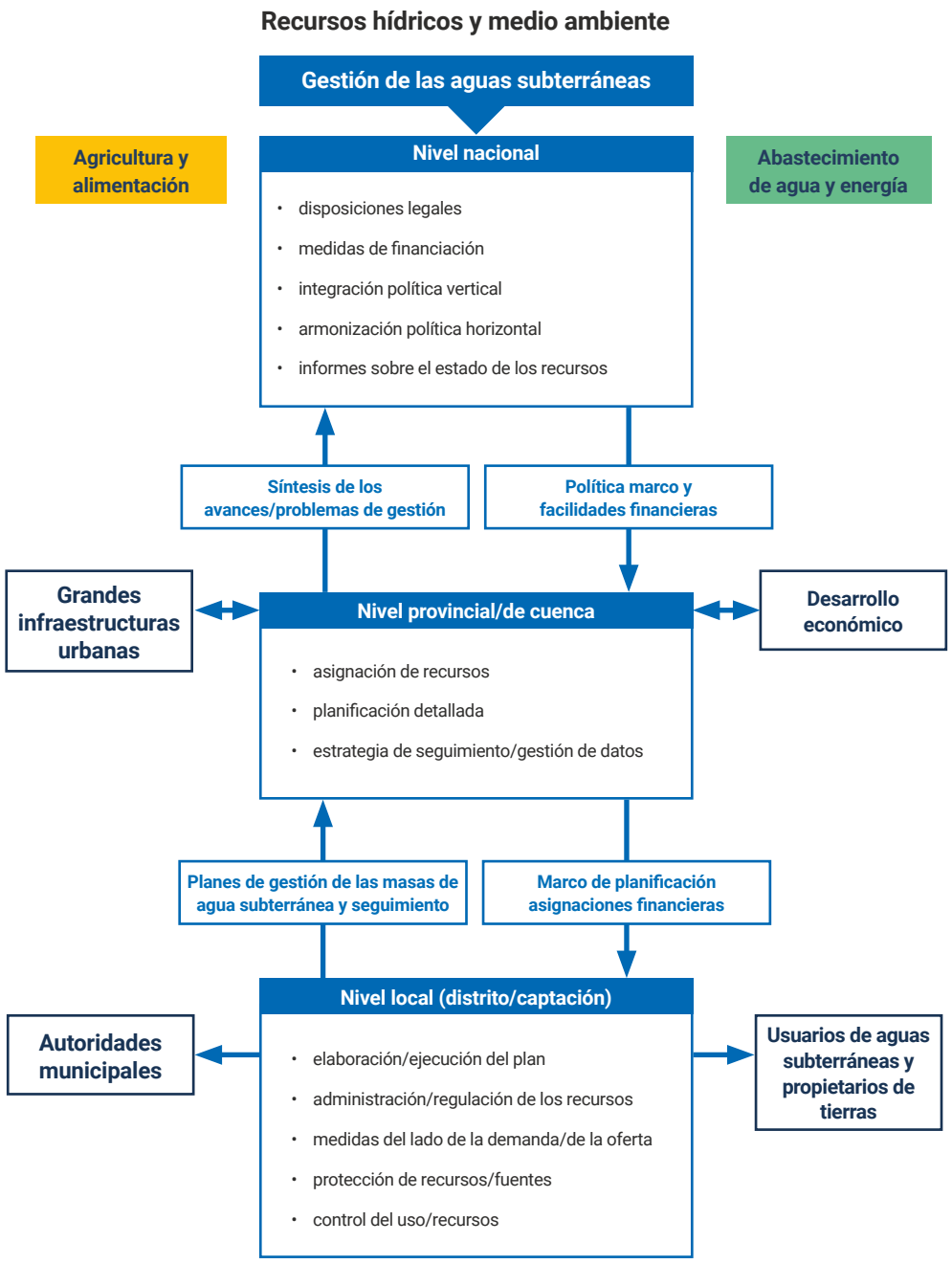
La figura 10.2 ilustra una estructura institucional genérica, mostrando cómo la elaboración de políticas puede permitir la integración vertical y horizontal y los vínculos con sectores relacionados. Las opciones y la estructura se sitúan en un contexto político más amplio en el que las directrices y los tratados internacionales pueden establecer marcos exteriores. Las recomendaciones del Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas (2016c), las normas establecidas en la Directiva de Aguas Subterráneas de la Unión Europea (Parlamento Europeo/Consejo, 2006), así como las Disposiciones Modelo sobre Aguas Subterráneas Transfronterizas (CEPE, 2014) en el marco del Convenio de la CEPE sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y los Lagos Internacionales (CEPE, 1992) y el Proyecto de Artículos sobre el Derecho de los Acuíferos Transfronterizos (CDI, 2008; véase el capítulo 12) también pueden orientar e influir en el establecimiento de políticas.

Una política de aguas (subterráneas) incluye normas fundamentales y principios rectores básicos. La sostenibilidad, la eficiencia, la equidad, el principio de precaución, el principio de que quien contamina paga, la gestión conjunta, la gestión de la demanda y el abastecimiento y el mantenimiento, y la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) son fundamentales para fundamentar las decisiones futuras (Smith et al., 2016). Para garantizar que se tienen en cuenta los intereses de las comunidades indígenas, por ejemplo, cuando se otorgan concesiones a los promotores de recursos hídricos subterráneos, también es esencial el principio del consentimiento libre, previo e informado, un componente de la Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas (AGNU, 2007). Los elementos de procedimiento pueden exigir la participación, la transparencia, la responsabilidad, la no discriminación y la universalidad, el Estado de Derecho, la lucha contra la corrupción y la subsidiariedad. El enfoque participativo hace hincapié en que las mujeres desempeñan un papel central en el suministro, la gestión y la salvaguarda del agua, como se subraya en los Principios de Dublín (ICWE, 1992). El Grupo de Alto Nivel sobre el Agua (2018) ha propuesto un conjunto actualizado de principios para la valoración del agua, y estos principios se han desarrollado en el *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: el Valor del Agua* (Naciones Unidas, 2021). Los principios de procedimiento también son fundamentales para el enfoque basado en los derechos humanos.

La Observación General n.º 15 sobre el derecho al agua recomienda que en la asignación del agua se dé prioridad a los usos personales y domésticos (CESCR, 2002). Por lo tanto, el agua potable tiene prioridad sobre otros sectores, por ejemplo, en Sudáfrica (República de Sudáfrica, 2010). Tras la elaboración de la política, puede ser útil enmarcar dicha política en la legislación, basándose en los términos de los derechos humanos, elevando así el agua potable de "necesidades" a "derechos" (Mechlem, 2016).

Figura 10.2

Estructura institucional para el desarrollo de la política de aguas subterráneas



Fuente: Foster y Chilton (2018, fig. 4.4, p. 87).

Con demasiada frecuencia, la adopción de una política de aguas subterráneas se centra principalmente en la utilización de las aguas subterráneas después de su extracción. Esto está muy alejado de una buena gestión del *acuífero*, que requiere prestar atención al uso de la tierra, a la reposición, a la protección y a la aplicación de medidas destinadas a preservar los múltiples servicios y funciones del sistema de aguas subterráneas (véase el capítulo 1). Los acuíferos, que actúan como "anfitriones" de las aguas subterráneas, y las propias fuentes de diversas aguas (subterráneas) son distintas, pero están interconectadas, y deben gestionarse mediante medidas específicas, aunque complementarias, que permitan un uso conjunto (Eckstein, 2017; Puri y Villholt, 2021).

10.2 Ejemplos de políticas de aguas subterráneas

La Política Nacional del Agua de la India de 2012 establece que las aguas subterráneas "*deben ser gestionadas como un recurso comunitario mantenido, por el Estado, bajo la doctrina del fideicomiso público para lograr la seguridad alimentaria, los medios de vida y el desarrollo equitativo y sostenible para todos.*" (Ministerio de Recursos Hídricos de la India, 2012, p. 4). A pesar de ello, la extracción de aguas subterráneas generalmente continúa sin una regulación o aplicación estricta (Pandit y Biswas, 2019), donde los poderosos intereses apenas afectados por los desincentivos gubernamentales impuestos son reacios a reducir su rentable uso de las aguas subterráneas. Muchos estados y territorios de la Unión incluyen las aguas subterráneas en sus políticas hídricas; por ejemplo, en Karnataka —un estado que se enfrenta a graves problemas agrarios y a una aguda escasez de agua para uso doméstico— la sobreexplotación de los acuíferos está ahora ampliamente reconocida, al igual que el nexo entre las aguas subterráneas y la energía (Kelkar Khambete, 2020). Un obstáculo para hacer realidad las ambiciones políticas es el sesgo de los datos en las estadísticas oficiales. Los pozos secos, por ejemplo, contienen información crítica sobre el estrés de las aguas subterráneas que se pierde cuando se filtran los datos. Esta brecha socava las intervenciones políticas y la asignación de recursos, como se ha observado en el estado vecino de Tamil Nadu (Hora et al., 2019).

En Australia, tras décadas de centrarse principalmente en las aguas superficiales, el gobierno federal, así como los Estados, los territorios y las autoridades de las cuencas fluviales, prestan ahora más atención a las aguas subterráneas. Un ejemplo es la estrategia actualizada de 20 años del Gobierno de Nueva Gales del Sur (NSW) (Gobierno de Nueva Gales del Sur, 2021). Este documento muestra un alto grado de integración horizontal, con las aguas subterráneas vinculadas a todos los sectores que dependen del recurso y que lo afectan.

10.3 Planificación de la gestión de las aguas subterráneas

La planificación estratégica identifica y define las acciones que pueden contribuir a la consecución de las ambiciones y objetivos políticos estipulados, en particular para los sistemas acuíferos prioritarios (cuadro 10.1). También puede servir para implicar a las partes interesadas en el proceso. Los planes estratégicos se elaboran para promover una gestión del agua y una toma de decisiones racionales, eficaces y justas en relación con los recursos y los usuarios de mayor interés. La planificación tiene en cuenta la incertidumbre en un entorno cambiante para abordar los problemas futuros conocidos, así como los que no se pueden predecir. Para ello es necesario que la GIRH y los vínculos con todos los sectores políticos pertinentes.

La *planificación de la gestión operativa* especifica las intervenciones y otras actividades que se llevarán a cabo sobre el terreno, incluido su calendario. Trata temas como las infraestructuras de abastecimiento de agua, los proyectos de repoblación forestal y la recarga artificial de acuíferos, así como las medidas no técnicas relacionadas con los requisitos legales y políticos, las directrices y los asuntos relacionados, incluyendo quién debe participar y en qué fase. Los planes operativos son más detallados que los estratégicos y suelen abarcar solo un sector político, o solo una parte de un sector, pero reconocen dónde tienen que enlazar.

En los sistemas de aguas subterráneas con poco estrés de desarrollo, serían apropiados los planes diseñados para monitorear los acuíferos para los impactos sin un mecanismo de control específico. En cambio, en regiones con una intensa competencia de uso o con escasez de agua histórica o prevista, los planes que detallan las medidas de control serían importantes para prevenir y gestionar los riesgos de sobreexplotación (White et al., 2016).

Los planes pueden desarrollarse para abordar específicamente cuestiones como los riesgos de inundación causados por el aumento del nivel de las aguas subterráneas, normalmente tras lluvias prolongadas. Otra posibilidad es centrarse en evitar el agotamiento, la intrusión del agua del mar y el hundimiento del terreno, y/o en proteger los ecosistemas vulnerables relacionados con las aguas subterráneas. La digitalización —incluyendo las tecnologías para el seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas y de los sistemas acuíferos en tiempo real— ofrece ganancias de eficiencia y optimización a través de la recopilación y el análisis

Cuadro 10.1 Puntos de acción para el proceso de planificación de los acuíferos prioritarios

La elaboración y aplicación de planes de gestión de las aguas subterráneas para los acuíferos prioritarios es la prueba definitiva de la idoneidad de las disposiciones de gobernanza, e implica la siguiente secuencia de acciones en cada ciclo de gestión adaptativa:

- identificación y caracterización de las unidades de gestión de las aguas subterráneas;
- evaluación del estado de los recursos, las oportunidades y los riesgos;
- Llegar a un consenso sobre los servicios acuíferos necesarios y los objetivos del plan;
- elaborar la estrategia de gestión (incluyendo medidas específicas, necesidades de seguimiento y la financiación asociada); y
- planificar la ejecución durante un periodo determinado, con un seguimiento sistemático, la revisión de eficacia y ajuste del siguiente ciclo.

Fuente: Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas (2016c, p. 86).

de datos, de importancia en cada etapa de la planificación de la gestión de las aguas subterráneas (UIT, 2010). Por ejemplo, en las regiones áridas, donde una metodología unificada para la evaluación y la toma de decisiones es a menudo restringida, un enfoque estratégico para la planificación de la gestión de los acuíferos puede tener que basarse en un modelo de riesgo (Şen et al., 2013).

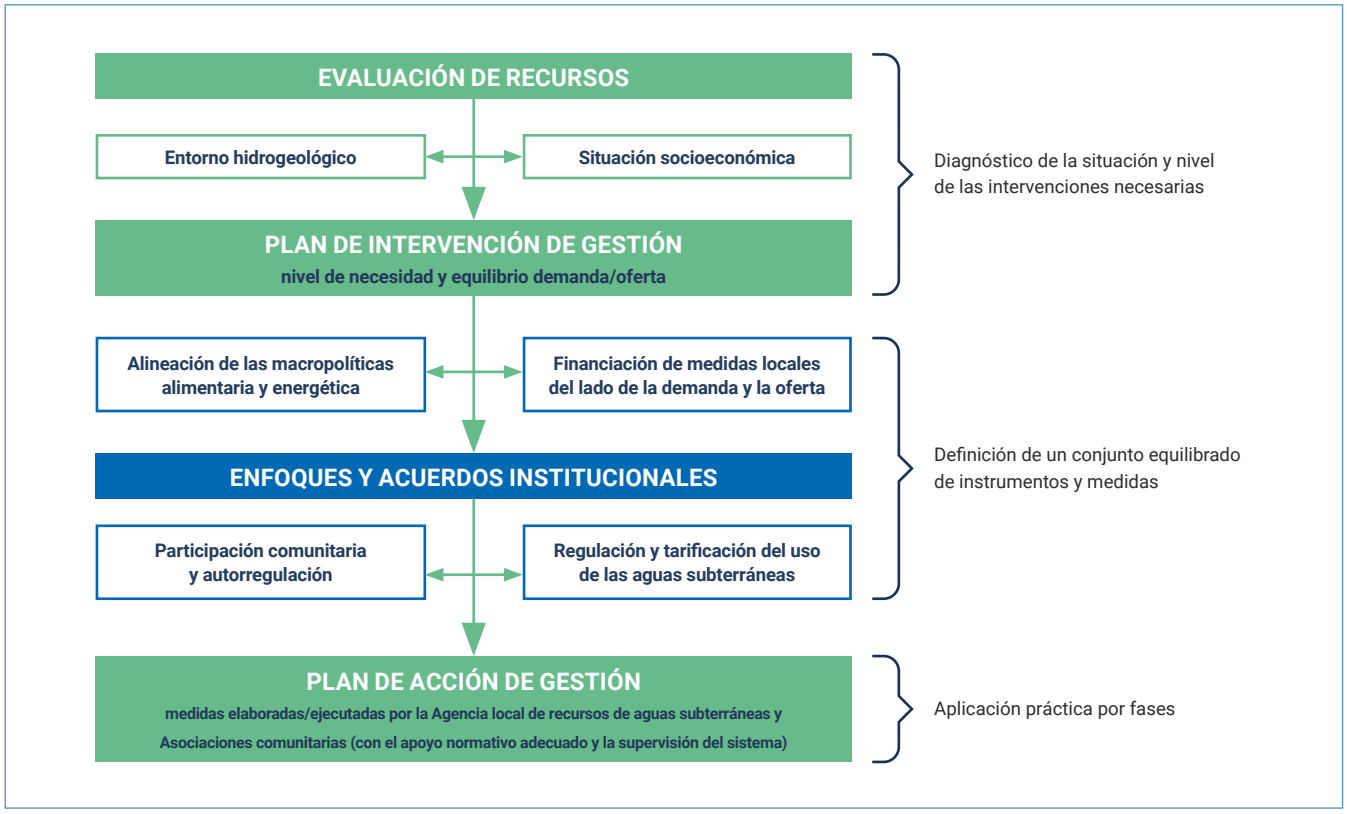
Un plan (de gestión) de aguas subterráneas traduce la política en un programa de acción presupuestado/ financiado y puede proporcionar un plan para su aplicación

Los principales componentes de los planes de aguas subterráneas son: inventariar, diagnosticar y caracterizar los sistemas acuíferos o partes de ellos (las "unidades de gestión"); evaluar y priorizar la importancia del sistema para el desarrollo socioeconómico y los ecosistemas; evaluar las presiones sobre el sistema; e implicar y consultar a las partes interesadas (Foster y Chilton, 2018). Los componentes adicionales incluyen la especificación de las intervenciones y otras medidas de gestión, así como los impactos previstos de dichas medidas. Todos ellos son fundamentales para la "gestión adaptativa", necesaria para afrontar los retos conjuntos del cambio global y la incertidumbre científica en torno a los complejos recursos hídricos subterráneos y los acuíferos. La planificación de la gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas es fundamental para diversificar las fuentes de agua y aumentar la resiliencia (Grönwall y Oduro-Kwarteng, 2018). En la figura 10.3 se muestran otros aspectos.

Es importante destacar que se espera que los Estados Miembros de la ONU hagan realidad los derechos humanos al agua potable y al saneamiento a través de planes de acción o estrategias, promoviendo así activamente la concienciación y la capacidad en relación con la protección de las fuentes de agua subterránea, la necesidad de tratamiento antes del consumo y la recarga de acuíferos (CESCR, 2002; Grönwall y Danert, 2020).

Los planes pueden prepararse como un esfuerzo de cooperación entre los ministerios nacionales, los organismos provinciales y locales, y las partes interesadas pertinentes, sobre la base del diálogo y el apoyo técnico inclusivo (por ejemplo, la cartografía participativa) para permitir la copropiedad del proceso y el resultado. El proceso produce un documento formal que puede ser validado, con acciones e indicadores con plazos definidos que pueden ser supervisados, y productos e impactos/resultados que pueden ser evaluados. El proceso incluye un presupuesto, vinculado a los resultados, que puede ser objeto de revisión a medida que se hace un seguimiento del rendimiento y cambian las condiciones (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c).

Figura 10.3 Etapas y factores en la elaboración de un plan de gestión de las aguas subterráneas



Fuente: Foster y Shah (2012, fig. 4, p. 10).

Las políticas, las estrategias y los planes deben adaptarse al contexto local, basarse en las prioridades y las aspiraciones de la población local y basarse en pruebas científicas sólidas

Los procesos de planificación de las aguas subterráneas abiertos y participativos pueden generar un mayor apoyo y aceptación pública del plan resultante y, por extensión, de la gestión operativa. Esta planificación implica a científicos, especialistas en gestión de recursos, partes interesadas y responsables de la toma de decisiones, y debe ser accesible a los no especialistas, invitando a los usuarios a participar (Quevauviller et al., 2016). La planificación de los recursos hídricos subterráneos incumbe tanto a los organismos gubernamentales como a los usuarios finales, de forma colectiva o individual. A escala local, la recopilación de datos y el análisis de la información serán necesariamente limitados; sin embargo, todos los niveles pueden beneficiarse de la creación de capacidades y la sensibilización. Asimismo, los datos desglosados por sexo y la garantía de la participación de las mujeres en la generación de datos (un tema normalmente dominado por los hombres) son vitales para adquirir una dimensión de género.

Aunque un plan de gestión de aguas subterráneas y acuíferos podría formar parte de un plan nacional de GIRH (GWP, 2017), la planificación a nivel de cuenca debe considerar los sistemas en su conjunto. De hecho, las aguas superficiales y las aguas subterráneas poco profundas suelen estar estrechamente interconectadas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los límites de las cuencas de aguas subterráneas no siempre coinciden con los de las áreas de drenaje superficial. Además, como no todos los acuíferos están vinculados hidrológicamente a los ríos o lagos, las relaciones río arriba - río abajo y las dinámicas de poder que influyen en el uso de las aguas superficiales y subterráneas pueden ser muy diferentes (Smith et al., 2016).

Las metas nacionales y los objetivos de desarrollo local, las prioridades, los enfoques y los niveles de actividad específicos de cada área orientan el desarrollo, el uso, la gestión y la protección óptimos de los recursos hídricos subterráneos y del medio ambiente y los ecosistemas conexos (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c). Las políticas, las estrategias y los planes deben adaptarse al contexto local, basarse en las prioridades y las aspiraciones de la población local y basarse en pruebas científicas sólidas.

Un plan debe establecer objetivos para la gestión de las aguas subterráneas y servir de hoja de ruta para guiar la aplicación de la política y las evaluaciones de diagnóstico de los recursos. El plan de gestión debe establecer las acciones necesarias para abordar problemas específicos o presiones sobre las aguas subterráneas para contextos concretos, por ejemplo, como se muestra en la tabla 10.1.

10.4 Ejemplos de planificación de la gestión de las aguas subterráneas

La Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (Parlamento Europeo/Consejo, 2000) estipula que los planes hidrológicos de cuenca son la principal herramienta para presentar el estado de las aguas y los análisis de impactos y respuestas, así como para informar a la Comisión Europea. Las Partes que aplican el *Acuerdo de París* en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático destacan sus acciones climáticas en los planes de contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC). Hasta la fecha, las aguas subterráneas figuran en los planes presentados por 20 países y se mencionan en 8, de un total de 75 Partes en el Acuerdo (CMNUCC, 2021). Estos planes incluyen referencias a la necesidad de invertir en la amortiguación de los acuíferos para aumentar la capacidad de adaptación, la mejora de la recarga de las aguas subterráneas, la protección y la gestión de las aguas subterráneas y los humedales, y la cartografía de riesgos. Las NDC mencionan la mitigación basada en la naturaleza y en la tecnología, así como las medidas dirigidas a la adaptación.

Tabla 10.1 Ejemplos de acciones que pueden especificarse en los planes de gestión de las aguas subterráneas

Tipos de medidas	Propósito	Ejemplos
Dirigido a la fuente	Minimización y prevención de los impactos en origen; mitigación	• Requisitos de autorización y licencia; aplicación • Normas de calidad para el vertido de aguas residuales; control de los pozos de inyección • Requisitos de gestión *in situ* y del paisaje para controlar la contaminación difusa no localizada • Incentivos económicos para reducir la contaminación • Desarrollo de tecnologías de baja y nula generación de residuos • Aplicación de enfoques "de la fuente al mar", "de la captación a la costa" y "del puente al arrecife" para abordar los flujos de agua, la biota, los sedimentos, la contaminación, los materiales y los servicios de los ecosistemas. • Gestión obligatoria y voluntaria de la demanda para evitar la sobreexplotación
Dirigido a los recursos	Gestión del recurso; mantenimiento y explotación	• Sistema nacional de clasificación de las aguas subterráneas • Asignación de clases de gestión de las aguas subterráneas • Fijación de objetivos de calidad según las clases de gestión • Establecimiento de zonas de protección del agua potable • Aplicación de métodos adecuados de tratamiento del agua potable • Establecimiento de una reserva basada en el volumen para satisfacer las necesidades humanas básicas y una reserva ecológica para proteger los ecosistemas • Control del hundimiento del terreno mediante límites de bombeo y recarga gestionada del acuífero
Remediación	Restauración de la calidad y cantidad de las aguas subterráneas, y/o del almacenamiento del acuífero	• Limpieza de lugares abandonados • Respuesta de emergencia a los vertidos • Reducción de la extracción para restablecer la reserva • Recarga gestionada de acuíferos, recogida de agua de lluvia y mejora de la infiltración • Desarrollo de un modelo físico de hundimiento del terreno para planificar estrategias de remediación

Fuente: Adaptado de Smith et al. (2016, cuadro 3.1, p. 53).

En Tonga, existe un riesgo de agotamiento de las aguas subterráneas dada la urgente necesidad de desarrollo económico, por ejemplo, mediante la intensificación de la agricultura (Reino de Tonga/Grupo del Banco Mundial/FIDA/PNUD, 2016). La segunda NDC de la isla (Reino de Tonga, 2020) identifica la salinización de las aguas subterráneas como un impacto potencial del aumento del nivel del mar, que amenaza con reducir la disponibilidad de los recursos de agua dulce. Entre los medios para hacer frente a la situación se encuentran las disposiciones del Plan del Sector Agrícola de Tonga, que sugiere evaluar los recursos de aguas subterráneas y su explotación actual, e identificar las áreas potenciales de protección. El plan también sugiere que, tras los años de sequía anteriores, hay un mayor interés en utilizar las aguas subterráneas para la irrigación.

En California (Estados Unidos), la Ley de Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas de 2014 encomienda a los organismos locales la regulación del bombeo en relación con la recarga de los acuíferos. Estos organismos tienen el mandato de seguir y controlar las extracciones y están obligados a cartografiar las áreas de recarga de los acuíferos. La Ley exige la planificación del uso de la tierra para lograr la sostenibilidad con transparencia y participación de las partes interesadas, y el aprendizaje dentro de las cuencas y entre ellas (Kiparsky et al., 2017).

La política y la planificación de las aguas subterráneas en China demuestran que a veces ambas son indistintas. La Ley del Agua de 1988 (República Popular China, 1988) incluye la planificación en un capítulo independiente para subrayar su importancia y su estatus legal. Establece que la planificación integrada del agua debe centrarse en las cuencas hidrográficas y no en los límites administrativos, y que la planificación regional debe ajustarse a la planificación de las cuencas hidrográficas y basarse en un estudio científico exhaustivo, una investigación y una evaluación en los niveles administrativos pertinentes. Sin embargo, la segmentación estipulada en la gestión de la cantidad y la calidad del agua dificulta inevitablemente la integración efectiva (Liu y Zheng, 2016). Un Plan de Control y Remediación de la Contaminación de las Aguas Subterráneas, y un Plan Nacional de Prevención y Control de los Subsidios del Suelo proporcionaron las directrices oficiales para la gestión de las aguas subterráneas hasta 2020 (Liao y Ming, 2019). Estos y otros planes se aplican paralelamente a la política de las "Tres Líneas Rojas" de 2012, que establece objetivos sobre el uso total del agua, la mejora de la eficiencia y la mejora de la calidad del agua. Una mayor planificación científica debería proteger los suelos y las aguas subterráneas para cumplir el XIV Plan Quinquenal. Además, el Plan de Acción de Prevención y Control de la Contaminación del Agua (también conocido como el "Plan Diez del Agua") tiene como objetivo controlar la calidad de las aguas subterráneas (Xinhua, 2020; China Water Risk, 2015).

El Marco Estratégico Nacional de Aguas Subterráneas de Australia se basa en un Plan de Acción Nacional de Aguas Subterráneas. En Nueva Gales del Sur, la planificación y la asignación de recursos se basan en los Planes de Reparto del Agua, y el Plan de Acción para la Reforma del Agua describe cómo el gobierno cumplirá sus objetivos (Gobierno de Nueva Gales del Sur, s.f.a, s.f.b). El Estado emplea un Régimen de Acceso a Granel para determinar la cantidad de agua que estará disponible para su extracción por parte de todos los usuarios con licencia dentro de un Plan de Reparto del Agua (véase también el cuadro 2.3). Por ejemplo, la Orden de Fuentes de Aguas Subterráneas Poco Profundas de la Gran Cuenca Artesiana de 2020 establece normas según las cuales deben ajustarse las asignaciones de agua, reconociendo, entre otras cosas, el efecto de la variabilidad climática en la disponibilidad de agua (Gobierno de Nueva Gales del Sur, 2020).

También se pueden extraer lecciones sobre la planificación participativa de Gujarat y Rajastán (India). En este caso, los investigadores hicieron partícipes a los habitantes de las aldeas para crear un sentimiento de propiedad y un cambio de comportamiento en torno a la sobreexplotación del agua subterránea. Los usuarios finales aprendieron a controlar el agua de lluvia, a manejar las estaciones meteorológicas automáticas y a introducir los datos en una aplicación de repositorio. Esto permitió calcular la recarga del balance hídrico y evaluar la cantidad de irrigación permitida (Maheshwari et al., 2014).

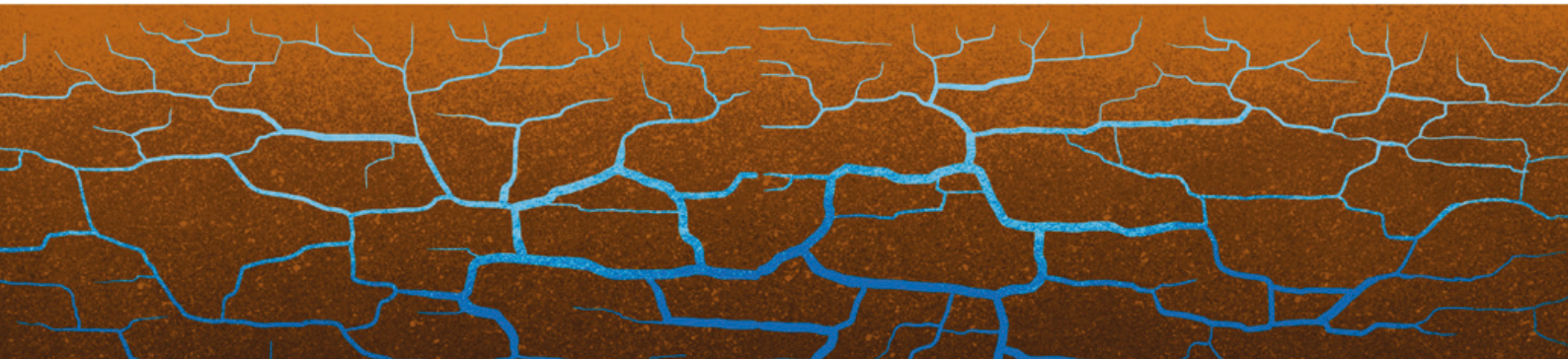
Capítulo 11

Gestión de las aguas subterráneas

UNESCO-PHI
Craig Simmons y Alice Aureli

IGRAC
Neno Kukurić

Con aportaciones de Anita Milman (Universidad de Massachusetts), Jane Dottridge (AIH), Bruce Misstear (Trinity College, Universidad de Dublín), Angelos Findikakis y Alberto Guadagnini (IAHR), Emilio Custodio (Universidad Politécnica de Cataluña), Virginia Newton Lewis (WaterAid), Christophe Cudennec (AICH), Enrique Fernández Escalante (TRAGSA), Kerstin Danert (Ask for water GmbH), Christina Copeland (CDP), Ziad Khayat (CESPAO), Guy Fradin (IWRA), Ghislain de Marsily (Universidad de la Sorbona y Écoles des Mines de París), Peter Dillon (CSIRO - Land and Water, Flinders University y National Centre for Groundwater Research and Training, Australia) y Catalin Stefan (TU-Dresden)



11.1 Introducción

La gestión de las aguas subterráneas abarca las decisiones y prácticas operativas cotidianas que guían la extracción de aguas subterráneas, así como otras actividades que influyen en las aguas subterráneas y en los acuíferos por los que fluyen. La gestión de las aguas subterráneas puede llevarse a cabo para alcanzar las metas y los objetivos de las políticas establecidas por las leyes y los procedimientos administrativos (véase el capítulo 10) o puede ser realizada por entidades e individuos que actúan por su cuenta. El conocimiento de los sistemas locales de aguas subterráneas y sus condiciones proporciona una base importante para la gestión, ya que identifica lo que hay que gestionar, las acciones que se pueden llevar a cabo y los impactos de esas acciones.

Dado que las aguas subterráneas proporcionan una serie de servicios de aprovisionamiento, regulación y apoyo (Bergkamp y Cross, 2007; Griebler y Avramov, 2015; véase la figura 1.5), la gestión de las aguas subterráneas es multidimensional. La gestión de las aguas subterráneas tiene como objetivo controlar la extracción y la calidad de las aguas subterráneas, así como abordar los efectos de la extracción de aguas subterráneas en los ecosistemas, las aguas superficiales y el hundimiento del terreno, entre otros. La gestión de las aguas subterráneas también puede tratar de asignar el agua de manera que se ajuste a las prioridades y objetivos estipulados en las políticas de aguas subterráneas. La necesidad de examinar las posibles externalidades y los múltiples efectos de cualquier acción de gestión es crucial para el éxito de cualquier esfuerzo de gestión, a fin de evitar consecuencias no deseadas o inesperadas.

Este capítulo ofrece una visión general de la gestión de las aguas subterráneas. Entre los temas que se debaten se encuentran: la recopilación de datos y conocimientos para la gestión de las aguas subterráneas, el control de la extracción de aguas subterráneas, la protección de la calidad de las aguas subterráneas y la gestión de las aguas subterráneas para una mayor sostenibilidad y necesidades. También se describen las prácticas de gestión integrada de las aguas subterráneas, incluida la recarga gestionada de acuíferos (MAR).

11.2 Requisitos de datos y conocimientos

El capítulo 9 describe las herramientas y los enfoques para construir la base de conocimientos sobre las aguas subterráneas y mantenerla actualizada. Para la gestión de las aguas subterráneas, se necesita un modelo conceptual hidrogeológico —que describa las características estructurales, las condiciones de contorno y las propiedades hidráulicas del sistema de aguas subterráneas— para estimar la disponibilidad de las aguas subterráneas y comprender y caracterizar los principales procesos físicos que tienen lugar en el sistema. Dado que los acuíferos son sistemas dinámicos sujetos a cambios, la extracción de agua subterránea, los niveles de agua y la calidad del agua deben ser controlados regularmente para proporcionar información sobre el estado del sistema de aguas subterráneas y las tendencias a lo largo del tiempo. Los modelos conceptuales hidrogeológicos, el balance hídrico (es decir, la recarga, la descarga y su diferencia) y los datos de seguimiento proporcionan los ingredientes básicos para los modelos de aguas subterráneas. La modelización de las aguas subterráneas puede contribuir a una mejor comprensión de los flujos en todo el sistema de aguas subterráneas y puede utilizarse para predecir el estado futuro del sistema (con y sin intervenciones de gestión).

11.3 Control de las retiradas

Quizá uno de los componentes más críticos de la gestión de las aguas subterráneas sea el control de la ubicación y la cantidad de las extracciones de agua del acuífero. El emplazamiento y la construcción adecuados de pozos y sondeos (también conocidos como pozos perforados o pozos tubulares) son fundamentales para gestionar los impactos hidrogeológicos de las extracciones, tanto en el propio acuífero como en otros bienes ambientalmente significativos como ríos, lagos, humedales, manantiales y ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. También es importante situar cuidadosamente los pozos para evitar o minimizar las posibles interacciones entre ellos. El control de la cantidad de agua extraída es importante porque el bombeo intensivo de aguas subterráneas continuado durante largos periodos de tiempo puede provocar su agotamiento.

Para gestionar las extracciones de aguas subterráneas se pueden utilizar diversas herramientas (tabla 11.1). Las herramientas que se utilicen dependerán del enfoque de gestión definido por los regímenes de gobernanza y política vigentes. No toda la gestión se realiza a través del gobierno. Las comunidades y/o los propios usuarios de aguas subterráneas pueden optar por gestionar de forma independiente la ubicación de los pozos y las extracciones de aguas subterráneas y, al hacerlo, emplear herramientas similares a las utilizadas por el gobierno.

Tabla 11.1
Métodos de control de las extracciones de aguas subterráneas

Enfoque de gestión	Herramientas de gestión
Regulación: controlar el desarrollo y la extracción de los pozos especificando las condiciones en las que se pueden extraer las aguas subterráneas	• Requisitos para la construcción, la perforación y/o el espaciado de los pozos y sondeos • Asignación y aplicación de los derechos de uso del agua (derechos, concesiones, licencias o permisos de extracción) que especifican una asignación volumétrica y el tiempo de extracción • Restricción del bombeo durante la sequía o en función de las condiciones climáticas o del caudal • Cuotas o restricciones en el uso de energía para la extracción de agua subterránea
Basados en el mercado: fomentan o desalientan la extracción de aguas subterráneas y las actividades conexas modificando el coste de esas acciones	• Tarifas/tasas aplicadas directamente a las extracciones de agua subterránea o a sustitutos, como la electricidad o el uso de la tierra • Subvenciones (subvenciones, préstamos, acceso a bienes o servicios con descuento y asistencia técnica) que recompensan el ahorro de agua o facilitan la adopción de nuevas tecnologías y prácticas
Información: influir en la extracción de aguas subterráneas y en las actividades conexas mediante la educación, la difusión de información y la orientación	• Difusión de información, orientación o datos destinados a cambiar el comportamiento • Campañas de sensibilización y marketing social • Elaboración de normas o certificaciones • Disposición de apoyo técnico
Informales: influyen en la extracción de aguas subterráneas y en las actividades relacionadas con ellas a través de normas culturales y conocimientos situados	• Presión social, seguimiento y sanción • Acciones de los usuarios de aguas subterráneas para adaptar el momento y la cantidad de su bombeo a las condiciones cambiantes del acuífero

El despliegue de diferentes tipos de herramientas de gestión puede influir simultáneamente en la ubicación, el momento y la cantidad de las extracciones de agua subterránea. La adopción de buenas prácticas en la ubicación y construcción de pozos suele ser la primera acción de gestión que se lleva a cabo. La ubicación de los pozos también debe tener en cuenta los factores socioeconómicos y culturales. Por ejemplo, en el caso de los pozos de agua rurales en África y Asia, donde las mujeres son normalmente responsables de la recogida de agua, la ubicación de los pozos debe tener en cuenta, además de los impactos en el acuífero, la distancia a pie y la seguridad personal en el lugar del pozo (Misstear et al., 2017). La construcción, el mantenimiento y la comprobación adecuados de los pozos son necesarios para garantizar el acceso sostenido a las aguas subterráneas, así como la rentabilidad y la seguridad. La disminución de la funcionalidad de las bombas manuales y el fracaso de las perforaciones debido a la mala calidad de las bombas son problemas comunes que afectan a muchos pozos, especialmente en algunas partes de África (Andres et al., 2018; Tincani et al., 2015).

El despliegue de varias herramientas de gestión de las aguas subterráneas está supeditado a la existencia previa de estructuras jurídicas e institucionales que otorguen autoridad para su uso y aplicación. La aplicación de cualquier nuevo régimen para controlar el bombeo y el uso de las aguas subterráneas no está exenta de dificultades. En muchas regiones del mundo, las leyes e instituciones que regulan las aguas subterráneas están en pañales y no son plenamente operativas. En cuanto a los enfoques reguladores, no existe un único método para determinar las asignaciones volumétricas, y cualquier método que se aplique tendrá sus puntos fuertes y sus inconvenientes. En diferentes lugares, los gobiernos han definido los derechos de agua en función de las tasas de bombeo históricas, los usos actuales, el área de terreno u otros métodos. A menudo, los gobiernos tratan de limitar las extracciones a un rendimiento estimado "seguro" o "sostenible", aunque estos conceptos se definen de forma ambigua. La interacción entre las aguas subterráneas y las superficiales dificulta la definición y asignación de caudales ambientalmente aceptables a los ríos a la hora de establecer los permisos de extracción de aguas subterráneas.

Cuando las aguas subterráneas han estado históricamente sujetas a una regulación mínima o nula, los usuarios de aguas subterráneas pueden considerar las acciones de gestión como una expropiación de la propiedad privada

Además, los usuarios de aguas subterráneas pueden resistirse a la imposición de nuevos esfuerzos para controlar el bombeo de aguas subterráneas. Cuando las aguas subterráneas han estado históricamente sujetas a una regulación mínima o nula, los usuarios de aguas subterráneas pueden considerar las acciones de gestión como una expropiación de la propiedad privada. Permitir usos exentos, como el uso doméstico o la ganadería, o una cantidad fija de bombeo inframarginal (es decir, un volumen permitido y normalmente pequeño de agua que puede bombearse sin estar sujeto a regulaciones o tarifas, normalmente para satisfacer las necesidades humanas básicas o la agricultura doméstica), puede ayudar a superar la resistencia al control mediante la regulación y la fijación de precios. Sin embargo, hay que tener cuidado para garantizar que los usos exentos no socavan los objetivos de gestión (Jakeman et al., 2016; Molle y Closas, 2020). La equidad es una consideración importante, ya que las acciones de gestión que afectan de forma diferenciada a los bombeadores y a los usuarios de aguas subterráneas pueden dar lugar a conflictos. La aplicación suele ser más eficaz cuando se utiliza una combinación de "zanahorias y palos" para cambiar el comportamiento de los usuarios (Molle y Closas, 2020).

Para que cualquier enfoque de control de la extracción de aguas subterráneas tenga éxito, es importante supervisar las tasas de extracción de aguas subterráneas y las condiciones del acuífero, y garantizar el cumplimiento de los permisos y los requisitos reglamentarios. El seguimiento también sirve para ayudar a los responsables políticos a justificar las restricciones a las abstracciones (Moench, 2004). Lamentablemente, debido a la naturaleza oculta de las aguas subterráneas, la cantidad de agua subterránea extraída a menudo queda sin determinar. Los propios usuarios de aguas subterráneas pueden desconocer la cantidad que extraen o, cuando lo saben, pueden incluso tener motivos para mantener esa información en secreto. La medición proporciona información valiosa, pero la instalación y lectura de los contadores no está exenta de costes y puede ser percibida por los propietarios de los pozos como una violación de su intimidad. En consecuencia, la mayoría de los pozos del mundo no están medidos (Kemper, 2007). Se están desarrollando tecnologías nuevas y de menor coste para la medición de las aguas subterráneas. Además, las cantidades de bombeo pueden estimarse indirectamente a través de la teledetección, la superficie de regadío y el uso de la electricidad, entre otros medios (Giordano, 2009; Ursitti et al., 2018). No obstante, en muchos lugares, la resistencia social y política al control y a la divulgación de datos puede impedir el seguimiento y la aplicación de la normativa sobre extracción de aguas subterráneas.

En el cuadro 11.1 se presenta un estudio de caso sobre la autorización y el aumento de pozos para reducir el impacto de la extracción de aguas subterráneas.

Cuadro 11.1 Gestión de la cantidad y la extracción de aguas subterráneas: permiso de pozos y aumento para reducir los impactos (cuenca del río South Platte, Colorado, Estados Unidos)

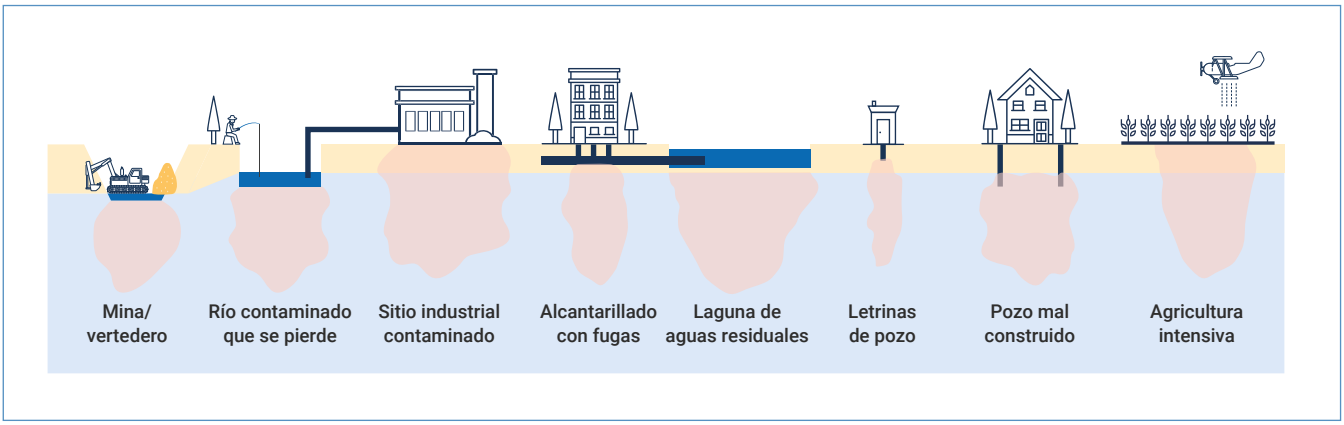
Los niveles de las aguas subterráneas y los caudales de las aguas superficiales en la cuenca del río South Platte, en Colorado (Estados Unidos), disminuyeron drásticamente a mediados y finales del siglo XX debido a la expansión del bombeo de aguas subterráneas. Estos efectos crearon tensiones entre los usuarios de aguas superficiales y subterráneas y amenazaron el hábitat de varias especies en peligro de extinción situadas aguas abajo en el río. Para abordar esta cuestión, el estado de Colorado exige a todas las entidades que comenzaron a bombear agua después de 1997, incluidos los nuevos usuarios, que obtengan la aprobación del Tribunal del Agua del Estado. Para ello, los posibles bombeadores deben demostrar que las extracciones de aguas subterráneas no afectarán negativamente a otros usos y usuarios o, si lo harán, los bombeadores deben llevar a cabo lo que el Estado denomina "aumento de pozos". El aumento de los pozos implica la compensación o la eliminación de cualquier impacto potencial de las extracciones de agua subterránea en el flujo de la corriente, normalmente mediante la recarga o la sustitución. Los planes de aumento de pozos deben incluir una evaluación del posible agotamiento del arroyo y un plan para evitarlo, teniendo en cuenta el tiempo que transcurre entre el bombeo, el aumento del pozo y los caudales del río. De este modo, el Estado gestiona las extracciones de aguas subterráneas para garantizar que no infrinjan los derechos existentes sobre las aguas superficiales y subterráneas, protegiendo al mismo tiempo los caudales en los arroyos.

Véase Milman et al. (2021) y Blomquist et al. (2010) para más información.

11.4 Proteger la calidad de las aguas subterráneas

Como se ha descrito en capítulos anteriores, la calidad de las aguas subterráneas se enfrenta a muchas amenazas derivadas de la intensificación de la agricultura, la urbanización, la industria, la minería, el crecimiento de la población y el cambio climático, así como de contaminantes naturales como el arsénico y el flúor (figura 11.1). Las aguas subterráneas deben gestionarse para evitar que estas amenazas y preocupaciones alcancen niveles problemáticos, para evitar el aumento de la contaminación e invertir las tendencias de contaminación, y para reducir los impactos de la degradación de la calidad del agua en la salud humana y el medio ambiente.

Figura 11.1 Fuentes de contaminación que amenazan la calidad de las aguas subterráneas



Fuente: Basado en Villholth et al. (2011, fig. 2.6, p. 15).

El enfoque más sostenible y rentable para la gestión de la calidad de las aguas subterráneas es garantizar una protección adecuada de las mismas, evitando así su contaminación por actividades humanas. Aunque la recuperación de las aguas subterráneas puede ser eficaz para reducir las concentraciones de contaminantes, es costosa. La protección de las aguas subterráneas puede lograrse mediante: i) un enfoque orientado a la fuente de contaminación que prevenga y minimice el impacto del desarrollo

en la calidad de las aguas subterráneas, y ii) un enfoque orientado a los recursos de aguas subterráneas que aplique medidas para proteger el acuífero y garantizar la sostenibilidad y la idoneidad para un uso beneficioso. Con respecto a los contaminantes de origen natural, pueden definirse y aplicarse medidas como la restricción de la extracción, la limitación de la extracción para evitar la entrada de agua de calidad diferente y los requisitos operativos (por ejemplo, restricciones en el momento y el ritmo de bombeo para minimizar el riesgo de deterioro de la calidad del agua).

Las fuentes de contaminación pueden controlarse mediante normas, protocolos de vigilancia, prácticas de gestión *in situ* y permisos que especifican los requisitos para el vertido de residuos y las actividades potencialmente contaminantes. Estos instrumentos de gestión suelen dictar qué sustancias químicas o componentes pueden utilizarse, y cuándo, dónde y cómo. También especifican qué tecnologías y procedimientos deben seguirse para evitar o reducir la contaminación y el riesgo de accidentes o vertidos. El control, la aplicación y la sanción mediante multas por incumplimiento mejorarán la eficacia de esas actividades.

Las fuentes de contaminación pueden controlarse mediante normas, protocolos de vigilancia, prácticas de gestión in situ y permisos que especifican los requisitos para el vertido de residuos y las actividades potencialmente contaminantes

La protección del acuífero puede lograrse mediante la cartografía de la vulnerabilidad, el desarrollo de zonas de protección de las aguas subterráneas para salvaguardar el agua potable (cuadro 11.2) y la planificación del uso del suelo que tenga en cuenta la protección de la calidad del agua subterránea. Las mejores prácticas de gestión, los programas de incentivos y desincentivos para la protección de los acuíferos y las campañas de educación y sensibilización también pueden contribuir a la protección de los acuíferos.

Una mala construcción de los pozos suele significar que los propios pozos constituyen la principal vía de entrada de contaminantes en el acuífero (o de paso entre acuíferos). Para ayudar a preservar la calidad de las aguas subterráneas, los pozos deben construirse con sellos sanitarios adecuados y con cabeceras de protección.

La gestión de la calidad de las aguas subterráneas requiere un seguimiento mediante la recogida y el análisis periódicos de muestras de agua durante periodos prolongados. La capacidad institucional, técnica y de recursos es necesaria para recoger datos de alta calidad con una frecuencia suficiente y para evaluar las tendencias de la calidad del agua con el fin de identificar los riesgos y determinar el efecto de las actividades de gestión.

La contaminación difusa y la naturaleza distribuida de las fuentes potenciales de contaminantes presentan desafíos muy reales para controlar la calidad de las aguas subterráneas. Esto se debe a que hay muchas vías a través de las cuales los contaminantes pueden llegar al acuífero y el control y la aplicación de todas las vías es imposible. La contaminación de un sistema acuífero suele detectarse mucho tiempo después de producirse. De hecho, en muchos lugares del mundo, las fuentes de contaminación ya no existen, pero los penachos de contaminación siguen presentes o acaban de emerger (por ejemplo, nitratos, líquidos densos en fase no acuosa (DNAPLS), etc.).

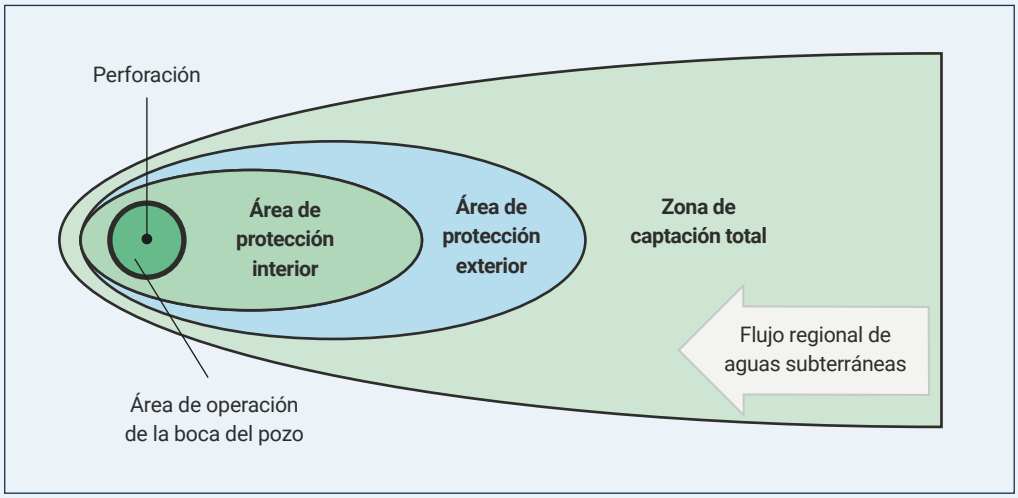
La prevención de la contaminación y la protección de un acuífero suelen requerir la coordinación de muchos organismos y agentes. En muchos países, organismos distintos regulan el uso del suelo, los recursos hídricos, el vertido de residuos y el uso de sustancias peligrosas.

La coordinación, la comunicación y la armonización normativa entre los organismos, los agentes y los marcos políticos pertinentes son algunos de los muchos retos que hay que superar para proteger la calidad de las aguas subterráneas de forma eficaz y eficiente.

Cuadro 11.2 Áreas de protección de fuentes de agua subterránea

Las áreas de protección de las fuentes de agua subterránea se emplean para evitar la contaminación de las fuentes de agua potable y de las aguas subterráneas utilizadas con fines agrícolas. Este enfoque suele establecer una distancia mínima entre las zonas de eliminación de residuos u otros lugares contaminantes identificados, y las áreas de abastecimiento de aguas subterráneas protegidas. El riesgo, la vulnerabilidad y las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas importantes informan el diseño de las zonas de protección. Hay muchos ejemplos de este enfoque de gestión en todo el mundo, como en Australia, el Canadá, Europa, la India y los Estados Unidos.

Representación esquemática de las áreas de protección alrededor de una fuente de agua



Fuente: Basado en Nel et al. (2009) y Rajkumar y Xu (2011).

11.5 Enfoques de gestión integrada

Los sistemas de aguas subterráneas no existen de forma aislada: están estrechamente interconectados con las aguas superficiales, la tierra, el clima y los ecosistemas. Estos vínculos, así como sus conexiones con la sociedad, la cultura y la economía, deben entenderse para gestionar las aguas subterráneas con eficacia. En muchos países, las aguas subterráneas y las superficiales se gestionan de forma independiente. Además, las políticas y actividades ajenas al sector del agua (sobre todo las relacionadas con la tierra, la alimentación y la agricultura, la minería y el sector energético) afectan a la demanda de aguas superficiales y subterráneas, repercuten en la infiltración y la recarga, y pueden crear fuentes de contaminación.

Es necesario prestar especial atención a la gestión conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos y al potencial de las soluciones "basadas en la naturaleza" (Van der Gun, 2020). Comprender las interacciones entre las aguas superficiales y las subterráneas, cuantificando los flujos de intercambio, las direcciones y las interacciones de la calidad del agua, es vital para garantizar que la gestión logre los resultados previstos. La gestión del suelo y de los ecosistemas, coordinada con la gestión de las aguas subterráneas, puede mejorar el almacenamiento y la retención, proteger la calidad del agua o, por el contrario, afectar negativamente a los sistemas de aguas subterráneas. Por consiguiente, es esencial la coherencia de las políticas y la consideración de toda la gama de usuarios, usos e impactos.

Debido a la naturaleza evolutiva de la gestión de las aguas subterráneas, existen múltiples instituciones, políticas y herramientas de gestión al mismo tiempo. Esto puede llevar a ineficiencias y contradicciones. La planificación de la gestión de las aguas subterráneas (véase el capítulo 10) proporciona un mecanismo de coordinación entre los numerosos actores que participan en la gestión de las aguas subterráneas, y de integración y sinergia entre las múltiples políticas y herramientas utilizadas (Foster et al., 2015; Gage y Milman, 2020).

La integración con la gestión medioambiental, con la gestión del uso del suelo y con la gestión del espacio y los recursos del subsuelo son cuestiones importantes dentro del ámbito de la gestión integrada

La integración con la gestión medioambiental, con la gestión del uso del suelo y con la gestión del espacio y los recursos del subsuelo son cuestiones importantes dentro del ámbito de la gestión integrada. El MAR es un ejemplo de enfoque integrado (véase el cuadro 7.1).

MAR, también llamada recarga artificial, implica el uso de infraestructuras de ingeniería o naturales para aumentar la infiltración en un sistema acuífero (Dillon et al., 2019). Las tecnologías como el MAR son importantes para asegurar los recursos hídricos contra la sequía y la intrusión de agua salada, así como para aumentar el abastecimiento de agua, mejorar la calidad del agua, mantener la estructura y la calidad del acuífero y sostener los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. MAR permite reponer los acuíferos como complemento de las presas de almacenamiento y ofrece una alternativa rentable que minimiza la evaporación y el impacto medioambiental. MAR también puede utilizarse para retener las aguas pluviales urbanas no aprovechadas (cuadro 11.3) y el agua reciclada para su uso productivo cuando sea necesario. A escala de la cuenca hidrográfica, el MAR puede utilizarse para mantener los caudales y la disponibilidad de agua en el medio ambiente, creando rezagos en las descargas de agua a un arroyo (Page et al., 2018).

La recarga artificial consta de dos componentes principales: i) la interceptación del agua (normalmente agua superficial), y ii) los mecanismos que permiten la infiltración de esta agua interceptada para que entre en el acuífero. Cualquier forma particular de recarga artificial combina ambos componentes; las disposiciones técnicas a veces se centran en el primer componente (por ejemplo, presas de recarga, tomas de agua de un río), y en otros casos en el segundo (por ejemplo, técnicas de esparcimiento con estanques o cuencas, pozos de inyección); y ocasionalmente una mezcla de los dos (por ejemplo, esparcimiento en canales, infiltración inducida en las orillas). Un diseño correcto del sistema MAR y un funcionamiento y mantenimiento adecuados pueden mejorar el rendimiento cualitativo y cuantitativo del sistema.

Hay muchos ejemplos de buenas prácticas de aplicaciones de MAR. El Portal MAR[42], al que se puede acceder a través del Sistema Mundial de Información sobre Aguas Subterráneas del Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas, contiene información detallada sobre unos 1 200 emplazamientos MAR de unos 50 países de todo el mundo, así como mapas regionales de idoneidad MAR. Dillon et al. (2019) presentan una visión general de la difusión de las técnicas de MAR en todo el mundo durante los últimos 60 años.

11.6 Conclusiones

La gestión de las aguas subterráneas presenta muchos retos y oportunidades. Para que las aguas subterráneas se gestionen eficazmente, hay que tener en cuenta los vínculos entre las aguas subterráneas, la sociedad (incluido el crecimiento de la población), el medio ambiente y los ecosistemas, y el cambio climático. Las políticas y actividades ajenas al sector del agua influyen en la demanda de aguas subterráneas, así como en la infiltración y la recarga, y también pueden crear fuentes de contaminación. La gestión de las aguas subterráneas también tiene implicaciones para la sociedad, el medio ambiente y la economía.

[42] Para más información, consulte ggis.un-igrac.org/view/marportal.

Cuadro 11.3 Recogida de aguas pluviales para el almacenamiento y la recuperación de acuíferos: ejemplo de un proyecto MAR, área de Adelaida (Australia)

En Adelaida (Australia), el escurrimiento de las aguas pluviales se recoge en pequeños humedales construidos que tienen una funcionalidad de retención y tratamiento, proporcionando biodiversidad y formando un destino recreativo. Durante varios días de retención en los humedales, se eliminan los contaminantes y patógenos. A continuación, el agua se inyecta en el acuífero terciario profundo mediante pozos de almacenamiento y recuperación del acuífero (ASR). Las aguas pluviales recogidas mediante el almacenamiento y la recuperación de acuíferos representan aproximadamente el 10 % del abastecimiento de agua de Adelaida. En 2017, estaban en funcionamiento 58 sistemas MAR, con una capacidad de recarga combinada de más de 20 Mm^3 al año.

Los regímenes de MAR tienen un bajo coste y una gran aceptación por parte del público.

Históricamente, las aguas subterráneas no han recibido la atención de los gestores hasta que el problema se ha ampliado hasta el punto de hacerse visible. Por lo tanto, la gestión ha sido reactiva. Se necesitan enfoques proactivos para la gestión de las aguas subterráneas a fin de evitar la degradación y el agotamiento del recurso.

La gestión de las aguas subterráneas debe tener en cuenta simultáneamente las múltiples dimensiones de los sistemas de aguas subterráneas: el almacenamiento, los flujos, la calidad y el comportamiento de las aguas subterráneas, así como la estructura y las propiedades del propio acuífero.

La gestión de las aguas subterráneas debe realizarse a todos los niveles. Si bien los gobiernos y sus organismos autorizados pueden tomar la iniciativa en la coordinación general de la gestión de las aguas subterráneas, también pueden desempeñar un papel importante las comunidades, las compañías de agua, las industrias, los agricultores y otras personas.

La escasez de datos y conocimientos sigue siendo un impedimento clave para la gestión de las aguas subterráneas basada en pruebas. El seguimiento, las evaluaciones y las investigaciones son fundamentales (véase el capítulo 9).

Para que la gestión de las aguas subterráneas sea eficaz y tenga éxito, se necesita capacidad y habilidad (tanto de personas como de conocimientos). Educar a los jóvenes y garantizar que sus voces sean escuchadas es vital para el éxito futuro de la gestión de las aguas subterráneas a nivel mundial. Se necesitan programas científicos y educativos sobre aguas subterráneas bien dotados para formar a los gestores, y la gobernanza y la política deben crear el entorno propicio para la gestión. Desarrollar y mantener la gestión de las aguas subterráneas requiere un importante apoyo financiero y político por parte de los gobiernos, así como mandatos adecuados para los organismos que desempeñarán el papel principal.

Capítulo 12

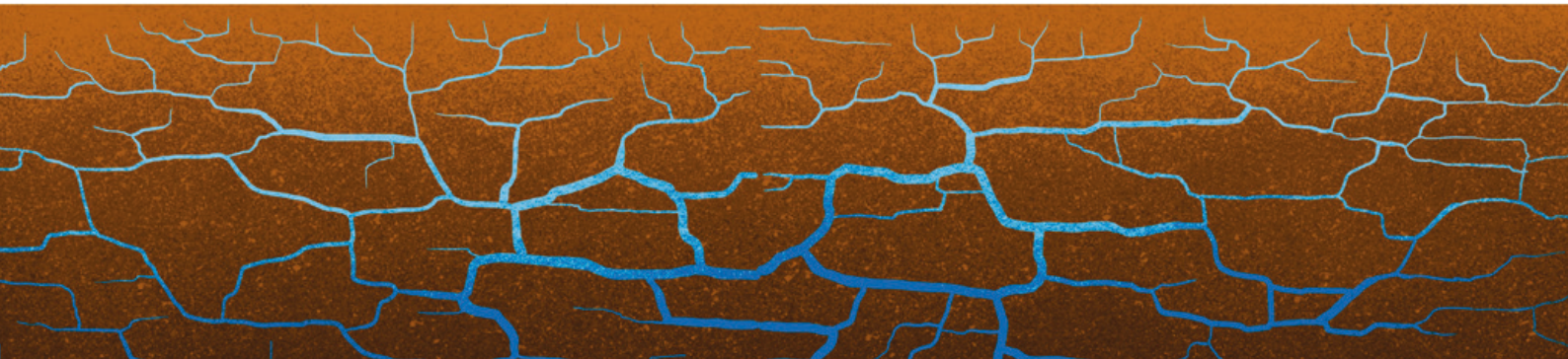
Acuíferos transfronterizos

UNESCO-PHI
Raya Marina Stephan, Alice Aureli y Aurélien Dumont

CEPE
Annukka Lipponen* **y Sarah Tiefenauer-Linardon**

Con contribuciones de Christina Fraser (IGRAC), Alfonso Rivera y Shammy Puri (AIH), Stefano Burchi (AIDA), Gabriel Eckstein (Texas A&M University School of Law), Christian Brethaut (Universidad de Ginebra), Ziad Khayat (CESPAO), Karen Villholth (IWMI), Lesha Witmer (WfWP), Renee Martin-Nagle (Environmental Law Institute), Anita Milman (Universidad de Massachusetts), Francesco Sindico (Universidad de Strathclyde) y James Dalton (UICN)

* con el Ministerio de Agricultura y Silvicultura de Finlandia en el momento de la publicación.



12.1 Introducción

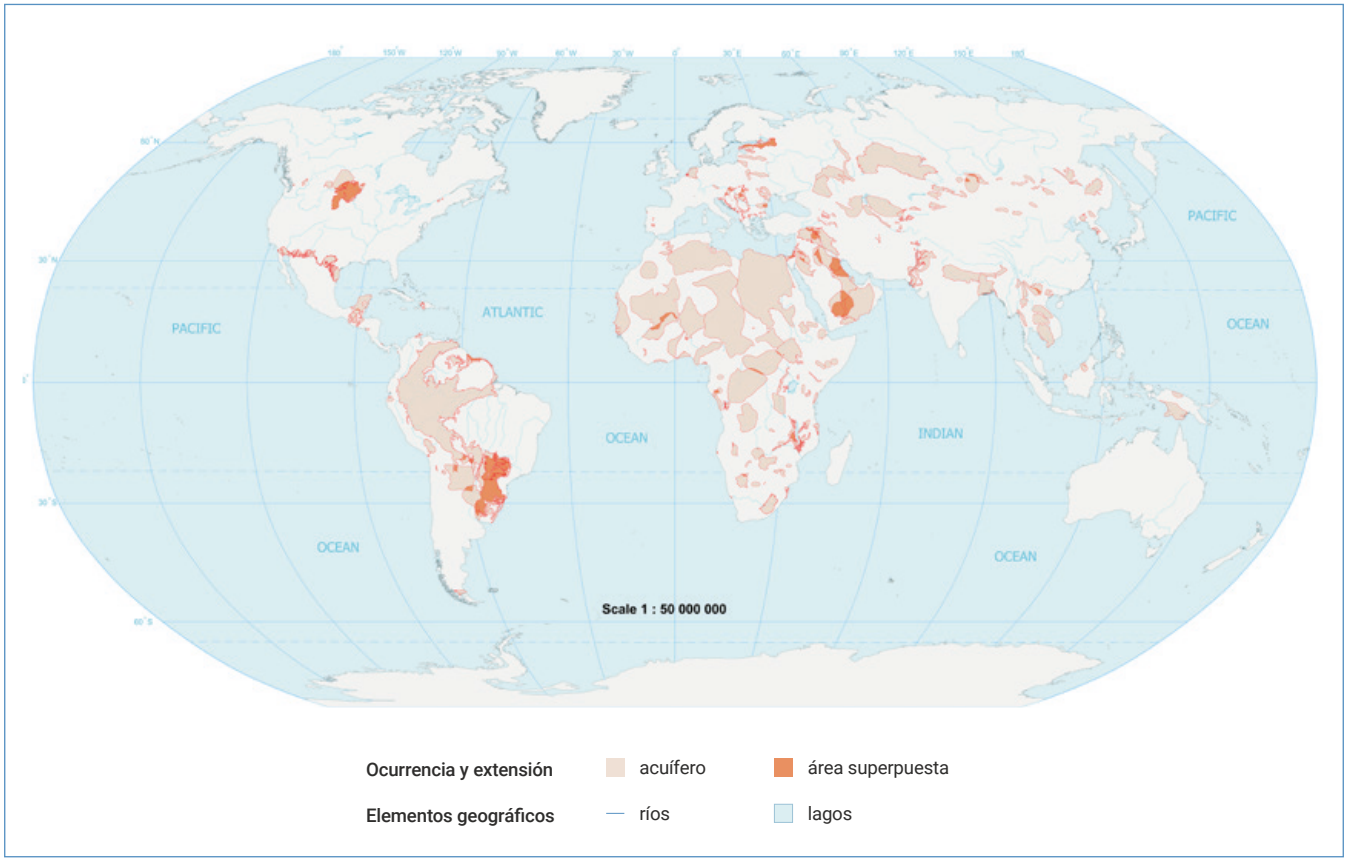
Este capítulo ofrece una visión general de la situación de los acuíferos transfronterizos y de la cooperación relacionada con los recursos hídricos subterráneos compartidos, destacando la complejidad de la evaluación, el análisis y la gestión de estos sistemas. Resume los principales retos relacionados con los acuíferos transfronterizos y la necesidad de una gestión más global e integrada, que incluya aspectos técnicos, jurídicos y organizativos, así como de formación y cooperación.

12.2 Conocimiento actual de los acuíferos transfronterizos

Cuando un acuífero o sistema acuífero se denomina "transfronterizo", significa que partes del mismo están situadas en diferentes Estados (AGNU, 2009). Los acuíferos transfronterizos incluyen una vía natural subterránea de flujo de agua subterránea, que cruza una frontera internacional, de manera que el agua puede fluir de un lado de la frontera al otro (UNESCO, 2001). El primer inventario mundial de acuíferos transfronterizos fue realizado por el PHI de la UNESCO, que lanzó la Iniciativa sobre la Gestión de Recursos de Acuíferos Transnacionales (ISARM) en el año 2000 (cuadro 12.1). En la figura 12.1 se muestra la distribución mundial actualmente conocida de los acuíferos transfronterizos, basada en un inventario de proyectos e iniciativas mundiales y regionales[43]. La primera evaluación global de referencia de 300 de los mayores acuíferos transfronterizos del mundo fue realizada por el Programa de Evaluación de Aguas Transfronterizas (UNESCO-PHI/PNUMA, 2016).

Este programa describió los acuíferos transfronterizos en términos de dependencia humana del recurso. Elaboró escenarios basados en las presiones demográficas e identificó futuros focos de tensión en el África Subsahariana, parte de Asia Oriental y América Central. La delimitación exacta de un gran número de acuíferos transfronterizos sigue siendo incompleta, especialmente a nivel local, donde los acuíferos transfronterizos pueden ser pequeños pero vitales para los medios de vida de las comunidades (Eckstein, 2013; Fraser et al., 2020).

Figura 12.1 Acuíferos transfronterizos del mundo



Fuente: IGRAC (2021). IGRAC, diciembre de 2021. Reconocimiento No Comercial Compartir Igual (CC BY-NC-SA 4.0).

[43] Incluyendo la primera y segunda evaluación de la CEPE de los acuíferos transfronterizos situados en el sureste de Europa, el Cáucaso y Asia Central (CEPE, 2007, 2011); Inventario de recursos hídricos compartidos en Asia Occidental (CESPAO/BGR, 2013).

Cuadro 12.1 Iniciativa Internacional para la Gestión de los Recursos Acuíferos Compartidos

En el año 2000, el Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO puso en marcha la Iniciativa sobre la Gestión de Recursos de Acuíferos Transnacionales (ISARM) (Resolución XIV-12 - PHI de la UNESCO, 2000), cuyo objetivo es preparar un inventario mundial de los acuíferos transfronterizos y desarrollar y apoyar la cooperación entre países mediante la mejora del conocimiento de los acuíferos transfronterizos (TBA). La iniciativa llevó a cabo estudios regionales destinados a delimitar los acuíferos, así como a evaluar y analizar los aspectos hidrogeológicos, jurídicos, socioeconómicos, institucionales y medioambientales. Los inventarios regionales revelaron que algunos de los acuíferos más importantes de África y América Latina son transfronterizos (UNESCO-PHI, 2009).

La iniciativa ha contribuido a crear una base de conocimientos y ha proporcionado orientación para la cooperación de los países en materia de TBA. También se ha logrado un avance sustancial en lo que respecta al componente jurídico. El PHI de la UNESCO asistió a la Comisión de Derecho Internacional (CDI) en la preparación de un conjunto de 19 proyectos de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos que se anexan y mencionan en varias resoluciones de la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU).

Como resultado de las actividades del ISARM, se han puesto en marcha proyectos en diferentes regiones para ayudar a los países a establecer mecanismos de cooperación para la gestión de las TBA.

12.3 Desafíos específicos de los acuíferos transfronterizos

En general, los factores de estrés son los mismos para los acuíferos nacionales y los transfronterizos. Las fronteras políticas añaden retos específicos. Las acciones sobre el acuífero en un país pueden tener un impacto significativo en el otro lado de la frontera. La figura 12.2 ilustra un ejemplo sencillo de los efectos que puede tener la extracción de agua subterránea de un acuífero transfronterizo. Una fuerte extracción en un lado de la frontera puede provocar el descenso de la capa freática en el país vecino. Incluso a veces puede provocar la inversión de los flujos de agua subterránea a través de la frontera. La extracción de aguas subterráneas también puede afectar a los sistemas que están conectados hidráulicamente con el acuífero transfronterizo, por ejemplo, reduciendo los caudales de los ríos o afectando a los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. Además, la contaminación del acuífero de un lado de la frontera puede fluir a través de las fronteras políticas, causando impactos potencialmente graves para los estados vecinos y complicando cualquier esfuerzo de remediación.

La extensión de los acuíferos transfronterizos puede variar mucho, desde unos pocos hasta más de un millón de kilómetros cuadrados, y desde decenas hasta varios miles de metros de profundidad. Esto plantea la cuestión de si la gestión y el seguimiento conjuntos deben abarcar necesariamente toda la extensión de un acuífero transfronterizo, o si deben concentrarse en áreas específicas en las que es más probable que se produzcan impactos transfronterizos. Un posible enfoque de este dilema se encuentra en el acuerdo sobre el acuífero Saq-Disi (compartido por Jordania y la Arabia Saudita), que contempla el establecimiento de áreas de protección alrededor de la frontera.

La gestión cooperativa de los acuíferos transfronterizos puede ser compleja debido a los obstáculos existentes en los países que comparten el acuífero, que pueden ser (AFD, 2011):

- falta de percepción del carácter transfronterizo entre las autoridades, los gestores y las poblaciones afectadas;
- ausencia de un marco jurídico e institucional específico;
- diferentes enfoques y prioridades de gestión y gobernanza;
- falta de voluntad política para la cooperación y la aplicación de una gestión a largo plazo;

La integración de las consideraciones de género en la cooperación transfronteriza representa un elemento para crear oportunidades de una gestión socialmente más equitativa de los recursos hídricos subterráneos transfronterizos

- tensiones entre los países, reparto desigual de los recursos, disminución de la cantidad y calidad de las aguas subterráneas y diferentes capacidades de gestión en los contextos social, económico y medioambiental de los países que comparten el acuífero;
- conocimiento fragmentado de los acuíferos;
- no se comparten datos precisos (véase la tabla 12.1);
- financiación insuficiente;
- falta de conocimientos y capacidad para desarrollar y ejecutar estudios científicos/técnicos, y para crear instituciones formales; y
- diferentes lenguas habladas, o diferentes orientaciones culturales o políticas, a ambos lados de la frontera.

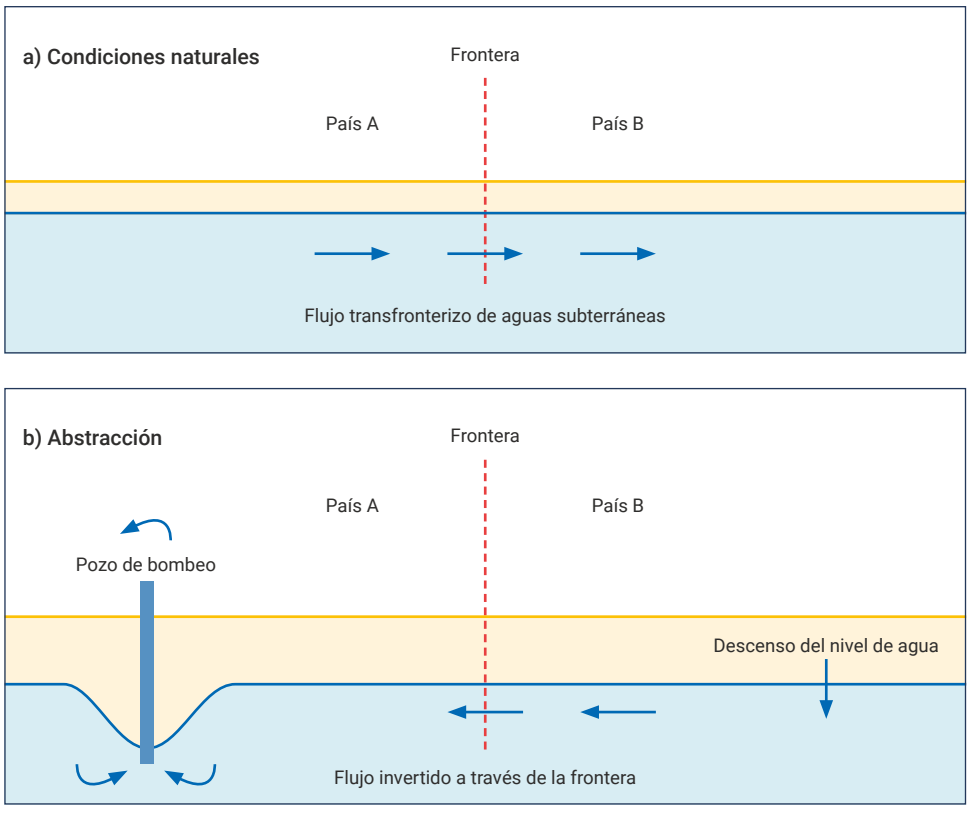
Además, la integración de las consideraciones de género en la cooperación transfronteriza representa un elemento para crear oportunidades de una gestión socialmente más equitativa de los recursos hídricos subterráneos transfronterizos. Los programas de formación y desarrollo de capacidades son fundamentales para capacitar al personal técnico y administrativo a fin de que comprenda los diferentes retos que conlleva la evaluación y la gestión de los acuíferos transfronterizos (Nijsten et al., 2016).

El intercambio de datos representa el primer paso en la cooperación entre países vecinos, ya que es esencial para llegar a un acuerdo sobre un modelo conceptual fiable del acuífero, que es a su vez un requisito previo para la formulación de planes de gestión.

Cuando faltan datos, o los Estados no están dispuestos a compartirlos, esto puede obstaculizar la gestión sostenible de los sistemas de aguas subterráneas transfronterizas.

Figura 12.2

El bombeo de agua subterránea de un pozo en el país A puede tener un impacto en la parte del acuífero del país B



Fuente: Adaptado de Fraser et al. (2018, fig. 6, p. 45).

La gestión de los acuíferos transfronterizos suele adolecer de falta de voluntad institucional y de recursos insuficientes para recabar la información necesaria (AFD, 2011). Aunque los datos globales pueden iluminar las tendencias generales, se requiere una comprensión más detallada a nivel regional y local para la toma de decisiones conjunta y la gestión de los acuíferos transfronterizos (IGRAC/UNESCO-PHI, 2015; Fraser et al., 2018; Rivera, 2015, 2020).

La gestión y el intercambio de datos dentro de los acuíferos transfronterizos pueden apoyarse tanto en los sistemas de gestión de la información como en las plataformas basadas en la web que ayudan a la recopilación, el almacenamiento, el procesamiento, la visualización y el intercambio de datos (IGRAC/PHI de la UNESCO, 2015), como el sistema mundial de información sobre las aguas subterráneas (GGIS) (IGRAC, s.f.). Los avances tecnológicos, desde las observaciones desde el espacio hasta la telemetría, combinados con la ciencia ciudadana, pueden facilitar la pesada carga y el coste de la recogida de datos (véase el capítulo 9).

Los requisitos de datos e información sugeridos en la tabla 12.1 se aplican tanto a los acuíferos nacionales como a los transfronterizos, excepto los componentes legales e institucionales. Los datos que se han recogido y analizado a nivel nacional, utilizando métodos y enfoques diferentes, pueden necesitar ser armonizados antes de que puedan ser utilizados a través de las fronteras.

Un componente vital de la gestión de los acuíferos transfronterizos es el seguimiento, que debe incluir la observación de series temporales de los niveles y la calidad de las aguas subterráneas (IGRAC/UNESCO-PHI, 2015). Para que el seguimiento sea eficaz, los datos

Tabla 12.1

Datos e información necesarios para evaluar y gestionar un acuífero transfronterizo

Hidrogeología, fisiografía y clima	
Geometría del acuífero (límite, tipo, profundidad del nivel freático, espesor del acuífero)	Clima (temperatura, precipitación, evapotranspiración)
Identificación de la recarga y descarga del acuífero	Uso del suelo
Litología y tipo de tierra	Topografía
Porosidad, permeabilidad	Red de aguas superficiales (ríos, lagos)
Transmisividad y conductividad vertical	Volumen de aguas subterráneas
Niveles de agua subterránea y dirección del flujo	Sistemas de flujo de aguas subterráneas
Medio ambiente	
Calidad de las aguas subterráneas	Ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas
Fuentes de contaminación	Control de residuos sólidos y aguas residuales
Socio-Económico	
Población	Tasas de extracción/densidad de pozos
Campos de refugiados/desplazados internos (IDP)	Dependencia humana de las aguas subterráneas
Uso de las aguas subterráneas	Uso de aguas superficiales
Jurídico e institucional	
Marco jurídico transfronterizo	Marco jurídico interno
Marco institucional transfronterizo	Marco institucional nacional
Propiedad de las aguas subterráneas	Planificación y protección de los recursos hídricos
Control de la extracción de aguas subterráneas	Control de la contaminación de las aguas subterráneas
Aplicación de la legislación	Instituciones del agua

Fuentes:
Basado en Rivera (2015, 2020) y IGRAC/UNESCO-PHI (2015).

deben coordinarse, armonizarse y compartirse entre los Estados del acuífero (SADC-GMI/IGRAC/IGS, 2019b). En vista de las complejidades de la evaluación y el seguimiento de los acuíferos transfronterizos, se han elaborado directrices para ayudar a los Estados del acuífero y a las partes interesadas en el proceso (por ejemplo, el Grupo de Trabajo de la CEPE sobre Seguimiento y Evaluación, 2000; AFD, 2011; IGRAC/UNESCO-PHI, 2015).

12.4 Aspectos jurídicos e institucionales internacionales

El derecho internacional del agua se desarrolló inicialmente para las aguas superficiales. Las consideraciones sobre las aguas subterráneas comenzaron progresivamente con la creciente conciencia de la importancia de los acuíferos transfronterizos. El Convenio sobre la protección y el uso de los cursos de agua transfronterizos y los lagos internacionales[44] (Convenio del Agua - CEPE, 1992) abarca todas las masas de agua superficiales o subterráneas que marcan, cruzan o están situadas en las fronteras entre dos o más Estados. Ha servido de base para varios acuerdos bilaterales y multilaterales (CEPE, 2013). La Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación (Naciones Unidas, 1997)[45] considera las aguas subterráneas transfronterizas solo cuando están conectadas a un sistema internacional de aguas superficiales y fluyen hacia la misma desembocadura. No considera las características específicas de los diversos tipos de acuíferos.

Para llenar este vacío, la Comisión de Derecho Internacional (CDI) preparó un instrumento de derecho internacional compuesto por 19 proyectos de artículos que contemplan todos los tipos de características de los acuíferos (Stephan, 2011). Los artículos son el tema de cinco resoluciones no vinculantes de la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU)[46].

La AGNU recomienda el proyecto de artículos a la atención de los gobiernos, "*como orientación para los acuerdos y arreglos bilaterales o regionales para la gestión adecuada de los acuíferos transfronterizos*" (AGNU, 2013, 2016, 2019). Todos los tipos de acuíferos transfronterizos, incluidos los acuíferos no recargables, están cubiertos en el ámbito de este proyecto de artículos. También tienen en cuenta el uso del suelo, ya que se aplican a "*otras actividades que tengan o puedan tener un impacto*" (art. 1§b). El proyecto de artículos ha adaptado los principios básicos del derecho internacional del agua a las características de los acuíferos. Incluyen consideraciones relacionadas con los acuíferos no recargables, la gestión y el seguimiento de las aguas subterráneas y la protección de los ecosistemas y de las zonas de recarga y descarga de los acuíferos. En 2012, la Reunión de las Partes del Convenio del Agua adoptó las Disposiciones Modelo sobre Aguas Subterráneas Transfronterizas (CEPE, 2014), que se basan en el proyecto de artículos, con el objetivo de proporcionar orientación para la aplicación de los principios del Convenio a las aguas subterráneas transfronterizas, y para mejorar la cooperación en la gestión integrada de las masas de agua superficiales y subterráneas transfronterizas.

12.5 Cooperación en materia de acuíferos transfronterizos

Las relaciones transfronterizas pueden implicar diferentes grados de cooperación.

Hay muy pocos casos en el mundo de acuerdos interestatales sobre acuíferos transfronterizos en vigor (Burchi, 2018b): el acuífero ginebrino (Francia, Suiza), el Sistema Acuífero del Sáhara Noroccidental (Argelia, Libia, Túnez), el Sistema Acuífero de Arenisca de Nubia (Chad, Egipto, Libia, Sudán), el Acuífero Guaraní (Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay), el Acuífero Saq-Disi (Jordania, Arabia Saudita) y los Calcaires Carbonifères (Bélgica, Francia).

---

[44] En vigor desde 1996, 44 Partes.

[45] En vigor desde 2014, 37 Partes.

[46] Estas resoluciones son 63/124, 66/104, 68/118, 71/150 y 74/193 (AGNU, 2009, 2012, 2013, 2016, 2019). El proyecto de artículos figura como anexo a las resoluciones 63/124 y 68/118.

Con frecuencia, los acuíferos transfronterizos forman parte de un acuerdo más amplio de cooperación en materia de aguas desarrollado para las cuencas fluviales transfronterizas. Estos acuerdos más amplios pueden aplicarse a las aguas subterráneas transfronterizas en diferentes grados. No consideran necesariamente el acuífero en toda su extensión, ya que las extensiones areales de las cuencas de aguas superficiales no suelen coincidir con los sistemas de aguas subterráneas subyacentes.

Existen iniciativas de cooperación científica en todo el mundo en el marco de proyectos técnicos sobre acuíferos transfronterizos. Dichas iniciativas pueden tener diversos alcances, algunas de ellas destinadas a la evaluación científica conjunta, mientras que otras abordan la gestión de cuestiones específicas. En estos casos, el papel de las organizaciones regionales e internacionales y de los donantes puede ser fundamental, sobre todo cuando los países afectados no están a la par en cuanto a capacidad, conocimientos, información y confianza. El estudio del Acuífero Kárstico Dinárico, uno de los mayores sistemas acuíferos kársticos del mundo, es un ejemplo de colaboración entre países. El proyecto facilitó el establecimiento de una cooperación técnica que se tradujo en compromisos políticos para la adopción de medidas de gestión (cuadro 12.2).

Hasta ahora, las experiencias de creación y puesta en marcha de una institución plenamente capacitada y funcional encargada de la gobernanza de un sistema acuífero transfronterizo han sido limitadas. Recientemente se ha avanzado en el establecimiento de mecanismos de consulta dentro de las instituciones existentes, como en el caso del acuífero de Stampriet (cuadro 12.3), compartido por Botswana, Namibia y Sudáfrica. La experiencia sugiere que los acuerdos institucionales formales favorables para la cooperación transfronteriza pueden lograrse cuando los países vecinos primero construyen la confianza a través de la identificación conjunta de necesidades e intereses, y llevando a cabo evaluaciones multidisciplinarias del acuífero que comparten.

Mediante la inclusión de la meta 6.5 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible ha sensibilizado sobre la necesidad de "*aplicar la gestión integrada de los recursos hídricos [GIRH] a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda*". El indicador 6.5.2 de los ODS supervisa el progreso hacia la meta 6.5 de los ODS evaluando la proporción del área de la cuenca transfronteriza (ríos, lagos y acuíferos) cubierta por un acuerdo operativo para la cooperación en materia de agua. El indicador permite evaluar si los acuíferos transfronterizos están cubiertos por sus propios acuerdos específicos o si están cubiertos por acuerdos de cuenca fluvial y/o lacustre o por acuerdos bilaterales más amplios.

Cuadro 12.2 Protección y uso del Sistema Acuífero Transfronterizo del Karst Dinárico (DIKTAS)

Algunos de los países que comparten el Sistema Acuífero Transfronterizo del Karst Dinárico (Albania, Bosnia y Herzegovina, Croacia y Montenegro) iniciaron en 2010 un esfuerzo de colaboración para facilitar su gestión equitativa y sostenible del sistema acuífero, y para proteger los ecosistemas únicos que dependen de él. El proyecto mejoró el conocimiento de los acuíferos kársticos del área y la coordinación entre países, organismos y otras partes interesadas. Al ser el primer gran proyecto mundial que aborda los acuíferos kársticos transfronterizos, se ha aprovechado para introducir nuevos principios de gestión integrada en acuíferos kársticos compartidos de tal magnitud. El proyecto identificó las acciones de gestión regional, como las medidas relativas a la política y la legislación, el seguimiento y la gestión de datos, la formación y la sensibilización, así como las inversiones necesarias.

Puede encontrar más información sobre el proyecto DITKAS aquí: diktas.iwlearn.org/.

Cuadro 12.3 El mecanismo de cooperación multinacional de Stampriet: el primer mecanismo de cooperación en materia de acuíferos transfronterizos anidado en un organismo de cuenca.

El Sistema Acuífero Transfronterizo Stampriet (STAS) se encuentra en su totalidad en la cuenca del río Orange-Senqu, en un área compartida por Botswana, Namibia y Sudáfrica. En 2017, los países que comparten el STAS acordaron establecer un Mecanismo de Cooperación Multipaís, anidado en la estructura de la Comisión del Río Orange-Senqu (ORASECOM), que considera la gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas. El mecanismo sentó las bases para institucionalizar la cooperación para la gobernanza y gestión conjunta del acuífero. El acuífero de Stampriet es el primer ejemplo del establecimiento de un mecanismo de coordinación de acuíferos transfronterizos en la región del sur de África.

La falta de conocimiento de las aguas subterráneas ha resultado ser una limitación clave en el cálculo del valor global del indicador 6.5.2 de los ODS. Treinta y cinco de los países que informaron en 2020 no pudieron presentar un valor de indicador para sus acuíferos, y la falta de datos sobre aguas subterráneas puede haber disuadido a otros de presentar informes nacionales. A su vez, los esfuerzos de los países por recopilar información y datos básicos sobre los acuíferos (por ejemplo, la delimitación de los acuíferos transfronterizos) pueden ser un primer paso importante para la concienciación y el progreso de la cooperación en materia de acuíferos transfronterizos. El número de países que proporcionaron información sobre acuerdos de cooperación relacionados con los acuíferos en su informe ha aumentado en 2020 en comparación con 2017 (tabla 12.2). Mediante la elaboración de los informes nacionales a través de un proceso consultivo, a nivel nacional o con los vecinos, los países pudieron establecer nuevos programas de cooperación, como el relativo al acuífero senegalés-mauritano (cuadro 12.4).

12.6 Beneficios de la cooperación transfronteriza

La cooperación transfronteriza en materia de acuíferos tiene el potencial de generar importantes beneficios. Por ejemplo, en el caso del Sistema Acuífero del Noroeste del Sáhara, los países que comparten el acuífero persiguen beneficios que incluyen aspectos sociales, económicos y ambientales (CEPE, 2015). Un ejemplo podría ser la resiliencia de las comunidades locales, que se incrementa a través de la mejora de la capacidad y el aprendizaje mutuo para resolver los desafíos comunes relacionados con la escasez y la seguridad de los recursos naturales, la seguridad alimentaria y el cambio climático; así como la preservación de los ecosistemas sensibles de los humedales (Mecanismo de Consulta NWSAS, 2020).

El reparto de los beneficios proporcionados por el uso de las aguas subterráneas representa una faceta importante de la hidrodiplomacia (Grech-Madin et al., 2018), un proceso que puede aplicarse en diferentes etapas de las interacciones de los actores (desde la prevención de las tensiones hasta la contribución a la resolución efectiva de los conflictos) y niveles de intervención (desde la dinámica de poder local hasta la internacional) (Vij et al., 2020; Bréthaut et al., 2019).

Tabla 12.2 Resultados resumidos del seguimiento global Indicador 6.5.2, 2017 y 2020

	2017	2020
Países que comparten cuencas transfronterizas (ríos, lagos y acuíferos)	153	153
Países que han informado sobre el estado de sus acuerdos de cooperación transfronteriza	107	129
Países que han informado de que el 100 % del área de su cuenca transfronteriza está cubierta por acuerdos de cooperación operativos	17	24
Países que han informado sobre la existencia de al menos un acuerdo de cooperación operativo específico para un acuífero	5	12
Países que han informado sobre al menos un acuífero cubierto por un acuerdo operativo de cuenca o un acuerdo bilateral	36	47

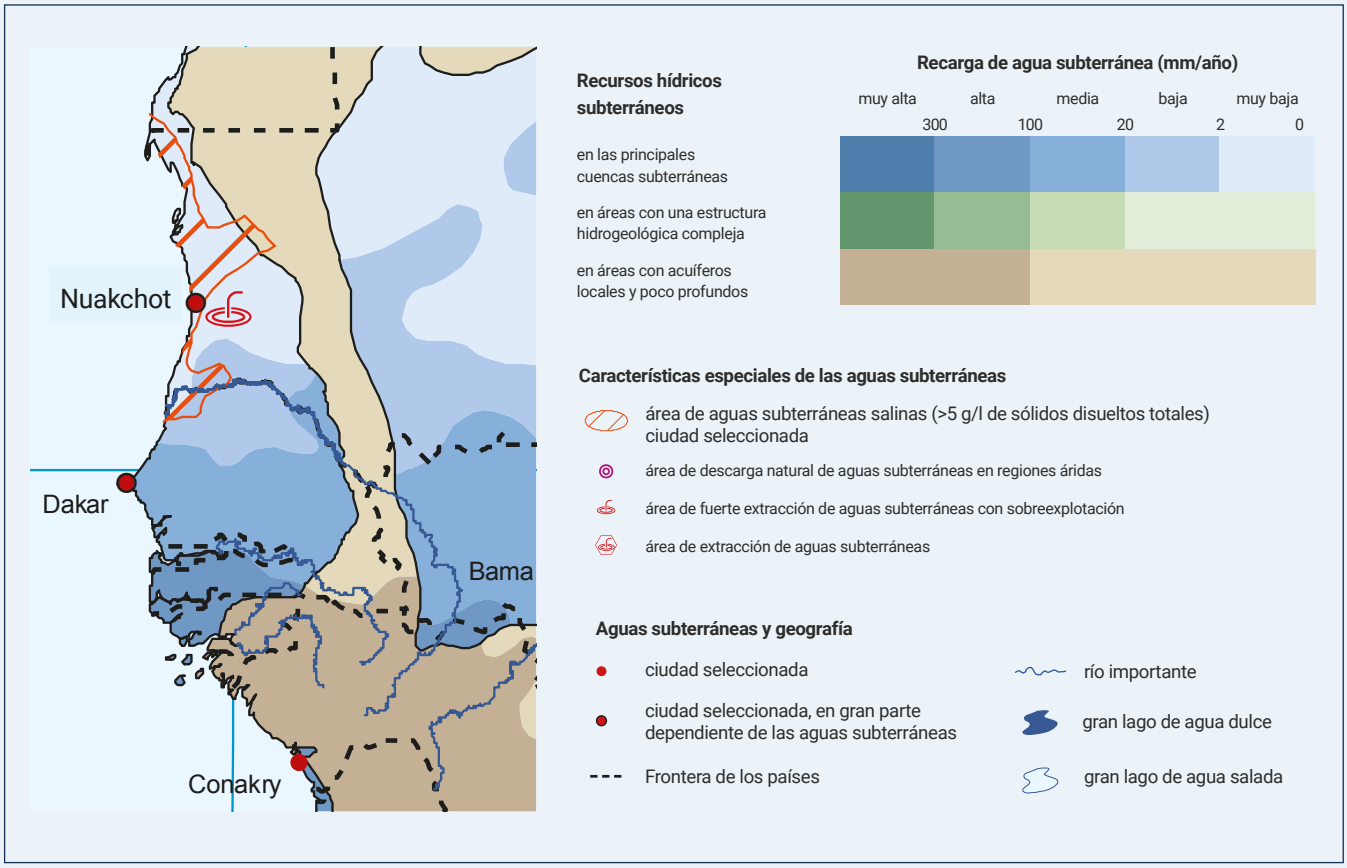
Fuente: Basado en CEPE/UNESCO (2021).

Cuadro 12.4 Hacia la cooperación en la cuenca del acuífero senegalés-mauritano para promover la paz y la resiliencia entre los Estados

La Cuenca Acuífera Senegalo-Mauritana (SMAB), compartida por Gambia, Guinea-Bissau, Mauritania y el Senegal, se extiende a lo largo de unos 1 300 km y subyace a una superficie de 331 450 km² con una población estimada de más de 15 millones de habitantes. El recurso está bajo presión debido a la creciente demanda de agua causada por el crecimiento de la población, la rápida urbanización y el desarrollo de la agricultura para la autosuficiencia alimentaria.

El primer seguimiento del indicador 6.5.2 de los ODS puso de manifiesto que este acuífero transfronterizo aún no es objeto de un acuerdo o convenio de cooperación bilateral o multilateral. Los Estados ribereños han iniciado conversaciones con vistas a desarrollar una colaboración transfronteriza. En mayo de 2020 se creó un Grupo de Trabajo Regional (GTR) para la Cooperación Transfronteriza en el SMAB, compuesto por los Estados, así como por los organismos de cuenca transfronterizos existentes en la cuenca del acuífero Senegal-Mauritano, a saber, la Organización para el Desarrollo del Río Gambia y la Autoridad de Desarrollo de la Cuenca del Río Senegal. El GTR tiene el mandato de proporcionar apoyo y asesoramiento para establecer una cooperación transfronteriza para la gestión sostenible concertada del SMAB. El GTR participa en la concepción del proyecto y en el plan de acción para cumplir este mandato, con el apoyo del Centro del Agua de Ginebra, de la Secretaría del Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales, proporcionada por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE), y del Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (CIEAS).

Los ministros de Gambia, Guinea-Bissau, Mauritania y el Senegal firmaron, en septiembre de 2021, una declaración sobre el establecimiento de una cooperación institucional transfronteriza en torno a la cuenca del acuífero Senegal-Mauritano. Los ministros también acordaron iniciar las conversaciones para la creación de un mecanismo que garantice la gestión concertada y sostenible de sus recursos hídricos subterráneos compartidos. La experiencia de la cooperación en la cuenca del acuífero entre el Senegal y Mauritania ofrece un ejemplo de cómo el proceso de presentación de informes sobre los ODS puede ayudar a identificar las lagunas en la cooperación y conducir a mejoras concretas.



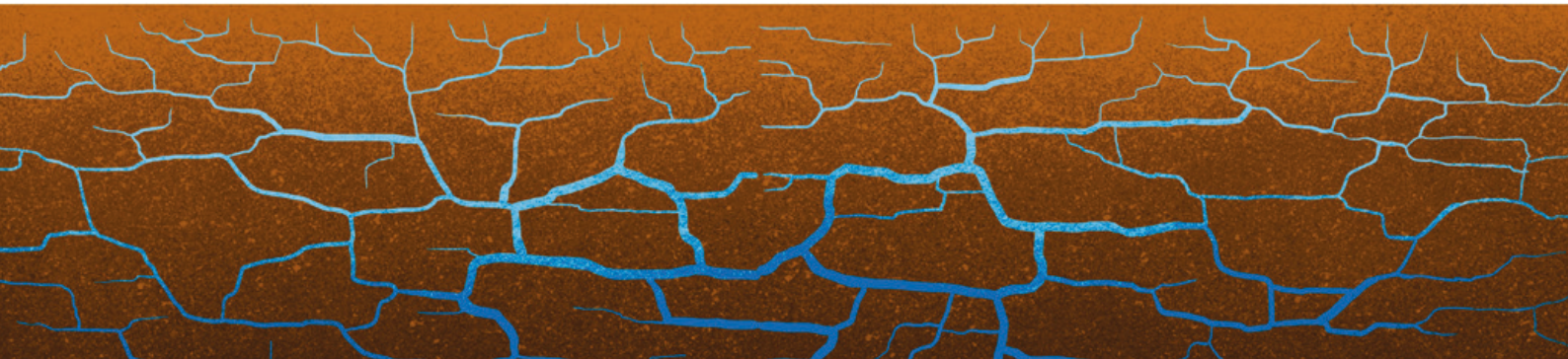
Fuente: Adaptado de BGR/UNESCO (2008).

Capítulo 13

Financiación para la sostenibilidad

Banco Mundial
Diego Rodriguez y Anna Delgado

Con contribuciones de Francois Bertone, Lucy Lytton y Stuti Sharma (Banco Mundial), Laureen Missaire (CDP) y Alvar Closas (Departamento de Planificación, Industria y Medio Ambiente de Nueva Gales del Sur, Australia)



13.1 Financiación disponible y necesaria actualmente

13.1.1 El nivel actual de inversión es insuficiente para alcanzar las metas del ODS 6

Las estimaciones de las inversiones necesarias para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 varían debido a la falta de datos precisos y fiables, pero existe un claro acuerdo (Hutton y Varughese, 2016; WWC, 2018; OCDE, 2019b) de que el nivel actual de inversión es insuficiente para alcanzar las metas acordadas. Las proyecciones de las necesidades mundiales de financiación de las infraestructuras hídricas para alcanzar el ODS 6 oscilan entre los 6,7 billones de dólares para 2030 y los 22,6 billones para 2050 (OCDE, 2018). Las estimaciones también muestran que los gobiernos y las agencias de desarrollo no tienen fondos suficientes para satisfacer estas necesidades (Kolker et al., 2016). La ayuda oficial al desarrollo (AOD) para el agua es de alrededor de 13 000 millones de dólares al año —muy por debajo de lo que se necesita (Naciones Unidas, 2018)— y alrededor del 80 % de los países que informan a las Naciones Unidas sobre el ODS 6 dicen que tienen una financiación insuficiente para cumplir con los objetivos nacionales del agua (Naciones Unidas, 2018). Es necesario mejorar el uso de los recursos públicos y de ayuda existentes para catalizar soluciones de financiación combinada y movilizar formas adicionales e innovadoras de financiación nacional e internacional. El sector privado y las instituciones financieras privadas globales también necesitan ser apalancados para cerrar la brecha de financiación.

13.1.2 Los datos sobre las inversiones actuales y necesarias para el desarrollo, la gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas son insuficientes

Los recursos hídricos subterráneos son esenciales para la seguridad socioeconómica y la prosperidad a largo plazo, y para aumentar la resistencia de los sistemas de abastecimiento de agua

A diferencia de las aguas superficiales, cuyos costes de capital suelen ser cubiertos por el sector público, las infraestructuras de desarrollo de las aguas subterráneas suelen ser financiadas por el usuario final, ya sea una industria, un hogar, un agricultor o una comunidad. Los usuarios acceden al recurso directamente y de forma descentralizada. Esto dificulta el seguimiento de los flujos de financiación y la recopilación de datos sobre las inversiones en aguas subterráneas. El usuario final invierte su capital privado para el coste de acceso a las aguas subterráneas, que suele consistir en un coste fijo para un pozo y un coste variable para el bombeo (Banco Mundial, 2010; Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a). En algunos países, puede haber una tasa de extracción o una tarifa de aguas subterráneas, pero estas tasas y tarifas rara vez reflejan los verdaderos costes y el valor del recurso.

Además, aunque existen algunos datos sobre los presupuestos gubernamentales para la gestión de los recursos hídricos en general (OCDE, 2012b), los datos específicos sobre las aguas subterráneas son muy limitados. El *Resumen de la actualización de los progresos de 2021 sobre el ODS 6* plantea la cuestión de la falta de datos sobre las aguas subterráneas[47] y la falta de iniciativas de seguimiento de las aguas subterráneas, haciendo hincapié en que el seguimiento de las aguas subterráneas es un "área descuidada" (Naciones Unidas, 2018; ONU-Agua, 2021). También se considera que las aguas subterráneas están poco representadas en el seguimiento de la consecución del ODS 6 (ONU-Agua, 2018). Varios informes (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a, 2016b; OCDE, 2017b) coinciden en que la escasez de financiación es una limitación para la gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas en la mayoría de los países, incluidos aquellos en los que las aguas subterráneas representan una parte importante del abastecimiento para el uso doméstico, la irrigación o la industria/minería.

[47] Solo 14 países comunicaron datos sobre la cantidad de las masas de agua subterránea, y 25 países comunicaron datos sobre la calidad de las aguas subterráneas (de los 193 Estados Miembros a los que se les pidió que proporcionaran datos) (Naciones Unidas, 2018). En la versión actualizada, solo 52 países disponen de alguna información sobre las aguas subterráneas, lo que resulta problemático porque las aguas subterráneas suelen representar la mayor parte del agua dulce de un país (ONU-Agua, 2021).

13.2 Establecer fuentes de financiación permanentes, estructurales y adecuadas

13.2.1 Es necesario establecer presupuestos gubernamentales adecuados para el abastecimiento, la gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas

Los recursos hídricos subterráneos son esenciales para la seguridad socioeconómica y la prosperidad a largo plazo, y para aumentar la resistencia de los sistemas de abastecimiento de agua. Sin embargo, en la mayoría de los países se destinan muy pocos recursos a la vigilancia, la gestión y la conservación de estos valiosos recursos. Dadas las características del uso de las aguas subterráneas y los desafíos de la medición y el seguimiento, muchas iniciativas centradas en el estado fracasan o son ineficaces en el desarrollo, gobierno y gestión de las aguas subterráneas (Garduño y Foster, 2010; Foster et al., 2010c; Banco Mundial, 2010, 2018a; Molle y Closas, 2019). Por lo tanto, los gobiernos deben evaluar y aceptar su papel potencial en la promoción de la sostenibilidad de los recursos de aguas subterráneas en el contexto de las condiciones locales (Garduño y Foster, 2010; Foster et al., 2010c; Banco Mundial, 2010; Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a, 2016b; OCDE, 2017b), y utilizar los limitados recursos financieros de manera más eficiente a través de iniciativas adaptadas. Los presupuestos gubernamentales deberían, como mínimo, financiar el control de las aguas subterráneas —calidad y cantidad, así como los costes de explotación y mantenimiento (O&M) relacionados— y potenciar la inversión privada financiando las iniciativas iniciales de exploración y gestión.

Los recursos hídricos subterráneos son esenciales para la seguridad socioeconómica y la prosperidad a largo plazo, y para aumentar la resistencia de los sistemas de abastecimiento de agua

13.2.2 Una financiación adecuada requiere reconocer el valor y el potencial de las aguas subterráneas

Los recursos hídricos subterráneos suelen estar infravalorados, especialmente cuando su explotación no está controlada (Garduño y Foster, 2010) y su calidad no está protegida. Los recursos hídricos subterráneos se utilizan para múltiples fines y proporcionan una serie de beneficios (véase la figura 13.1). Existe la oportunidad de integrar mejor el desarrollo y la gestión sostenible de las aguas subterráneas como parte de otros proyectos e iniciativas del sector del agua. Por ejemplo, el almacenamiento y la extracción de aguas subterráneas pueden incluirse como parte del abastecimiento de agua urbana para añadir seguridad y flexibilidad en caso de variación estacional de los recursos (Banco Mundial, 2018a). Esto permitiría aprovechar más la financiación existente de la AOD, de las tarifas de abastecimiento de agua y saneamiento, e incluso de las asociaciones público-privadas. También es necesario analizar y comprender mejor los costes y beneficios de las acciones de gestión de las aguas subterráneas (y de la inacción[48]) en términos económicos, considerando los costes de oportunidad, las externalidades y los beneficios sociales y medioambientales. Esto podría ayudar a situar las cuestiones relativas a las aguas subterráneas en un lugar más destacado de la agenda política para garantizar el compromiso y aprovechar diferentes tipos de financiación (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c).

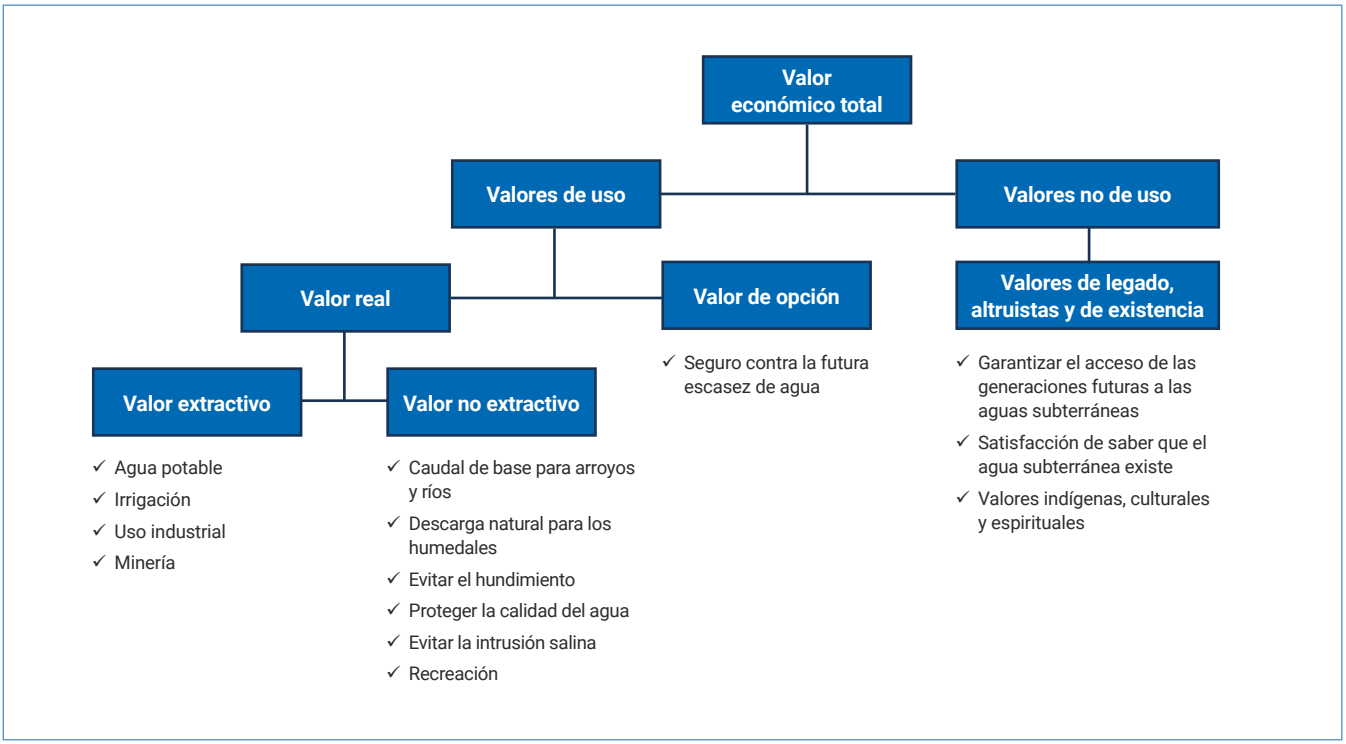
13.3 Aprovechar mejor la financiación disponible actualmente

13.3.1 Hacia formas más eficientes e innovadoras de utilizar las finanzas

Si las aguas subterráneas representan una proporción considerable del volumen total distribuido a través de la infraestructura de abastecimiento de agua, la tarifa del agua, si se fija correctamente, puede proporcionar financiación para la gestión de las aguas subterráneas (para el caso de Dinamarca, véase OCDE, 2017b). Sin embargo, incluso la recuperación de los costes es un reto en la mayoría de los países (Naciones Unidas, 2021) y los costes de la gestión de los recursos hídricos rara vez se reflejan en la factura del agua. Por lo tanto, la gestión de los recursos hídricos se financia mediante una combinación de gravámenes de extracción, tasas o tarifas, cargos por efluentes o contaminación, impuestos, presupuestos gubernamentales y AOD (OCDE, 2012b, 2017b; AEMA, 2013).

[48] El riesgo contrafactual de no financiar las infraestructuras hídricas también debería formar parte del proceso de evaluación y decisión de "bancabilidad" (WWC, 2018).

Figura 13.1 Valor económico total de las aguas subterráneas



Fuente: OCDE (2017b, fig. 1.2, p. 20). Todos los derechos reservados.

Los cánones y/o tarifas de extracción de aguas subterráneas pueden aplicarse sobre una base volumétrica y estos instrumentos deben internalizar el valor económico y social de las aguas subterráneas, utilizando los principios de "quien contamina paga", "el beneficiario paga", "la equidad" y "la coherencia política" (OCDE, 2012b). Las tasas también pueden basarse en otros parámetros que sirvan de indicador del agua extraída (área de terreno, capacidad de bombeo, etc. - Molle y Berkoff, 2007; AEMA, 2013). Los ingresos recaudados deben destinarse a financiar iniciativas relacionadas con las aguas subterráneas, como la infraestructura de control y los costes de funcionamiento y mantenimiento correspondientes (cuadro 13.1). Existen ejemplos de países con tarifas de aguas subterráneas y/o tasas de extracción de aguas subterráneas, como algunos Estados miembros de la Unión Europea (ARCADIS, 2012; AEMA, 2013), así como Australia (Goulburn-Murray Water, 2013), China, Israel, Jordania, el Perú (cuadro 13.1) y los Estados Unidos (OCDE, 2010a), entre otros. Sin embargo, en muchos países no existe un precio del agua o una tarifa del agua para las aguas subterráneas, especialmente para la irrigación, en parte debido a las dificultades de control y aplicación y a la importancia política del sector agrícola (que también se traduce en la falta de voluntad política). Molle y Berkoff (2007), ARCADIS (2012) y Berbel et.al. (2019) analizan más a fondo la tarificación del agua para la irrigación (incluidas las aguas subterráneas).

Dados los retos mencionados, la financiación tradicional (tarifas, impuestos y transferencias) debe utilizarse de forma más eficiente e innovadora, en combinación con otros instrumentos, acuerdos y mecanismos para atraer otras fuentes de financiación y financiar con éxito el desarrollo, la gobernanza y la gestión sostenibles de las aguas subterráneas. Las nuevas tecnologías, como la teledetección, los pagos por móvil, las tarjetas magnéticas, el bombeo solar y los contadores de prepago (véase el cuadro 13.2), pueden ayudar a mejorar la eficiencia de la prestación de servicios, regular el uso de las aguas subterráneas, recaudar los ingresos de esas tarifas/tasas y llegar a las comunidades locales (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a). Los cánones e impuestos en otros sectores, como la agricultura, también pueden ayudar a financiar las iniciativas relacionadas con las aguas subterráneas y reducir las posibles externalidades

Cuadro 13.1 Combinación de cánones y tarifas para mejorar la gestión, el control y el desarrollo de los recursos hídricos subterráneos en el Perú

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) recauda los cánones de captación (de aguas superficiales y subterráneas) y de contaminación del agua para financiar la gestión de los recursos hídricos. Esta tasa es un instrumento innovador, ya que incorpora el riesgo de escasez en su diseño, se basa en el principio de que quien contamina paga y se cobra en función del volumen utilizado. En el caso de las aguas subterráneas, los acuíferos del Perú se clasifican en tres categorías: subexplotados, en equilibrio y sobreexplotados, según la relación demanda/disponibilidad de cada acuífero. Aunque el control y la aplicación de las aguas subterráneas plantean problemas, la ANA está realizando mejoras y, en la actualidad, el 23 % de los ingresos totales recaudados por la ANA proceden de las tasas por aguas subterráneas. Además, en 2018 el Perú comenzó a implementar una tarifa de servicios de gestión y monitoreo de aguas subterráneas para usuarios no agrícolas con pozos propios. Esta tarifa será cobrada por las Empresas Prestadoras de Servicios (EPS) y está vinculada a un plan de inversiones para controlar, restaurar, preservar y gestionar los acuíferos.

Fuente: OCDE (2021) y SUNASS (2017).

Reformar los subsidios perjudiciales y alinearlos con las políticas de aguas subterráneas debería formar parte de la agenda de financiación del agua

negativas. Por ejemplo, el estado de Montana (Estados Unidos) cobra tasas de registro de plaguicidas y fertilizantes y utiliza los ingresos para financiar iniciativas de control de la calidad de las aguas subterráneas (OCDE, 2010b). La financiación combinada (OCDE, 2019b; véase también el cuadro 13.2), los acuerdos de asociación público-privada (APP) y otros mecanismos de incentivos (cuadro 13.3) pueden utilizarse para apalancar al sector privado, junto con los presupuestos gubernamentales y la AOD para financiar iniciativas de aguas subterráneas. Por ejemplo, en virtud de un acuerdo de APP, la ciudad de San Luis Potosí, en México, pudo proteger su acuífero tratando y utilizando aguas residuales en lugar de aguas subterráneas para usos no potables, como para la agricultura y la industria (Banco Mundial, 2018b). Los fondos de otros sectores, como el de la energía y el clima, también pueden aprovecharse para financiar iniciativas relacionadas con las aguas subterráneas, como las bombas solares (cuadro 13.2) o las líneas eléctricas dedicadas a reemplazar los pozos de agua subterránea que funcionan con diésel, para mejorar la fiabilidad, disminuir los costes y regular mejor el consumo en áreas que están amenazadas de agotamiento (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016c).

13.3.2 Identificar, evaluar y reorientar las subvenciones para el desarrollo y la gestión sostenibles de los recursos hídricos subterráneos

En muchos países, las actividades financiadas con fondos públicos en otros sectores contribuyen al agotamiento o la contaminación de los recursos de aguas subterráneas (Garduño y Foster, 2010; Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a; OCDE, 2017b; Banco Mundial, 2018a). Muchas veces, las subvenciones se diseñan y aplican sin tener en cuenta el impacto en la sostenibilidad de las aguas subterráneas y en quienes dependen de los recursos. Por ejemplo, los subsidios en el sector energético que incentivan la sobreexplotación de las aguas subterráneas mediante la reducción de las tarifas eléctricas, o los subsidios agrícolas que fomentan los cultivos con alta demanda de agua, pueden convertirse en incentivos perversos (Garduño y Foster, 2010; Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a). Además, este tipo de subvención puede ser de carácter regresivo, beneficiando a los usuarios ricos (Venkanta, 2021; Banco Mundial, 2018a). Del mismo modo, las subvenciones a los fertilizantes conducen a un uso excesivo y a la contaminación de las aguas subterráneas con nitratos.

Cuadro 13.2 Combinación de financiación mixta con tecnologías emergentes para suministrar agua potable a las aldeas rurales de Tanzanía

El Gobierno de Tanzanía, con el apoyo del Banco Mundial, está ayudando a las Organizaciones Comunitarias de Abastecimiento de Agua (COWSO) a sustituir las viejas e ineficientes bombas alimentadas por gasóleo por bombas limpias alimentadas por energía solar fotovoltaica en unas 150 aldeas de las zonas rurales de Tanzanía. El funcionamiento y el mantenimiento de las bombas de gasóleo son caros, lo que repercute directamente en el precio del agua, con otros problemas relacionados con la equidad y la sostenibilidad. Sin embargo, los COWSO no disponen del capital financiero necesario para invertir en bombas solares, ni tienen la solvencia necesaria para obtener capital en el mercado financiero. El Global Partnership for Results-Based Approaches (GPRBA) del Banco Mundial aporta el 60 % del capital como recursos de subvención y el resto se financia mediante un préstamo a cuatro años del Banco de Desarrollo TIB. Además, los COWSO utilizan una innovadora plataforma de pago por banca móvil y contadores de prepago para gestionar mejor la recaudación de ingresos por la venta de agua y gestionar los pagos de los préstamos. Los beneficios de esta iniciativa son varios, entre ellos:

- aprovechar el poder de la financiación del sector privado mediante combinaciones de subvenciones y préstamos;
- obtener beneficios medioambientales y económicos de la transición de las bombas diésel a las bombas solares, en forma de menores emisiones de CO_2 y de un elevado ahorro de costes en el ciclo de vida; y
- la generación de un historial crediticio de entre 3 y 5 años por parte de cada COWSO, gracias a su participación en el proyecto y al reembolso del préstamo de inversión: un paso importante hacia la solvencia.

Fuente: Welsien (2016).

Por lo tanto, hay que garantizar la coherencia de las políticas de los distintos sectores. Reformar los subsidios perjudiciales y alinearlos con las políticas de aguas subterráneas debería formar parte de la agenda de financiación del agua (Garduño y Foster, 2010; OCDE, 2018). Los recursos financieros liberados de las subvenciones perversas pueden utilizarse para proteger y restaurar los recursos hídricos subterráneos y para subvencionar a quienes más lo necesitan (grupos vulnerables y desfavorecidos). En lugar de subvencionar a los agricultores con bajos costes energéticos para que exploten en exceso las aguas subterráneas, los gobiernos podrían subvencionar programas de eficiencia hídrica[49] o iniciativas dirigidas o propiedad de la comunidad[50] para supervisar y desarrollar los recursos hídricos subterráneos (Banco Mundial, 2020), o apoyar el pago de servicios ambientales para recargar las aguas subterráneas (cuadro 13.3), asegurándose cuidadosamente de que los grupos más vulnerables obtengan los beneficios de todas estas intervenciones (Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas, 2016a). Por ejemplo, los agricultores pobres pueden convertirse en beneficiarios de los pagos por ecosistemas, y las iniciativas dirigidas por la comunidad o las mujeres pueden garantizar la inclusión y representación de los grupos vulnerables.

[49] "Los estudios existentes revelan que las medidas técnicas destinadas a la modernización del sistema de irrigación, seguidas de la aplicación de la tarificación volumétrica, tienen un potencial de ahorro de agua mucho mayor en comparación con el simple aumento de precios" (AEMA, 2013, p. 12).

[50] Dada su naturaleza descentralizada, una fuerte participación de la comunidad es clave para garantizar el desarrollo sostenible, el seguimiento y la gestión de los recursos hídricos subterráneos. Involucrar a las comunidades ayuda a garantizar que los grupos más vulnerables tengan acceso a los beneficios (Garduño y Foster, 2010; Banco Mundial, 2010, 2018a).

13.3.3. El papel de las instituciones financieras mundiales

El mayor impacto de las instituciones financieras sobre el agua proviene de las actividades que permiten a través de sus préstamos, inversiones y suscripción de seguros (CDP, 2020). Actualmente, los bancos, los accionistas, las aseguradoras y las instituciones financieras que los poseen permiten a las empresas realizar actividades económicas que, en muchos casos, son profundamente perjudiciales para el medio ambiente. El sector de los servicios financieros tiene un papel especialmente crítico en la transición hacia un futuro con seguridad hídrica (Hogeboom et al., 2018; WWF, 2019). Las instituciones financieras mundiales pueden ofrecer incentivos únicos y sistémicos para el cambio, garantizando que sus prácticas de inversión, seguros, préstamos, calificación y suscripción impulsen a estos usuarios del agua a utilizarla de forma inteligente, a no contaminarla y a promover su reutilización (WWF, 2019; CDP, 2020).

Cuadro 13.3 Pago por servicios de los ecosistemas con financiación del sector privado: el caso de Kumamoto (Japón)

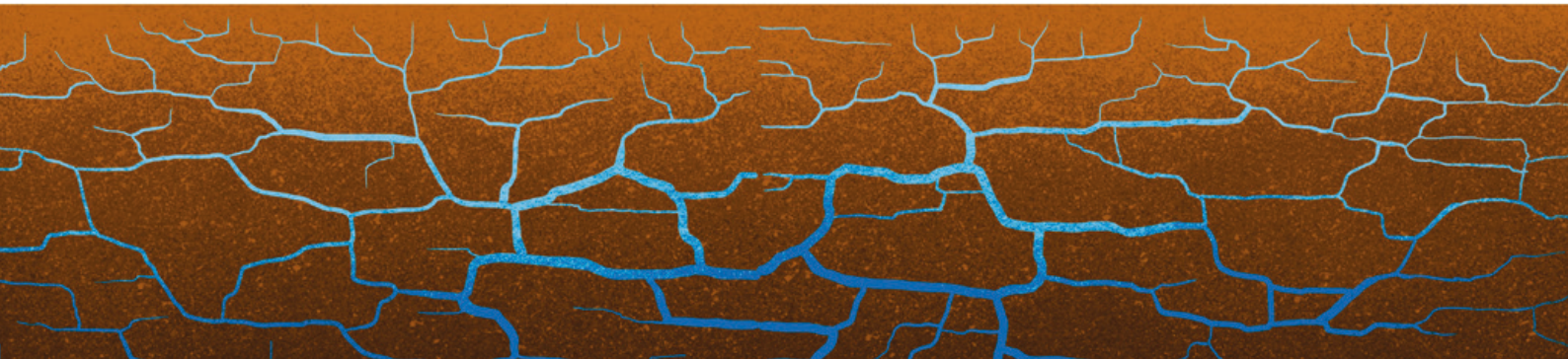
Las aguas subterráneas de la región de Kumamoto proporcionan el 100 % del agua potable de la ciudad de Kunamoto, y son también una fuente esencial de agua para la agricultura y la industria de la región. Los arrozales de regadío del área son la principal fuente de recarga de las aguas subterráneas. Sin embargo, una política gubernamental de restricción del abastecimiento limita la superficie de arroz, lo que, junto con la urbanización, ha obligado a algunos agricultores a abandonar sus arrozales, disminuyendo los niveles de agua subterránea. Una filial de Sony Semiconductors, que depende de la disponibilidad de aguas subterráneas para sus operaciones, llegó a un acuerdo con los agricultores para evitar el agotamiento de las aguas subterráneas y asegurar sus actividades comerciales en el futuro, al tiempo que se convierte en "neutral en cuanto al agua". A través de un plan de Pago por Servicios Ecosistémicos (PSA), la empresa pagó a los agricultores para que recargaran las aguas subterráneas inundando voluntariamente los antiguos arrozales que se habían convertido en campos de cultivo. El plan de PSA tuvo tanto éxito que, con el tiempo, el gobierno de la ciudad, el Consejo para el Uso Sostenible del Agua en la Agricultura y otras industrias se unieron al esfuerzo, ampliando el programa. Este caso muestra cómo los PSA pueden ayudar a revertir el agotamiento de las aguas subterráneas y demuestra la importancia de la coherencia de las políticas agrícolas, urbanas y del agua.

Fuente: OCDE (2017b).

Capítulo 14

Conclusiones

Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos
Richard Connor, Jac van der Gun y Michela Miletto



14.1 Perspectivas y retos

14.1.1 Las múltiples funciones y facetas de las aguas subterráneas

En la actualidad, la sociedad humana depende en gran medida de las aguas subterráneas para satisfacer las necesidades domésticas, así como para producir alimentos y sostener las economías. Las aguas subterráneas suministran aproximadamente el 25 % de toda el agua dulce extraída en la Tierra, pero su proporción en el uso consuntivo del agua es mucho mayor, al igual que los beneficios generales que proporciona. Las aguas subterráneas desempeñan un papel esencial en la adaptación al cambio climático y su mitigación, y su contribución al cumplimiento de las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, así como de los demás ODS relacionados con el agua, es fundamental. Sin embargo, las aguas subterráneas en sí mismas, así como sus beneficios directos e indirectos, han pasado demasiado a menudo desapercibidas o ignoradas, dejando numerosos acuíferos inadecuadamente protegidos.

Muchas de las mayores ciudades del mundo, y numerosas ciudades y pueblos más pequeños, dependen de las aguas subterráneas como fuente principal. Esta dependencia se intensificará, especialmente en las áreas de rápida urbanización de los países en desarrollo y las economías emergentes. Las aguas subterráneas son también la principal fuente de agua doméstica en la mayoría de las áreas rurales.

Las aguas subterráneas en sí mismas, así como sus beneficios directos e indirectos, han pasado demasiado a menudo desapercibidas o ignoradas, dejando numerosos acuíferos inadecuadamente protegidos

La agricultura depende cada vez más de las aguas subterráneas para la irrigación y el riego del ganado, especialmente en las áreas áridas y semiáridas. Las aguas subterráneas son una fuente de agua especialmente importante para los pequeños agricultores, y desempeñarán un papel esencial para satisfacer la creciente demanda de alimentos.

Las aguas subterráneas sirven de apoyo a todo tipo de industrias manufactureras, especialmente cuando las aguas superficiales son limitadas o cuando se requiere agua de alta calidad. Sirven para múltiples propósitos, desde el agua de proceso hasta la limpieza y la refrigeración. Las industrias con importantes actividades en el subsuelo, como los sectores del petróleo, el gas y la minería, interactúan intensamente con las aguas subterráneas, los acuíferos y el medio ambiente del subsuelo, por lo que tienen una responsabilidad especial en la protección de estos recursos.

Las relaciones entre los ecosistemas y las aguas subterráneas son una vía de doble sentido. La ecología de muchos ríos, lagos y humedales se apoya directamente en los acuíferos. Estos ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas (GDE), que también incluyen una gran cantidad de biomas terrestres, son fundamentales para mantener la biodiversidad. Muchos GDE sirven para mejorar la recarga de los acuíferos —de ahí la relación bidireccional—, de modo que la protección de los ecosistemas (y especialmente de los humedales) es buena para las aguas subterráneas, y viceversa. En todo el mundo, los GDE se están degradando como consecuencia de la extracción intensiva de aguas subterráneas y la falta de medidas de protección.

Debido a los enormes volúmenes de agua subterránea (que representan el 99 % de toda el agua líquida almacenada en la Tierra), los acuíferos pueden servir de amortiguador en tiempos de escasez de agua, lo que permite a las personas sobrevivir incluso en los climas más secos. Dependiendo de su profundidad y de su entorno geológico (como las zonas no saturadas superpuestas y las capas de confinamiento), los acuíferos están comparativamente bien protegidos contra los incidentes de contaminación en la superficie. Sin embargo, una vez que las aguas subterráneas se contaminan, puede ser extremadamente difícil y costoso remediarlo.

14.1.2 Abastecimiento por parte de las utilidades frente al autoabastecimiento

El abastecimiento de agua en las zonas urbanas suele confiarse a las empresas de servicios públicos. Mientras los operadores locales de abastecimiento de agua se esfuerzan por seguir el ritmo de la creciente demanda, el autoabastecimiento de aguas subterráneas —a menudo autofinanciado— ofrece una solución rápida en las zonas urbanas en las que es técnicamente factible para quienes pueden permitírselo.

Las aguas subterráneas también son muy adecuadas para el autoabastecimiento rural y suelen ser la forma más rentable de proporcionar un abastecimiento de agua seguro a los pueblos.

En el sector agrícola, las aguas subterráneas suelen ser extraídas por los propios agricultores. El autoabastecimiento es también el modo predominante entre los mayores usuarios industriales de aguas subterráneas. El autoabastecimiento implica una toma de decisiones muy fragmentada y difícil de controlar.

14.1.3 Aguas subterráneas y energía

Por término medio, la extracción de aguas subterráneas requiere sin duda mucha más energía que el desvío de aguas superficiales, porque hay que elevarlas a la superficie. Por otro lado, suele requerir mucha menos energía para la conducción (debido a una menor distancia media entre el lugar de extracción y el usuario) y para el tratamiento (ya que la calidad del agua suele ser mucho mejor). Los sistemas de irrigación solar asequibles, adoptados a escala para dar servicio a las operaciones agrícolas, pueden proporcionar una fuente de energía renovable y baja en carbono para bombear las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas también se utilizan en la generación de energía y en la producción de energía primaria, como en los sectores del carbón, el petróleo y el gas. Solo se dispone de datos específicos sobre este tipo de uso de las aguas subterráneas en unos pocos países industrializados. La extracción de recursos subterráneos, y los diversos métodos utilizados, pueden suponer graves amenazas para la calidad de las aguas subterráneas.

Aunque se encuentran en el subsuelo, las aguas subterráneas no están excluidas de ser afectadas por el cambio climático

14.1.4 Cambio climático y otros retos

Aunque se encuentran en el subsuelo, las aguas subterráneas no están excluidas de ser afectadas por el cambio climático. Los cambios en el ciclo del agua de la Tierra a través de los procesos de precipitación y evaporación tienen su impacto en la recarga de las aguas subterráneas. Los acuíferos poco profundos o cercanos a la superficie, a los que más se recurre como fuente de agua dulce, son también los más vulnerables. Sin embargo, para la mitigación y adaptación al cambio climático, las aguas subterráneas también ofrecen soluciones.

En términos de mitigación, las plantas de energía geotérmica son, al contrario que las plantas de energía eólica y solar, muy adecuadas para producir una carga base eléctrica estable y ofrecen muchas oportunidades de expansión. Las aguas subterráneas también pueden utilizarse para la calefacción y la refrigeración directas. Algunos emplazamientos geológicos, incluidos los acuíferos profundos, son adecuados para el almacenamiento de CO_2 en el marco de los procesos de captura y almacenamiento de carbono. En cuanto a la adaptación al cambio climático, los acuíferos ofrecen una alternativa de relativo bajo coste para el almacenamiento de aguas superficiales y —sobre todo— ofrecen una capacidad de amortiguación única, que reduce los impactos de las crecientes variaciones climáticas y facilita la transición fluida a prácticas de uso del agua compatibles con las cambiantes condiciones climáticas. Para que el abastecimiento de agua sea resistente al cambio climático, en muchas partes del mundo habrá que utilizar las aguas subterráneas conjuntamente con los ríos, los lagos y los embalses de aguas superficiales.

A pesar de la relativa abundancia de aguas subterráneas, muchos de los acuíferos del mundo están sobreexplotados, incluso algunos que reciben una recarga importante. Esto ha provocado un descenso constante de los niveles de agua, en algunos casos más allá de los límites de la extracción económicamente viable. Además de reducir la disponibilidad general de agua dulce, la extracción intensiva de agua subterránea ha provocado el hundimiento del terreno en muchas áreas.

La extracción y el uso de las aguas subterráneas no se limitan necesariamente a las aguas subterráneas renovables. También pueden considerarse los recursos no renovables. Algunas regiones de África, por ejemplo, tienen cantidades considerables de abastecimientos de aguas

subterráneas no renovables que pueden estar disponibles durante los periodos de fuerte estrés hídrico para mantener la seguridad del agua. Sin embargo, la precaución al hacerlo es esencial. No hay que pasar por alto la consideración de las generaciones futuras y de los aspectos económicos, financieros y medioambientales del agotamiento del almacenamiento.

La contaminación de las aguas subterráneas es un reto importante en todo el mundo. Muchas fuentes de contaminación son omnipresentes en los asentamientos urbanos y de otro tipo. La existencia de instalaciones de saneamiento *in situ* mal construidas o mal mantenidas ha provocado la contaminación persistente por patógenos del agua extraída de los pozos poco profundos cercanos, especialmente en los asentamientos rurales. Sin embargo, la agricultura es la principal causa de contaminación de las aguas subterráneas en las áreas rurales. Es muy necesario aumentar los esfuerzos de control de la contaminación, tanto en entornos urbanos como rurales. La industria, incluidos sus componentes del subsuelo, como la explotación de hidrocarburos y las diversas formas de minería, producen una gran diversidad de contaminantes, que constituyen una grave amenaza para la calidad de las aguas subterráneas. La protección de la calidad de las aguas subterráneas mediante una reglamentación eficaz y una aplicación estricta es una necesidad urgente en todos los sectores, pero las prácticas adecuadas siguen siendo escasas.

14.1.5 Datos, información y conocimientos sobre las aguas subterráneas y los acuíferos

La falta de información y conocimientos detallados sobre los recursos hídricos subterráneos locales es un reto importante en muchos países. El *Resumen de la actualización de los progresos de 2021 sobre el ODS 6* plantea la cuestión de la falta de datos sobre las aguas subterráneas y la falta de iniciativas de seguimiento de las aguas subterráneas, haciendo hincapié en que el seguimiento de las aguas subterráneas es un "área descuidada". Fuera de Europa, América del Norte y grandes países asiáticos como la India y China, el control periódico de los niveles o la calidad de las aguas subterráneas, primer paso para su gestión, se limita a unos pocos países.

14.2 Avanzando

14.2.1 Las aguas subterráneas merecen ocupar un lugar destacado en las agendas

La Asamblea General de las Naciones Unidas, así como el Consejo de Derechos Humanos, reconocen que el acceso equitativo al agua potable y al saneamiento son derechos humanos distintos. Se espera que los Estados Miembros de la ONU hagan realidad los derechos humanos al agua potable y al saneamiento mediante planes de acción o estrategias, promoviendo así activamente la concienciación y la creación de capacidades. Debe prestarse la debida atención, entre otras cosas, al abastecimiento sostenible de agua, al tratamiento antes del consumo si la calidad del agua bruta es inadecuada y, puesto que las aguas subterráneas son un componente esencial del abastecimiento de agua y del saneamiento, a la protección de las aguas subterráneas y a la recarga de los acuíferos.

Las aguas subterráneas desempeñan también un papel muy importante en otros sectores, como la agricultura, la industria y el medio ambiente, con repercusiones positivas en las economías, los ingresos, el bienestar y los ecosistemas. Se necesitan custodios proactivos y capaces de las aguas subterráneas para garantizar la sostenibilidad de los servicios necesarios de las aguas subterráneas.

14.2.2 La buena gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas son cruciales

Es esencial que los países se comprometan a desarrollar un marco adecuado y eficaz para la gobernanza de las aguas subterráneas. Para ello es necesario que los gobiernos tomen la iniciativa y asuman la responsabilidad de establecer y mantener una estructura de gobernanza plenamente operativa, que incluya: la base de conocimientos; la capacidad institucional; las leyes, los reglamentos y su aplicación; la política y la planificación; la participación de las partes interesadas; y la financiación adecuada. También corresponde a los países garantizar la plena aplicación de sus políticas y planes (gestión de las aguas subterráneas).

14.2.3 Los datos, la información y el conocimiento son guías indispensables para el desarrollo y la gestión adecuados de las aguas subterráneas

Los conocimientos científicos en hidrogeología y los métodos y herramientas disponibles son suficientes para abordar la mayoría de las cuestiones relacionadas con la gestión de las aguas subterráneas, como la ubicación de los pozos, la optimización de la extracción y la predicción de sus efectos a escala local y regional, y la prevención de la contaminación. El reto radica más bien en la escasez de datos fiables sobre las aguas subterráneas en cada área, especialmente en los países de bajos ingresos, y en la escasa difusión de datos, información y conocimientos entre los investigadores, los profesionales y los responsables de la toma de decisiones. Las respuestas gubernamentales eficaces incluyen, en primer lugar, el desarrollo y el mantenimiento de una base de conocimientos sobre las aguas subterráneas.

En cuanto a la exploración y evaluación de acuíferos, la adquisición de datos e información de las agencias de aguas subterráneas puede ser complementada por el sector privado. En particular, las industrias petrolera y minera poseen una gran cantidad de datos, información y conocimientos sobre la composición de los dominios más profundos del subsuelo, incluidos los acuíferos. Es muy deseable que los compartan con los profesionales del sector público encargados de la evaluación y gestión de las aguas subterráneas. Además de la exploración y la evaluación, las actividades de seguimiento de las aguas subterráneas también son esenciales. Tienen que proporcionar información espacialmente diferenciada sobre los cambios en el tiempo de los niveles de agua, las extracciones de agua subterránea y la calidad de las aguas subterráneas, lo que es esencial para fundamentar las decisiones adecuadas sobre el desarrollo y la gestión de las aguas subterráneas.

14.2.4 Unas instituciones fuertes son la clave para avanzar en la gestión de las aguas subterráneas

A menudo escasea el personal cualificado con capacidad para realizar estudios hidrogeológicos y geofísicos. El emplazamiento y la construcción de los pozos de mayor rendimiento necesarios para la irrigación a gran escala o el abastecimiento de las ciudades en entornos hidrogeológicos complejos requieren una experiencia considerable. Lo mismo ocurre con actividades como la política y la planificación de las aguas subterráneas, y con la aplicación y el cumplimiento de las medidas de gestión de las aguas subterráneas.

Sin embargo, en muchos países, la falta generalizada de profesionales de las aguas subterráneas entre el personal de las instituciones y del gobierno local y nacional, así como la insuficiencia de los mandatos, la financiación y el apoyo de los departamentos o agencias de aguas subterráneas, obstaculizan la evaluación, el seguimiento, la planificación, el desarrollo y la gestión eficaces de las aguas subterráneas.

La formación de capacidades humanas e institucionales puede reforzarse, por ejemplo, con proyectos de cooperación bilateral a largo plazo, programas de intercambio académico u oportunidades de formación de postgrado en el extranjero. Sin embargo, es crucial el compromiso de los gobiernos para crear, apoyar y mantener la capacidad institucional relacionada con las aguas subterráneas.

14.2.5 Las partes interesadas tienen una diversidad de intereses y no deben ser ignoradas

La gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas pueden suponer un reto debido a la naturaleza común de los recursos hídricos subterráneos, junto con las lagunas de información y la diversidad de las partes interesadas y sus intereses. Dado que el acceso a las aguas subterráneas puede producirse en vastas áreas geográficas, suele ser difícil para los gobiernos cuantificar, asignar y regular las extracciones, sobre todo si sus recursos son limitados. El corolario es que, en casi todas partes, la gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas deben incluir los intereses de las partes interesadas públicas y privadas, así como de las comunidades locales. Es imperativo que los gobiernos asuman su papel de custodios del recurso en vista de los aspectos de bien común de las aguas subterráneas y garanticen

que el acceso a las aguas subterráneas (y los beneficios de las mismas) se distribuyan equitativamente y que el recurso siga estando disponible para las generaciones futuras. Siempre que sea posible, es ventajoso implicar a las partes interesadas en los procesos de evaluación, seguimiento, planificación y toma de decisiones.

14.2.6 Las disposiciones legales aclaran los derechos acordados y las reglas del juego en materia de aguas subterráneas

Las leyes y los reglamentos que incorporan las metas sociales y los objetivos políticos, y que establecen un marco habilitador y reglamentario para alcanzar esas metas, son componentes fundamentales de la gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas. Los marcos jurídicos estables también permiten a los gobiernos y a los usuarios de las aguas subterráneas planificar la gestión de los recursos a largo plazo y hacer frente a intereses contrapuestos, incluidos los del medio ambiente y los de las generaciones futuras. El derecho internacional del agua identifica los derechos y obligaciones de los Estados soberanos en relación con los ríos, lagos, cuencas y acuíferos que están divididos por una línea fronteriza internacional, la forman o la subyacen (en el caso de las aguas subterráneas). Recientemente ha comenzado a ocuparse específicamente de los acuíferos y las aguas subterráneas, y los países que comparten acuíferos y aguas subterráneas transfronterizas han concluido con éxito algunos acuerdos.

Es imperativo que los gobiernos asuman su papel de custodios del recurso en vista de los aspectos de bien común de las aguas subterráneas y garanticen que el acceso a las aguas subterráneas (y los beneficios de las mismas) se distribuyan equitativamente y que el recurso siga estando disponible para las generaciones futuras

Los instrumentos legales para controlar la extracción de aguas subterráneas incluyen la concesión obligatoria de licencias para la construcción de pozos y la extracción de aguas subterráneas, y la obligación de pagar tasas por los volúmenes de agua extraída e impuestos como componente del precio del agua suministrada. Las medidas de prevención de la contaminación de las aguas subterráneas incluyen: la prohibición o la limitación de determinadas actividades contaminantes y de uso del agua; la limitación del uso de pesticidas, herbicidas y fertilizantes; la restricción de determinadas pautas de cultivo; la reducción de la intensidad del pastoreo; la recuperación de las tierras agrícolas y la gestión del drenaje.

La emisión y el vertido de sustancias en las masas de agua o en el suelo, o el tratamiento ilegal de las aguas residuales, pueden considerarse una infracción o un delito. La mayoría de estas medidas requieren una normativa basada en la legislación. Sin embargo, la aplicación de las normas y el enjuiciamiento de los contaminadores suelen ser un reto debido a la naturaleza invisible de las aguas subterráneas.

14.2.7 Los acuíferos transfronterizos exigen cooperación

Los acuíferos transfronterizos (es decir, acuíferos con segmentos en dos o más países) requieren una atención especial porque la contaminación de las aguas subterráneas y los cambios en sus niveles y presiones pueden tener su origen en un país vecino. Esto añade una dimensión distinta, internacional, a la gobernanza y gestión de las aguas subterráneas, haciéndola más compleja. Su importancia solo ha llamado la atención de la comunidad internacional recientemente, abriendo oportunidades adicionales para promover la cooperación transfronteriza a través de nuevos recursos financieros específicos. Los principales resultados obtenidos hasta ahora son los inventarios mundiales y regionales, el proyecto de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos (recomendado por varias resoluciones de la Asamblea General de las Naciones Unidas) y los acuerdos formales de cooperación interestatal vigentes para seis acuíferos transfronterizos. Sin embargo, hay varios cientos de acuíferos transfronterizos importantes en el mundo. En conjunto, representan una parte considerable de los recursos mundiales de aguas subterráneas y muchos de ellos están conectados a valiosos ecosistemas de agua dulce. Por lo tanto, el aumento de los esfuerzos para establecer una cooperación transfronteriza en materia de acuíferos debe ser una prioridad.

14.2.8 La política y la planificación de las aguas subterráneas proporcionan hojas de ruta para una acción concertada

Es necesario prestar la debida atención a la política y la planificación, con el fin de proporcionar una guía para la gobernanza de las aguas subterráneas y para las actividades de gestión de las aguas subterráneas coherentes y concertadas, en beneficio de toda la sociedad. La política de aguas subterráneas debe depender de la situación jurídica y la naturaleza de la propiedad de las aguas subterráneas (pública o privada) de los usuarios del agua, de las características de las aguas superficiales interrelacionadas y del uso del suelo en las áreas de recarga de los acuíferos. Asimismo, debe prever la toma de decisiones integrada sobre los recursos hídricos subterráneos y los sistemas acuíferos, y conectar con otros sectores y ámbitos de la sociedad más allá del sector del agua, como el desarrollo socioeconómico, la igualdad de género y la reducción de la pobreza, la alimentación y la energía, los ecosistemas, el cambio climático y la salud humana.

Los procesos abiertos y participativos de planificación de las aguas subterráneas pueden generar un mayor apoyo y aceptación pública del plan resultante y, por extensión, de la gestión operativa. Esta planificación implica a científicos, especialistas en gestión de recursos, partes interesadas y responsables de la toma de decisiones, y debe ser accesible a los no especialistas, invitando a los usuarios a participar. La planificación de los recursos hídricos subterráneos compete tanto a los organismos gubernamentales como a los usuarios finales, de forma colectiva o individual. A escala local, la recopilación de datos y el análisis de la información serán necesariamente limitados; sin embargo, todos los niveles pueden beneficiarse del desarrollo de capacidades y la sensibilización. Asimismo, los datos desglosados por sexo y la garantía de la participación de las mujeres en la generación de datos y en la toma de decisiones (normalmente dominada por los hombres) son vitales para adquirir una dimensión de género.

Los procesos abiertos y participativos de planificación de las aguas subterráneas pueden generar un mayor apoyo y aceptación pública del plan resultante y, por extensión, de la gestión operativa

Los planes de gestión de las aguas subterráneas traducen la política en un programa de acción, proporcionando un plan para su aplicación. Para gestionar las extracciones de aguas subterráneas pueden utilizarse diversas herramientas. Las herramientas que se utilicen dependerán del enfoque de gestión definido por los regímenes de gobernanza y política vigentes. No toda la gestión se realiza a través del gobierno: por ejemplo, las comunidades y/o los propios usuarios de las aguas subterráneas pueden optar por gestionar de forma independiente la ubicación de los pozos y las extracciones de aguas subterráneas. Cuando las aguas subterráneas han estado históricamente sujetas a una regulación mínima o nula, los usuarios de aguas subterráneas pueden considerar las acciones de gestión como una expropiación de la propiedad privada. Permitir usos exentos, como el uso doméstico o la ganadería, o una cantidad fija de bombeo inframarginal (normalmente un pequeño volumen de agua que puede ser bombeado sin estar sujeto a regulaciones o tarifas, generalmente con el fin de satisfacer las necesidades humanas básicas o la agricultura doméstica), puede ayudar a superar la resistencia al control mediante la regulación y la fijación de precios. Sin embargo, hay que tener cuidado para garantizar que los usos exentos no socavan los objetivos de gestión. La equidad es una consideración importante, ya que las acciones de gestión que afectan de forma diferenciada a los bombeadores y a los usuarios de aguas subterráneas pueden dar lugar a conflictos.

Las interrelaciones entre los acuíferos y las aguas superficiales, el uso de la tierra, los ecosistemas y el uso del espacio y los recursos del subsuelo implican que la política y la planificación de las aguas subterráneas deben integrarse en un contexto político más amplio (es decir, una integración horizontal), ya que cada uno de ellos está directamente relacionado con la disponibilidad y la calidad de las aguas subterráneas. Enfoques como la recarga gestionada de acuíferos (MAR) y la gestión conjunta del agua abarcan estas interrelaciones. También debe explorarse el potencial y la viabilidad de aprovechar los recursos hídricos subterráneos no convencionales (por ejemplo, aguas subterráneas salobres, aguas subterráneas dulces o salobres en alta mar).

14.2.9 Financiación: el combustible para la acción

La gobernanza y la gestión de las aguas subterráneas requieren una importante financiación estructural. Sin embargo, los mecanismos de asignación de fondos gubernamentales o de obtención de fondos de fuentes privadas están en muchos casos bastante poco desarrollados. En muchos países no existe un precio o tarifa para las aguas subterráneas, especialmente para la irrigación, en parte debido a las dificultades de control y aplicación, y a la importancia política del sector agrícola (que también se traduce en la falta de voluntad política).

Si las aguas subterráneas se incluyen como parte de la infraestructura de abastecimiento de agua distribuida, la tarifa del agua, si se fija correctamente, puede proporcionar financiación para la gestión de las aguas subterráneas. Sin embargo, incluso la recuperación de los costes es un reto en la mayoría de los países y los costes de la gestión de los recursos hídricos rara vez se reflejan en la factura del agua. Por lo tanto, la gestión de los recursos hídricos se financia mediante una combinación de tasas de extracción, cánones o tarifas, cánones por efluentes o contaminación, impuestos, presupuestos gubernamentales y ayuda oficial al desarrollo (AOD). Además, existen oportunidades para integrar mejor el desarrollo y la gestión sostenible de las aguas subterráneas como parte de los proyectos e iniciativas del sector del agua. Por ejemplo, los proyectos de MAR pueden incluirse como parte del abastecimiento de agua urbana para añadir seguridad y flexibilidad en caso de variación estacional de los recursos. También merece la pena analizar y comprender mejor los costes y beneficios de la gestión de las aguas subterráneas (y de la inacción) en términos económicos, teniendo en cuenta los costes de oportunidad, las externalidades y los beneficios sociales y medioambientales. Esto podría ayudar a situar las cuestiones relativas a las aguas subterráneas en un lugar más destacado de la agenda política para garantizar el compromiso y aprovechar los diferentes tipos de financiación.

14.3 Coda

Los recursos totales de agua subterránea de la Tierra representan un enorme abastecimiento de agua dulce. En un mundo con una demanda de agua cada vez mayor, en el que los recursos hídricos superficiales suelen ser escasos y están cada vez más estresados, el valor de las aguas subterráneas está a punto de ser reconocido progresivamente por todos, como un recurso que ha permitido el florecimiento de las sociedades humanas desde hace milenios. Sin embargo, a pesar de su abundancia general, las aguas subterráneas siguen siendo vulnerables a la sobreexplotación y la contaminación, que pueden tener efectos devastadores sobre el recurso y su disponibilidad. Para liberar todo el potencial de las aguas subterráneas será necesario realizar esfuerzos firmes y concertados para gestionarlas y utilizarlas de forma sostenible. Y todo empieza por hacer visible lo invisible.

Referencias

Abd-El-Mooty, M., Kansoh, R. y Abdulhadi, A. 2016. Desafíos de los recursos hídricos en el Iraq. *Hydrology Current Research*, Vol. 07, No. 4. doi.org/10.4172/2157-7587.1000260.

Abdolvand, B., Mez, L., Winter, K., Mirsaeedi-Gloßner, S., Schütt, B., Rost, K. T. y Bar, J. 2015. La dimensión del agua en Asia Central: Preocupaciones de seguridad y el largo camino del desarrollo de capacidades. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 73, No. 2, pp. 897-912. doi.org/10.1007/s12665-014-3579-9.

Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E. y Deguchi, T. 2011. El hundimiento del terreno de Yakarta (Indonesia) y su relación con el desarrollo urbano. *Natural Hazards*, Vol. 59, Artículo 1753. doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9.

ACTO (Amazon Cooperation Treaty Organization). 2018. *Programa de Acciones Estratégicas: Estrategia Regional para la Gestión Integrada de los Recursos, Hídricos de la Cuenca Amazónica* [Strategic Action Programme, Regional Strategy for the Integrated Management of the Water Resources in the Amazon River Basin]. Brasília, OTCA.
otca.org/wp-content/uploads/2021/02/Programa-de-Acciones-Estrategicas-PAE.pdf. (En español).

Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., Arkin, P. y Nelkin, E. 2003. The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, pp. 1147-1167. doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.

AEMA (Agencia Europea de Medio Ambiente). 2013. *Evaluación de la recuperación de costes mediante la tarificación del agua.* Informe técnico de la AEMA nº 16/2013. Luxemburgo, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
www.eea.europa.eu/publications/assessment-of-full-cost-recovery.

AFD (Agencia Francesa de Desarrollo). 2011. *Hacia una gestión conjunta de los sistemas acuíferos transfronterizos*. Guía metodológica. À Savoir. París, AFD.
www.afd.fr/en/ressources/toward-joint-management-transboundary-aquifer-systems.

AGNU (Asamblea General de las Naciones Unidas). 2007. *Declaración de las Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas.* Resolución adoptada por la Asamblea General el 13 de septiembre de 2007. Sexagésimo primer periodo de sesiones. A/RES/61/295. undocs.org/A/RES/61/295.

____. 2009. *El derecho de los acuíferos transfronterizos*. Resolución adoptada por la Asamblea General el 11 de diciembre 2008.
Sexagésima tercera sesión. A/RES/63/124. undocs.org/en/A/RES/63/124.

____. 2010. *El derecho humano al agua y al saneamiento.* Resolución adoptada por la Asamblea General el 28 de julio de 2010.
Sexagésimo cuarto periodo de sesiones. A/RES/64/292. undocs.org/A/RES/64/292.

____. 2012. *La Ley de los Acuíferos Transfronterizos.* Resolución adoptada por la Asamblea General el 9 de diciembre de 2011.
Sexagésimo sexto periodo de sesiones. A/RES/66/104. undocs.org/A/RES/66/104.

____. 2013. *El derecho de los acuíferos transfronterizos*. Resolución adoptada por la Asamblea General el 16 de diciembre de 2013. Sexagésimo octavo periodo de sesiones. A/RES/68/118. undocs.org/A/RES/68/118.

____. 2016. *El derecho de los acuíferos transfronterizos*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 13 de diciembre de 2016. Septuagésimo primer periodo de sesiones. A/RES/71/150. undocs.org/A/RES/71/150.

____. 2019. *El derecho de los acuíferos transfronterizos*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 18 de diciembre de 2019. Septuagésimo cuarto periodo de sesiones. A/RES/74/193. undocs.org/A/RES/74/193.

Aguilar-Barajas, I., Mahlknecht, J., Kaledin, J., Kjellén, M. y Mejía-Betancourt, A. (eds.). 2015. *Agua y ciudades en América Latina: Desafíos para el desarrollo sostenible.* Abingdon, Reino Unido, Routledge.

AGW-Net/BGR/IWMI/CapNet/ANBO/IGRAC (Africa Groundwater Network/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/International Water Management Institute/CapNet/African Network of Basin Organisations/International Groundwater Resources Assessment Centre). 2015. *Integration of Groundwater Management into Transboundary Basin Organizations in Africa - a Training Manual by AGW-Net, BGR, IWMI, CapNet, ANBO, & IGRAC*. www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Politikberatung_GW/Downloads/Module_8.pdf;jsessionid=90B6565898E0E86B50FB53B57B2DE9E6.1_cid284?__blob=publicationFile&v=5.

Ahmed, K. M., Islam, R., Hasan, M. A., Sultana, S., Groen, K., Tuinhof, A., Winkle, T., Onabolu, B., Akhter, N., Mahmud, M. N. y Rahman, M. S. 2018. *Una solución basada en la naturaleza, innovadora y de bajo costo para el abastecimiento de agua potable resistente a los desastres en la costa de Bangladesh: El uso de la recarga gestionada de acuíferos (MAR) para amortiguar el almacenamiento de agua y protegerla contra la entrada de agua salada*. Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP), Groundwater-Based Natural Infrastructure. gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/water-quality-2/a-nature-based-innovative-and-low-cost-solution-for-disaster-resilient-drinking-water-supply-in-coastal-bangladesh/.

AIE (Agencia Internacional de Energía). 2016a. *Water-energy nexus, excerpt from World Energy Outlook 2016*. París, OECD/IEA. www.iea.org/reports/water-energy-nexus.

____. 2016b. *Key World Energy Statistics 2016.* París, AIE. doi.org/10.1787/key_energ_stat-2016-en.

____. 2019a. *Perspectivas de la energía en África 2019. Extracto del informe especial World Energy Outlook 2019.* París, AIE. www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019.

____. 2019b. *Renovables 2019: Análisis y previsión hasta 2024.* París, AIE. doi.org/10.1787/b3911209-en.

AIH (Asociación Internacional de Hidrólogos). 2005. *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in Semi-Arid Areas.* París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000143819?1=null&queryId=876e1340-864a-48fd-9bbd-1b672f0de516.

____. 2015. *Ciudades resilientes y aguas subterráneas*. IAH Strategic Overview Series. iah.org/wp-content/uploads/2015/12/IAH-Resilient-Cities-Groundwater-Dec-2015.pdf.

____. 2017. Los ODM de la ONU para 2030: *Indicadores esenciales para las aguas subterráneas*. AIH. https://iah.org/wp-content/uploads/2017/04/IAH-Groundwater-SDG-6-Mar-2017.pdf.

____. 2018. *Empresas mineras y aguas subterráneas*. IAH Strategic Overview Series. iah.org/wp-content/uploads/2018/12/IAH_SOS_MiningEnterprisesGroundwater.pdf.

Alam, M. F. y Foster, S. 2019. Prioridades políticas para el auge de los pozos privados urbanos. *The Source*, noviembre de 2019, pp. 54-57. www.thesourcemagazine.org/policy-priorities-for-the-boom-in-urban-private-wells/.

Albrecht, T. R., Varady, R. G., Zuniga-Teran, A. A., Gerlak, A. K. y Staddon, C. 2017. Gobernando un recurso oculto compartido: Una revisión de los mecanismos de gobernanza para la seguridad de las aguas subterráneas transfronterizas. *Water Security*, Vol. 2, pp. 43-56. doi.org/10.1016/j.wasec.2017.11.002.

Allan, J. A. 1998. El agua virtual: Un recurso estratégico: Soluciones globales para déficits regionales. *Groundwater*, Vol. 36, No. 4, pp. 545-546.

____. 2003. Agua virtual: el nexo entre agua, alimentos y comercio. ¿Concepto útil o metáfora engañosa? *Water International*, Vol. 28, No. 1, pp. 106-113. doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812.

Allan, R. P., Soden, B. J., John, V. O., Ingram, W. y Good, P. 2010. Cambios actuales en las precipitaciones tropicales. *Environmental Research Letters*, Vol. 5, No. 2, Artículo 025205. doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025205.

Allen, D. M., Whitfield, P. H. y Werner, A. 2010. Groundwater level responses in temperate mountainous terrain: Regime classification, and linkages to climate and streamflow. *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 23, pp. 3392-3412. doi.org/10.1002/hyp.7757.

Al-Muraikhi, A. A. y Shamrukh, M. 2017. *Panorama histórico de la recarga mejorada de aguas subterráneas en Qatar.* Asociación Internacional de los Hidrogeólogos (AIH). recharge.iah.org/files/2017/11/Qatar-MAR-history-short-paper-29nov17.pdf.

Al-Rukaibi, D. 2010. *The Role of Aquifer Storage and Recovery (ASR) Technique in Sustainability: A Case Study for Kuwait*. Tesis de maestría. Austin, Texas, Universidad de Texas in Austin. repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/10898/CRWR%20online%20report%2010-10.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Altchenko, Y. y Villholth, K. G. 2015. Mapping irrigation potential from renewable groundwater in Africa - a quantitative hydrological approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 2, pp. 1055-1067. doi.org/10.5194/hess-19-1055-2015.

Al-Zubari, W. 2014. *Informe de diagnóstico regional: Región de los Estados Árabes. Informe de diagnóstico regional: Región de los Estados Árabes*. Synthesis Report. ar.unesco.org/sites/default/files/gwg_arab_region_regionaldiagnosis_report.pdf.

Al-Zubari, W. y Alajjawi, S. 2020. *Promoting an EU-GCC Climate Change Agenda: Water Security Priorities*. Instituto Bussola. www.bussolainstitute.org/research/promoting-an-eu-gcc-climate-change-agenda-water-security-priorities.

Al-Zubari, W., Al-Turbak, A., Zahid, W., Al-Ruwis, K., Al-Tkhais, A., Al-Muataz, I., Abdelwahab, A., Murad, A., Al-Harbi, M. y Al-Sulaymani, Z. 2017. Una visión general de la estrategia unificada del agua del CCG (2016-2035). *Desalination and Water Treatment*, Vol. 81, pp. 1-18. doi.org/10.5004/dwt.2017.20864.

Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A. y Ochege, F. U. 2020. Sistema de aguas subterráneas y cambio climático: Estado actual y consideraciones futuras. *Journal of Hydrology*, Vol. 589, Artículo 125163. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163.

Andres, L., Chellaraj, G., Das Gupta, B., Grabinsky, J. y Joseph, G. 2018. *Por qué hay tantos puntos de agua en Nigeria que no funcionan: un análisis empírico de los factores que contribuyen*. Policy Research Working Paper No. 8388. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29568. Licencia: CC BY 3.0 IGO.

Aquastat. s.f. *Aquastat: Sistema mundial de información sobre el agua y la agricultura de la FAO*. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). www.fao.org/aquastat/en/. (Consultado entre abril y septiembre de 2021).

ARCADIS. 2012. *The Role of Water Pricing and Water Allocation in Agriculture in Delivering Sustainable Water Use in Europe*. Informe final. Comisión Europea. ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/agriculture_report.pdf.

Arlosoroff, S., Tschannerl, G., Grey, D., Journey, W., Karp, A., Langenegger, O. y Roche, R. 1987. *Community Water-Supply: The Hand-Pump Option*. Washington, DC, Banco Mundial. documents.worldbank.org/curated/en/299321468765272889/Community-water-supply-the-handpump-option.

Arroyo, V., Ballestero, M. y Mejía, A. 2015. *Inseguridad económica del agua en Latinoamérica: De la abundancia a la inseguridad*. Caracas, Banco de Desarrollo de América Latina (CAF). scioteca.caf.com/handle/123456789/787. (En español).

Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., Horne, A. C., Kendy, E., McClain, M. E., LeRoy Poff, N., Richter, B. D. y Ward, S. 2018. La declaración de Brisbane y la agenda de acción global sobre flujos ambientales. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 6, Artículo 45, pp. 1-15. doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045.

Ashfaq, M., Shi, Y., Tung, W., Trapp, R. J., Gao, X., Pal, J. S. y Diffenbaugh, N. S. 2009. Supresión de las precipitaciones del monzón de verano del sur de Asia en el siglo XXI. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 1, Artículo L01704. doi.org/10.1029/2008GL036500.

Asoka, A., Gleeson, T., Wada, Y. y Mishra, V. 2017. Contribución relativa de la precipitación monzónica y el bombeo a los cambios en el almacenamiento de agua subterránea en la India. *Nature Geoscience*, Vol. 10, No. 2, pp. 109-117. doi.org/10.1038/ngeo2869.

Autoridad de Electricidad y Agua de Sharjah. 2015. *First Operational Aquifer Storage and Recovery System (ASR) Nizwa Site Sharjah Emirates U.A.E*. www.slideshare.net/NathanLopez2/asrsharjah20091214presentation.

AWS (Alianza para la Administración del Agua). 2019. The AWS International Water Stewardship Standard, Version 2.0. a4ws.org/the-aws-standard-2-0/.

Baalbaki, R., Ahmad, S. H., Kays, W., Talhouk, S. N., Saliba, N. A. y Al-Hindi, M. 2019. La ciencia ciudadana en el Líbano - un estudio de caso para el monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas. Royal Society Open Science, Vol. 6, No. 2, Artículo 181871. doi.org/10.1098/rsos.181871.

Bachu, S. 2015. Review of CO_2 storage efficiency in deep saline aquifers. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 40, pp. 188-202. doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.01.007.

Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N. P. y Mathiassen, O. M. 2007. Estimación de la capacidad de almacenamiento de CO_2: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 1, No. 4, pp. 430-443. doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00086-2.

Bahn, G-S. y An, B-C. 2020. Analysis of environmental purification effect of riparian forest with poplar trees for ecological watershed management: Un estudio de caso en la llanura de inundación del embalse de la presa en Corea. *Sustainability*, Vol. 12, No. 17, Article 6871. doi.org/10.3390/su12176871.

Banco Mundial. 2010. *Pozos profundos y prudencia: Towards Pragmatic Action for Addressing Groundwater Overexploitation in India.* Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2835. Licencia: CC BY 3.0 IGO.

____. 2018a. *Evaluación de los desafíos y oportunidades de las aguas subterráneas en apoyo del desarrollo sostenible en el África Subsahariana*. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30266.

____. 2018b. *Aguas residuales: De residuo a recurso - El caso de San Luis Potosí, México. Washington, DC,* Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29491.

____. 2019. *Kiribati - Proyecto de la tercera fase del programa de adaptación de Kiribati.* Washington, DC, Grupo del Banco Mundial. documents.worldbank.org/curated/en/100741561139747493/Kiribati-Third-Phase-of-Kiribati-Adaptation-Program-Project.

____. 2020. *El Banco Mundial firma un acuerdo para mejorar la gestión de las aguas subterráneas en determinados estados de la India*. Comunicado de prensa. www.worldbank.org/en/news/press-release/2020/02/17/improving-groundwater-management-india.

Banerjee, S., Wodon, Q., Diallo, A., Pushak, T., Uddin, H., Tsimpo, C. y Foster, V. 2008. *Acceso, asequibilidad y alternativas: Modern Infrastructure Services in Africa*. Africa Infrastructure Country Diagnostic (AICD) Background paper No. 2. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12558.

Banks, D. 2012. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Segunda edición. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Ltd.

Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., Miralles, D. G., De Jeu, R. A. M., Bruijnzeel, L. A., McVicar, T. R. y Schellekens, J. 2013. Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 12, pp. 7843-7863. doi.org/10.1002/2013WR013918.

Berbel, J., Mar Borrego-Marín, M., Exposito, A., Giannoccaro, G., Montilla-López, N. M. y Roseta-Palma, C. 2019. Análisis de las tarifas e impuestos del agua de irrigación en Europa. *Water Policy*, Vol. 21, No. 4, pp. 806-825. doi.org/10.2166/wp.2019.197.

Bergkamp, G. y Cross, K. 2007. Aguas subterráneas y servicios de los ecosistemas: Hacia su uso sostenible. S. Ragone, A. de la Hera, G. Bergkamp, N. Hernández-Mora y J. McKay, *The Global Importance of Groundwater in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability, January 24-27 2006, Alicante Spain*. Westerville, Ohio, NGWA Press.

Bernat, R. F. A., Megdal, S. B. y Eden, S. 2020. Créditos de almacenamiento a largo plazo: Analyzing market-based transactions to achieve Arizona water policy objectives. *Water*, Vol. 12, No. 2, Artículo 568. doi.org/10.3390/w12020568.

Beven, K. y Germann, P. 2013. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 6, pp. 3071-3092. doi.org/10.1002/wrcr.20156.

Bexfield, L. M., Toccalino, P. L, Belitz, K., Foreman, W. T. y Furlong, E. T. 2019. Hormonas y productos farmacéuticos en aguas subterráneas utilizadas como fuente de agua potable en todo Estados Unidos. *Environmental Science and Technology*, Vol. 53, No. 6, pp. 2950-2960. doi.org/10.1021/acs.est.8b05592.

BGR/UNESCO (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2008. WHYMAP. *Groundwater Resources of the World*. Mapa a escala 1: 25 000 000. Hannover/París, BGR/UNESCO. www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/maps_data_node_en.html;jsessionid=66DD893882B11D6409B9BA3C76B2F141.2_cid292.

Bhutta, M. N. y Smedema, L. K. 2007. Cien años de anegamiento y control de la salinidad en el valle del Indo, Pakistán: A historical review. *Irrigación y Drenaje*, Vol. 56, No. S1, pp. S81-S90. doi.org/10.1002/ird.333.

Bierkens, M. F. P. 2015. Hidrología mundial 2015: Estado, tendencias y direcciones. *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 7, pp. 4923-4947. doi.org/10.1002/2015WR017173.

Bierkens, M. F. P. y Wada, Y. 2019. Uso no renovable de las aguas subterráneas y agotamiento de las aguas subterráneas: Una revisión. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 6, Artículo 063002. doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f.

Bierkens, M. F. P., Reinhard, S., De Bruijn, J. A., Veninga, W. y Wada, Y. 2019. El precio sombra del agua de irrigación en los principales países que agotan las aguas subterráneas. *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 5, pp. 4266-4287. doi.org/10.1029/2018WR023086.

Blomquist, W., Schlager, E. y Heikkila, T. 2010. *Aguas comunes, arroyos divergentes: Linking Institutions and Water Management in Arizona, California, and Colorado*. Routledge.

Boisson, A., Baïsset, M., Alazard, M., Perrin, J., Villesseche, D., Dewandel, B., Kloppmann, W., Chandra, S., Picot-Colbeaux, G., Sarah, S., Ahmed, S. y Maréchal, J. C. 2014. Comparación de los enfoques de balance de aguas superficiales y subterráneas en la evaluación de estructuras de recarga de acuíferos gestionados: Caso de un tanque de percolación en un acuífero cristalino en la India. *Journal of Hydrology*, Vol. 519, Parte B, pp. 1620-1633. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.022.

Bonada, N., Cañedo-Argüelles, M., Gallart, F., Von Schiller, D., Fortuño, P., Latron, J., Llorens, P., Múrria, C., Soria, M., Vinyoles, D. y Cid, N. 2020. Conservación y gestión de charcas aisladas en ríos temporales. *Water*, Vol. 12, No. 10, Article 2870. doi.org/10.3390/w12102870.

Boretti, A. y Rosa, L. 2019. Reevaluación de las proyecciones del Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. npj Clean *Water*, Vol. 2, No. 15. doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9.

Bouchet, L., Thoms, M. C. y Parsons, M. 2019. Las aguas subterráneas como sistema socio-ecológico: Un marco para la gestión de las aguas subterráneas en los pequeños Estados insulares en desarrollo del Pacífico. *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 8, pp. 579-589. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.008.

Boulton, A. J. y Hancock, P. J. 2006. Rivers as groundwater-dependent ecosystems: A review of degrees of dependency, riverine processes and management implications. *Australian Journal of Botany*, Vol. 54, No. 2, pp. 133-144. doi.org/10.1071/BT05074.

Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N. P. y Mathiassen, O. M. 2007. Estimación de la capacidad de almacenamiento de CO_2: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 1, No. 1, pp. 62-68. doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00027-8.

Brauer, M., Zhao, J. T., Benit, F. B. y Stanaway, J. D. 2020. Global access to handwashing: Implications for COVID-19 control in low-income countries. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 128, No. 5. doi.org/10.1289/EHP7200.

Bréthaut, C., Gallagher, L., Dalton, J. y Allouche, J. 2019. Dinámicas de poder e integración en el nexo agua-energía-alimentación: Lecciones de aprendizaje para la investigación transdisciplinaria en Camboya. *Environmental Science & Policy*, Vol. 94, pp. 153-162. doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.010.

Bretzler, A. y Johnson, C. A. 2015. El manual de la contaminación geogénica: Cómo abordar el arsénico y el flúor en el agua potable. *Applied Geochemistry*, Vol. 63, pp. 642-646. doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.08.016.

Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M. y Fedrizzi, R. 2019. Sistemas de calefacción y refrigeración urbana de quinta generación: Una revisión de los casos existentes en Europa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 104, pp. 504-522. doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059.

Burchi, S. 1999. Regulaciones nacionales para las aguas subterráneas: Opciones, problemas y mejores prácticas. S. Salman (ed.), Groundwater: Legal and Policy Perspectives. Documento técnico del Banco Mundial nº 456. Washington, DC, Banco Mundial. elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/0-8213-4613-X.

____. 2012. Una revisión comparativa de la legislación contemporánea sobre recursos hídricos: Tendencias, desarrollos y una agenda de reformas. *Water International*, Vol. 37, No. 6, pp. 613-627. doi.org/10.1080/02508060.2012.694800.

____. 2018a. Principios jurídicos y marcos legales relacionados con las aguas subterráneas. K. G. Villholth, E. López-Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema, pp. 119-136.

____. 2018b. Marcos jurídicos para la gobernanza de los acuíferos transfronterizos internacionales: La experiencia previa y posterior a ISARM. Revista de Hidrología: Estudios Regionales, Vol. 20, pp. 15-20. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.007.

Burchi, S. y Nanni, M. 2003. Cómo influyen la propiedad y los derechos sobre las aguas subterráneas en la gestión del uso intensivo de las mismas. M. R. Llamas y E. Custodio (eds.), Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities. Lisse, Países Bajos, Balkema Publishers, pp. 227-240.

Butterworth, J., Sutton, S. y Mekonta, L. 2013. El autoabastecimiento como modelo complementario de prestación de servicios de agua en Etiopía. *Water Alternatives*, Vol. 6, No. 3, pp. 405-423.

Byrne, M. P. y O'Gorman, P. A. 2015. The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the "Wet-get-wetter, dry-get-drier" scaling does not hold over land. *Journal of Climate*, Vol. 28, No. 20, pp. 8078-8092. doi.org//10.1175/jcli-d-15-0369.1.

Campbell, C. G., Borglin, S. E., Green, F. B., Grayson, A., Wozei, E., Stringfellow, W.T. 2006. Biologically directed environmental monitoring, fate, and transport of estrogenic endocrine disrupting compounds in water: A review. *Chemosphere*, Vol. 65, No. 8, pp. 1265-1280. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.003.

Campuzano, C., Hansen, A. M., De Stefano, L., Martínez-Santos, P., Torrente, D. y Wilaarts, B. A. 2014. Evaluación de los recursos hídricos. B. A. Willaarts, A. Garrido, M. R. Llamas (eds.), *Water for Food and Wellbeing in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a Globalized Economy*. Oxon, Md./Nueva York, Routledge, pp. 27-53.

Cantonati, M., Stevens, L. E., Segadelli, S., Springer, A. E., Goldscheider, N., Celico, F., Filippini, M., Ogata, K. y Gargini, A. 2020. Ecohidrogeología: La convergencia interdisciplinaria necesaria para mejorar el estudio y la gestión de los manantiales y otros hábitats, biota y ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. *Ecological Indicators*, Vol. 110, Artículo 105803. doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105803.

Carstens, A. J. 2013. *Evaluation of Microbiological and Physico-Chemical Quality of Water from Aquifers in the North West Province, South Africa*. Tesis de maestría. Potchefstroom, Sudáfrica, North-West University. repository.nwu.ac.za/handle/10394/8999.

Cashman, A. 2014. Seguridad y servicios de agua en el Caribe. *Water*, Vol. 6, No. 5, pp. 1187-1203. doi.org/10.3390/w6051187.

CBC (Corporación Canadiense de Radiodifusión). 2016. *Why Nestlé's Aberfoyle Well Matters so much to Guelph, Ont., Residents*. www.cbc.ca/news/canada/kitchener-waterloo/nestle-guelph-rally-nestle-water-aberfoyle-1.3779649.

CDC (Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades). s.f. *Industrial Water: Uses in Manufacturing and Industry*. U.S. Department of Health & Human Services. www.cdc.gov/healthywater/other/industrial/index.html#:~:text=Según%20los%20Estados%20Unidos,%2C%20alimentos%2C%20y%20papel%20productos.

CDI (Comisión de Derecho Internacional). 2008. *Proyecto de artículos sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos. Naciones Unidas*. legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/draft_articles/8_5_2008.pdf.

CDP (antes Carbon Disclosure Project). 2018. *Treading Water: Respuestas corporativas a los crecientes desafíos del agua*. Informe mundial sobre el agua de CDP 2018. Londres, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2018.

____. 2020. *La hora de las finanzas verdes*. CDP Financial Services Disclosure Report 2020. Londres, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/financial-services-disclosure-report-2020.

____. 2021. *A Wave of Change: El papel de las empresas en la construcción de un mundo con seguridad hídrica*. CDP Global Water Report 2020. Londres, CDP Worldwide. www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2020.

____. Sin publicar. 2021 datos obtenidos de Cate Lamb (Directora Global de Seguridad del Agua de CDP, CDP y Líder de los Campeones de Acción Climática de Alto Nivel de la COP26 de la CMNUCC - Agua) y Laureen Missaire (CDP, Oficial Senior de Proyectos, Seguridad del Agua).

Celia, M. A. 2017. Almacenamiento geológico de dióxido de carbono capturado como opción de mitigación de carbono a gran escala. *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 5, pp. 3527-3533. doi.org//10.1002/2017WR020841.

CEPE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa). 1992. *Convenio sobre la protección y utilización de los cursos de agua transfronterizos y los lagos internacionales.* Helsinki, 17 de marzo de 1992, CEPE. unece.org/environment-policy/water/about-the-convention/introduction.

____. 2007. *Nuestras aguas: Uniendo las manos a través de las fronteras. Primera evaluación de ríos, lagos y aguas subterráneas transfronterizas.* Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. unece.org/DAM/env/water/blanks/assessment/assessmentweb_full.pdf.

____. 2011. *Segunda evaluación de ríos, lagos y aguas subterráneas transfronterizas.* Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/English/ECE_Second_Assessment_En.pdf.

____. 2013. *Guía para la implementación de la Convención del Agua.* Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. unece.org/environment-policy/publications/guide-implementing-water-convention.

____. 2014. *Disposiciones modelo sobre aguas subterráneas transfronterizas.* Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_model_provisions/ece_mp.wat_40_eng.pdf.

____. 2015. *Nota de orientación política sobre los beneficios de la cooperación en materia de aguas transfronterizas: Identificación, evaluación y comunicación.* Nueva York/Ginebra, Naciones Unidas. unece.org/DAM/env/water/publications/WAT_47_Benefits/ECE_MP.WAT_47_PolicyGuidanceNote_BenefitsCooperation_1522750_E_pdf_web.pdf.

CEPE/OMS. 2019. *Informe regional sobre el estado de aplicación del Protocolo. Reunión de las Partes del Protocolo sobre el Agua y la Salud.* ECE/MP.WH/2019/4-EUPCR/1814149/1.2/2019/MOP-5/10. unece.org/environment-policy/water/areas-work-protocol/improving-governance-water-and-health/fourth-reporting-exercise-under-protocol-water-and-health.

CEPE/UNESCO. 2021. *Progreso en la cooperación en materia de aguas transfronterizas: Situación global del indicador 6.5.2 de los ODS y necesidades de aceleración en 2021.* Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378914?posInSet=1&queryId=957ce00a-0462-4bab-8d10-8c5307999dee.

CESCR (Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales). 2002. *Observación general nº 15: El derecho al agua (arts. 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales).* Vigésimo noveno periodo de sesiones, Ginebra, 11-29 de noviembre de 2002. digitallibrary.un.org/record/486454.

CESPAO (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia). 2015. *Water Development Report 6: The Water, Energy and Food Security Nexus in the Arab Region.* Beirut, Naciones Unidas. www.unescwa.org/publications/escwa-water-development-report-6-water-energy-and-food-security-nexus-arab-region.

____. 2019. *Avanzando hacia la seguridad del agua en la región árabe.* Beirut, Naciones Unidas. archive.unescwa.org/publications/moving-towards-achieving-water-security-arab-region.

____. De próxima aparición. *Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos 9: Las aguas subterráneas en la región árabe.*

CESPAO/BGR (Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental/Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). 2013. *Inventario de recursos hídricos compartidos en Asia Occidental.* Beirut, Naciones Unidas. waterinventory.org/.

CGIAR WLE (Programa de Investigación del CGIAR sobre Agua, Tierra y Ecosistemas). 2015. *Groundwater and Ecosystem Services: A Framework for Managing Smallholder Groundwater-Dependent Agrarian Socio-Ecologies - Applying an Ecosystem Services and Resilience Approach.* Colombo, International Water Management Institute (IWMI). doi.org/10.5337/2015.208.

Chadwick, R. A., Williams, G. A., Williams, J. D. O. y Noy, D. J. 2012. Medición del comportamiento de la presión de un gran acuífero salino durante la inyección de CO_2 a escala industrial: The Utsira Sand, Norwegian North Sea. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 10, pp. 374-388. doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.022.

Chaves, E. 2019. *Informe sobre las condiciones de las aguas subterráneas de Gran Bahama después del huracán Dorian y medidas de mitigación propuestas.*

Chen, J., Tang, C., Sakura, Y., Yu, J. y Fukushima, Y. 2005. Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain. *Hydrogeology Journal,* Vol. 13, No. 3, pp. 481-492. doi.org/10.1007/s10040-004-0321-9.

China Water Risk. 2015. *Nuevo 'Plan Diez del Agua' para salvaguardar las aguas de China.* 16 de abril de 2015. www.chinawaterrisk.org/notices/new-water-ten-plan-to-safeguard-chinas-waters/.

Clarke C. J., George, R. J., Bell, R. W. y Hatton, T. J. 2002. Dryland salinity in south-western Australia: Its origins, remedies, and future research directions. *Soil Research,* Vol. 40, No. 1, pp. 93-113. doi.org/10.1071/SR01028.

Cleaver, C., Franks, T., Boesten, J. y Kiire, A. 2005. *Water Governance and Poverty: What Works for the Poor.* Bradford, UK, Bradford Centre for International Development.

Closas, A. y Molle, F. 2016. *Gobernanza de las aguas subterráneas en Europa.* Informe de proyecto del IWMI nº 3. Colombo, International Water Management Istitute (IWMI). gw-mena.iwmi.org/wp-content/uploads/sites/3/2017/04/Rep.3-Groundwater-governance-in-Europe_final_cover.pdf.

Closas, A. y Rap, E. 2017. Bombeo de aguas subterráneas con energía solar para irrigación: Sostenibilidad, políticas y limitaciones. *Energy Policy,* Vol. 104, pp. 33-37. doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.035.

Closas, A. y Villholth, K. G. 2016. *Contratos de acuíferos: ¿Un medio para resolver la sobreexplotación de las aguas subterráneas en Marruecos?* GRIPP Case Profile Series No. 1. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). gripp.iwmi.org/gripp/publications/case-profile-series/issue-01.pdf.

CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 2021. Registro NDC (provisional). www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx.

Cobbing, J. 2020. Las aguas subterráneas y el discurso de la escasez en el África Subsahariana. *Hydrogeology Journal,* Vol. 28, pp. 1143-1154. doi.org/10.1007/s10040-020-02147-5.

Cobbing, J. y Hiller, B. 2019. Despertar a un gigante dormido: Haciendo realidad el potencial de las aguas subterráneas en el África Subsahariana. *World Development*, Vol. 122, pp. 597-613. doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.06.024.

CoCT (Ciudad del Cabo). 2019. *Nuestro futuro del agua compartido: La estrategia del agua de Ciudad del Cabo. Ciudad del Cabo.* resource.capetown.gov.za/documentcentre/Documents/City%20strategies,%20plans%20and%20frameworks/Cape%20Town%20Water%20Strategy.pdf.

Comisión Europea. 2008. *Protección de las aguas subterráneas en Europa. La nueva directiva sobre aguas subterráneas: Consolidación del marco normativo de la UE.* Luxemburgo, Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4f3c68f2-464d-4502-9086-6fcd1be8ab01.

____. 2011. Estrategia Común de Aplicación de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). *Informe técnico sobre los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas.* Informe técnico nº 6. Unión Europea.

____. 2014a. Directiva Marco del Agua (2000/60/CE). *Informe técnico sobre las metodologías utilizadas para evaluar los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas.* Informe técnico nº 8. Unión Europea. circabc.europa.eu/sd/a/1448ec4b-a1e0-4627-856e-d21e5dbbb4db/Technical_report_No8_methodologies_used_assessing_GWDTEs.pdf.

____. 2014b. Directiva 2014/80/UE de la Comisión Europea, de 20 de junio de 2014, por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L. 182/52. data.europa.eu/eli/dir/2014/80/oj.

____. 2015. *Informe técnico sobre los ecosistemas acuáticos asociados a las aguas subterráneas*. Informe técnico nº 9. Unión Europea. circabc.europa.eu/sd/a/9e261309-369a-405f-8713-082a128b503b/GWAAE_final_Published_Report.pdf.

____. 2006. Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. *Diario Oficial de la Unión Europea,* L. 372/19. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj.

Coulibaly, L., Jakus, P. M. y Keith, J. E. 2014. Modeling water demand when households have multiple sources of water. *Water Resources Research,* Vol. 50, No. 7, pp. 6002-6014. doi.org/10.1002/2013WR015090.

Coyte, R. M., Jain, R. C., Srivastava, S. K., Sharma, K. C., Khalil, A., Ma, L. y Vengosh, A. 2018. Contaminación por uranio a gran escala de los recursos de agua subterránea en la India. *Environmental Science & Technology* Letters, Vol. 5, No. 6, pp. 341-347. doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00215.

Coyte, R. M., Singh, A., Furst, K. E., Mitch, W. A. y Vengosh, A. 2019. Co-ocurrencia de contaminantes geogénicos y antropogénicos en aguas subterráneas de Rajasthan, India. Science of *The Total Environment*, Vol. 688, pp. 1216-1227. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.334.

Crosbie, R. S., McCallum, J. L., Walker, G. R. y Chiew, F. H. S. 2012. Episodic recharge and climate change in the Murray-Darling Basin, Australia. *Hydrogeology Journal,* Vol. 20, pp. 245-261. doi.org/10.1007/s10040-011-0804-4.

Cuthbert, M. O., Ackworth, R. I., Andersen, M. S., Larsen, J. R., McCallum, A. M., Rau, G. C. y Tellam, J. H. 2016. Comprensión y cuantificación de la recarga de agua subterránea enfocada e indirecta de arroyos efímeros utilizando las fluctuaciones del nivel freático. *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 2, pp. 827-840. doi.org/10.1002/2015WR017503.

Cuthbert, M. O., Taylor, R. G., Favreau, G., Todd, M. C., Shamsudduha, M., Villholth, K. G., MacDonald, A. M., Scanlon, B. R., Kotchoni, D. O. V., Vouillamoz, J.-M., Lawson, F. M. A., Adjomayi, P. A., Kashaigili, J., Seddon, D., Sorensen, J. P. R., Ebrahim, G. Y., Owor, M., Nyenje, P. M., Nazoumou, Y., Goni, I., Ousmane, B. I., Sibanda, T., Ascott, M. J., Macdonald, D. M. J., Agyekum, W., Koussoubé, Y., Wanke, H., Kim, H., Wada, Y., Lo, M.-H., Oki, T. y Kukuric, N. 2019a. Controles observados en la resiliencia de las aguas subterráneas a la variabilidad climática en el África Subsahariana. *Nature,* Vol. 572, pp. 230-234. doi.org/10.1038/s41586-019-1441-7.

Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J. y Lehner, B. 2019b. Patrones y dinámicas globales de las interacciones clima-agua subterránea. *Nature Climate Change*, Vol. 9, pp. 137-141. doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4.

D

Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T. y Puma, M. J. 2017. El agotamiento de las aguas subterráneas incrustado en el comercio internacional de alimentos. *Nature*, Vol 543, pp. 700-704. doi.org/10.1038/nature21403.

Danert, K. y Healy, A. 2021. Monitoring groundwater use as a domestic water source by urban households: Analysis of data from Lagos State, Nigeria and Sub-Saharan Africa with implications for policy and practice. *Water*, Vol. 13, No. 4, Artículo 568. doi.org/10.3390/w13040568.

Danert, K., Adekile, D. y Gesti Canuto, J. 2020. La lucha por la profesionalidad de la perforación de pozos en África: Una revisión de una iniciativa de 16 años a través de la red de abastecimiento de agua rural de 2004 a 2020. *Water*, Vol. 12, No. 12, Artículo 3305. doi.org/10.3390/w12123305.

Dangendorf, S., Marcos, M., Wöppelmann, G., Conrad, C. P., Frederikse, T. y Riva, R. 2017. Reevaluación del aumento del nivel medio del mar en el siglo XX. Proceedings of the *National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 114, No. 23, pp. 5946-5951. doi.org/10.1073/pnas.1616007114.

Danielopol, D. L., Griebler, C., Gunatilaka, A. y Notenboom, J. 2003. Estado actual y perspectivas futuras de los ecosistemas de aguas subterráneas. *Environmental Conservation,* Vol. 30, No. 2, pp. 104-130. doi.org/10.1017/S0376892903000109.

Dashora, Y., Dillon, P., Maheshwari, B., Soni, P., Dashora, R., Davande, S., Purohit, R. C. y Mittal, H. K. 2018. Un método simple que utiliza las mediciones de los agricultores aplicadas para estimar la recarga de las presas de control en Rajasthan, India. *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 4, No. 2, pp. 301-316. doi.org/10.1007/s40899-017-0185-5.

Dawoud, M. A. 2019. *Política sostenible de aguas subterráneas salobres en la región árabe.* Policy Brief, Consejo Árabe del Agua y Oficina de la UNESCO/El Cairo.

Deb Roy, A. y Shah, T. 2003. Socio-ecology of groundwater irrigation in India. R. Llamas y E. Custodio (eds.), *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Lisse, Países Bajos, Swets and Zeitlinger Publishers, pp. 307-336.

De Graaf, I. E. M., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H. y Bierkens, M. F. P. 2019. Límites de flujo ambiental al bombeo global de aguas subterráneas. *Nature*, Vol. 574, pp. 90-94. doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4.

De Magny, G. C., Thiaw, W., Kumar, V., Manga, N. M., Diop, B. M., Gueye, L., Kamara, M., Roche, B., Murtugudde, R. y Colwell, R. R. 2012. Brote de cólera en el Senegal en 2005: ¿Fue el clima un factor? *PLoS One,* Vol. 7, No. 8, e44577. doi.org/10.1371/journal.pone.0044577.

Departamento de Energía de los Estados Unidos. 2016. *Vulnerabilidad potencial de las refinerías de petróleo de los Estados Unidos al aumento de la temperatura del agua y/o a la reducción de la disponibilidad de agua.* Resumen ejecutivo del informe final. www.energy.gov/sites/prod/files/2016/03/f30/US%20DOE%20Refinery%20Water%20Study.pdf.

Departamento de Recursos Hídricos de California. 2014. Ley de gestión sostenible de las aguas subterráneas. Consistente en un paquete legislativo de tres proyectos de ley, que incluye el AB 1739 (Dickinson), el SB 1168 (Pavley) y el SB 1319 (Pavley), y los subsiguientes Reglamentos estatales. En vigor desde el 1 de enero de 2019. www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/gmp/docs/sgma/sgma_20190101.pdf.

De Sousa, T. y Berrocal Capdevila, E. 2019. *¿Qué hay en un nombre? Deconstruyendo y definiendo la política pública.* Estado de Nueva Gales del Sur, Australia. 17 de abril de 2019. www.digital.nsw.gov.au/transformation/policy-lab/what-policy.

Dickens, C., Rebelo, L.-M. y Nhamo, L. 2017. *Directrices e indicadores para la meta 6.6 de los ODS*: Cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua a lo largo del tiempo. Informe del International Water Management Institute (IWMI). *Programa de Investigación del CGIAR sobre Agua, Tierra y Ecosistemas* (WLE). www.iwmi.cgiar.org/Publications/wle/reports/guideline_and_indicators_for_target_6-6_of_the_sdgs-5.pdf.

Dierauer, J. R., Whitfield, P. H. y Allen, D. M. 2018. Controles climáticos sobre el escurrimiento y los caudales bajos en las cuencas de montaña del oeste de América del Norte. *Water Resources Research*, Vol. 54, No. 10, pp. 7495-7510. doi.org/10.1029/2018WR023087.

Dieter, C. A., Maupin, M. A., Caldwell, R. R., Harris, M. A., Ivahnenko, T. I., Lovelace, J. K., Barber, N. L. y Linsey, K. S. 2018. *Uso estimado del agua en los Estados Unidos* en 2015. U.S. Geological Survey Circular 1441. Reston, Va., U.S. Geological Survey (USGS). doi.org/10.3133/cir1441.

Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernández, E., Stefan, C., Pettenati, M., Van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., Rossetto, R., Shamrukh, M., Pavelic, P., Murray, E., Ross, A., Bonilla Valverde, J. P., Palma Nava, A., Ansems, N., Posavec, K., Ha, K., Martin, R. y Sapiano, M. 2019. Sesenta años de progreso global en la recarga gestionada de acuíferos. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pp. 1-30. doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z.

Dixon-Jain, P., Norman, R., Stewart, G., Fontaine, K., Walker, K., Sundaram, B., Flannery, E., Riddell, A. y Wallace, L. 2014. *Pacific Island Groundwater and Future Climates*: *Evaluación de la vulnerabilidad regional de primer paso.* Registro 2014/043. Canberra, Geoscience Australia. doi.org/10.11636/Record.2014.043.

Dodds, W. K., Bouska, W. W., Eitzmann, J. L., Pilger, T. J., Pitts, K. L., Riley, A. J., Schloesser, J. T. y Thornbrugh, D. J. 2009. Eutrofización de las aguas dulces de los Estados Unidos: Analysis of potential economic damages. *Environmental Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 12-19. doi.org/10.1021/es801217q.

Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G. y Scanlon, B. R. 2012. Impacto de las extracciones de agua subterránea y superficial en las variaciones de almacenamiento de agua continental. *Journal of Geodynamics,* Vol. 59-60, pp. 143-156. doi.org/10.1016/j.jog.2011.05.001.

Döll, P., Schmied, H. M., Schuh, C., Portmann, F. T. y Eicker, A. 2014. Evaluación a escala global del agotamiento de las aguas subterráneas y las extracciones de agua subterránea relacionadas: Combinando la modelización hidrológica con la información de las observaciones de pozos y los satélites GRACE. *Water Resources Research,* Vol. 50, No. 7, pp. 5698-5720. doi.org/10.1002/2014WR015595.

Doody, T. M., Barron, O. V., Dowsley, K., Emelyanova, I., Fawcett, J., Overton, I. C., Pritchard, J. L., Van Dijk, A. I. J. M. y Warren, G. 2017. Cartografía continental de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas: Un marco metodológico para integrar diversos datos y opiniones de expertos. *Revista de hidrología: Regional Studies*, Vol. 10, pp. 61-81. doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.01.003.

Driscoll, J. P. y Middlemis, H. 2011. *Uso del agua geotérmica: Requisitos y efectos potenciales.* Australian Geothermal Energy Conference 2011, pp. 63-67.

Duker, A., Cambaza, C., Saveca, P., Ponguane, S., Mawoyo, T. A., Hulshof, M., Nkomo, L., Hussey, S., Van den Pol, B., Vuik, R., Stigter, T. y Van der Zaag, P. 2020. Using nature-based water storage for smallholder irrigated agriculture in African drylands: Lessons from frugal innovation pilots in Mozambique and Zimbabwe. *Environmental Science and Policy*, Vol. 107, pp. 1–6. doi.org/10.1016/j.envsci.2020.02.010.

Dutch ATES. 2016. *Dutch Policy on ATES Systems*. dutch-ates.com/wp-content/uploads/2016/09/DutchPolicyOnATESSystems092016.pdf.

Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J. y Huete, A. 2015. Ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas: Recent insights from satellite and field-based studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 10, pp. 4229-4256. doi.org/10.5194/hess-19-4229-2015.

Eckstein, G. 2013. Repensando la gestión de los recursos hídricos subterráneos transfronterizos: Un enfoque local a lo largo de la frontera México-Estados Unidos. *The Georgetown International Environmental Law*, Vol 25, No. 1, pp. 95-128.

____. 2017. *The International Law of Transboundary Groundwater Resources*. London, Routledge.

____. 2018a. *Estado cuantitativo y químico de las aguas subterráneas.* Cuadro de mando (Tableau). Sitio web de la AEMA. www.eea.europa.eu/themes/water/european-waters/water-quality-and-water-assessment/water-assessments/groundwater-quantitative-and-chemical-status.

____. 2018b. *Aguas europeas: Evaluación del estado y las presiones* 2018. Informe de la AEMA nº 7/2018. Luxemburgo, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. doi.org/10.2800/303664.

____. 2019. *El medio ambiente europeo - Estado y perspectivas 2020. Conocimiento para la transición a una Europa sostenible.* Luxemburgo, Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. doi.org/10.2800/96749.

Eficiencia para el acceso. 2019. *Perspectivas de las bombas solares de agua 2019: Tendencias globales y oportunidades de mercado.* Informe elaborado por CLASP/Energy Saving Trust/Dalberg. efficiencyforaccess.org/publications/solar-water-pump-outlook-2019-global-trends-and-market-opportunities.

EIP (Proyecto de integridad ambiental). 2019. *Coal's Poisonous Legacy: Groundwater Contaminated by Coal Ash across the U.S.* environmentalintegrity.org/reports/coals-poisonous-legacy/.

Ellis, E. C. y Ramankutty, N. 2008. Poniendo a la gente en el mapa: Biomas antropogénicos del mundo. *Frontiers in Ecology and the Environment,* Vol. 6, No. 8, pp. 439-447. doi.org/10.1890/070062.

Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutiérrez, V., Van Noordwijk, M., Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Bargués Tobella, A., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebreyohannis Gebrehiwot, S., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. y Sullivan, C. A. 2017. Árboles, bosques y agua: Ideas frías para un mundo caliente. *Global Environmental Change*, Vol. 43, pp. 51-61. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002.

English, P. W. 1968. The origin and spread of qanats in the Old World. *Proceedings of the American Philosophical Society*, Vol 112, No. 3, pp. 170–181.

Erwin, K. L. 2009. Los humedales y el cambio climático global: El papel de la restauración de humedales en un mundo cambiante. *Wetlands Ecology and Management*, Vol. 17, pp. 71-84. doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1. Espindola, I. B., Telarolli Almeida de Leite, M. L. y Ribeiro, W. C. 2020. Aguas transfronterizas sudamericanas: La gestión del sistema acuífero Guaraní y la cuenca del Plata hacia el futuro. R. C. Brears (ed.), *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies.* Cham, Suiza, Palgrave Macmillan, pp. 1-35. doi.org/10.1007/978-3-030-32811-5_51-1.

Eurostat. s.f. Base de datos en línea de la Comisión Europea. https://ec.europa.eu/eurostat/data/database. (Consultada entre abril y octubre de 2021).

EUWI+ (Iniciativa de la Unión Europea sobre el Agua Plus para los países de la Asociación Oriental). 2020. *Desarrollo del Proyecto de Plan de Gestión de la Cuenca del Río Alazani-Iori en Georgia.* Informe EUWI+ ENI/2016/372-403. Versión 1.1; marzo de 2020. Viena/París, Umweltbundesamt GmbH/Office International de'l Eau (OIEau). www.eiec.gov.ge/getattachment/b4585a39-30e5-4ac4-9fb7-1fcc204052f4/Thematic_Summary_Alazani-Iori-river-basin_ENG.pdf.aspx.

Evans, R. S. y Dillon, P. 2018. Vinculación de las aguas subterráneas y superficiales: La gestión conjunta del agua. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance.* Leiden, Países Bajos, CRC Press, Taylor & Francis Group/Balkema, pp. 329-351.

Facts & Factors. 2020. Bottled Water Market By Type (Still Bottled Water, Carbonated Bottled Water, Flavoured Bottled Water, and Functional Bottled Water) and By End-Use (Packaging, Consumer Goods, and Agriculture): Global Industry Outlook, Market Size, Business Intelligence, Consumer Preferences, Statistical Surveys, Comprehensive Analysis, Historical Developments, Current Trends, and Forecasts, 2020–2026. www.fnfresearch.com/bottled-water-market-by-type-still-bottled-water-713.

Famiglietti, J. S. 2014. La crisis global de las aguas subterráneas. *Nature Climate Change*, Vol. 4, pp. 945-948. doi.org/10.1038/nclimate2425.

Fan, Y., Li, H. y Miguez-Macho, G. 2013. Patrones globales de la profundidad del nivel freático. *Science,* Vol. 339, No. 6122, pp. 940-943. doi.org/10.1126/science.1229881.

Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B. y Otero-Casal, C. 2017. Regulación hidrológica de la profundidad de enraizamiento de las plantas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 114, No. 40, pp. 10572-10577. doi.org/10.1073/pnas.1712381114.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2012. *Directrices voluntarias sobre la gobernanza responsable de la tenencia de la tierra, la pesca y los bosques en el contexto de la seguridad alimentaria nacional.* Roma, FAO. www.fao.org/nr/tenure/voluntary-guidelines/en/.

____. 2013. *Directrices para el control de la contaminación del agua procedente de la agricultura en China: Desvinculación de la contaminación del agua de la producción agrícola*. Informes de la FAO sobre el agua nº 40. Roma, FAO. www.fao.org/3/i3536e/i3536e.pdf.

____. 2017. *El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos. Roma,* FAO. www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf.

____. 2018a. *Más gente, más alimentos, ¿peor agua? Una revisión global de la contaminación del agua por la agricultura.* Roma/Colombo, FAO/International Water Management Institute (IWMI). www.fao.org/3/CA0146EN/ca0146en.pdf.

____. 2018b. *Los beneficios y el riesgo de la irrigación con energía solar - Una visión global. Roma,* FAO. www.fao.org/3/I9047EN/i9047en.pdf.

____. 2019. *Incorporación de los flujos ambientales en el indicador 6.4.2 de "estrés hídrico": Directrices para un método estándar mínimo para la presentación de informes mundiales.* Roma, FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/ca3097en/.

____. 2020. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020: Superar los desafíos del agua en la agricultura.* Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb1447en.

____. 2021. *El estado de los recursos mundiales de tierra y agua para la alimentación y la agricultura: Sistemas en punto de ruptura.* Informe de síntesis 2021. Roma, FAO. doi.org/10.4060/cb7654en.

Faostat. s.f. *Datos sobre la alimentación y la agricultura*. Roma, FAO. www.fao.org/faostat/en/#home. (Consultado el 5 de octubre de 2021).

Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N. y Leduc, C. 2009. Desmonte de tierras, variabilidad climática y aumento de los recursos hídricos en el suroeste semiárido del Níger: Una revisión. *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 7, Article W00A16. doi.org/10.1029/2007WR006785.

Ferguson, G. y Gleeson, T. 2012. Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 2, pp. 342–345. doi.org/10.1038/nclimate1413.

Ferguson, G., Cuthbert, M. O., Befus, K., Gleeson, T. y McIntosh, J. C. 2020. Repensando la edad de las aguas subterráneas. *Nature Geoscience,* Vol. 13, No. 9, pp. 592-594. doi.org/10.1038/s41561-020-0629-7.

Ferguson, G., McIntosh, J. C., Warr, O., Sherwood Lollar, B., Ballentine, C. J., Famiglietti, J. S., Kim, J-H., Michalski, J. R., Mustard, J. F., Tarnasad, J. y MacDonnell, J. J. 2021. Los volúmenes de agua subterránea de la corteza son mayores de lo que se pensaba. *Geophysical Research Letters*, Vol. 48, No. 16, Artículo e2021GL093549. doi.org/10.1029/2021GL093549.

Ferrero, G., Setty, K., Rickert, B., George, S., Rinehold, A., DeFrance, J. y Bartram, J. 2019. Enfoques de capacitación y formación para los planes de seguridad del agua: Una revisión exhaustiva de la literatura. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 222, No. 4, pp. 615-627. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.01.011.

Finley, R. J. 2014. Una visión general de la cuenca de Illinois - Proyecto Decatur. *Greenhouse Gases: Science and Technology,* Vol. 4, No. 5, pp. 571-579. doi.org/10.1002/ghg.1433.

Foster, S. 2020. Panorama político global de las aguas subterráneas en el desarrollo urbano - ¡Una historia de 10 ciudades! *Water,* Vol. 12, No. 2, Artículo 456. doi.org/10.3390/w12020456.

Foster, S. y Chilton, J. 2003. Las aguas subterráneas: The processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences,* Vol. 358, No. 1440, pp. 1957-1972. doi.org/10.1098/rstb.2003.1380.

____. 2018. Groundwater management: Policy principles & planning practices. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido and J. van der Gun (eds.), *Advances in groundwater governance*. Leiden, The Netherlands, CRC Press/Balkema, pp. 73–95.

Foster, S. y Garduño, H. 2009. Appropriate Groundwater Management for Latin America. Lecciones de experiencias internacionales [Appropriate Groundwater Management for Latin America. Lessons from International Experience]. *Aqua-LAC Journal*, Vol. 1, No. 1. doi.org/10.29104/phi-aqualac/2009-v1-1-01.

Foster, S. y Hirata, R. 2012. Uso de las aguas subterráneas para el desarrollo urbano: Aumentando los beneficios y reduciendo los riesgos. *On the Water Front*, Vol. 3, pp. 21-29.

Foster, S. y Loucks, D. P. (eds.). 2006. *Non-Renewable Groundwater Resources: A Guidebook on Socially-Sustainable Management for Water-Policy Makers.* Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000146997?posInSet=1&queryId=4b3dd499-0696-45d2-9f10-9feda13c7d4f.

Foster, S. y Shah, T. 2012. *Groundwater Resources and Irrigated Agriculture – Making a Beneficial Relation more Sustainable.* GWP Perspectives Paper. Stockholm, Global Water Partnership (GWP). www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/04-groundwater-resources-and-irrigated-agriculture-2012.pdf.

Foster, S., Koundouri, P., Tuinhof, A., Kemper, K., Nanni, M. y Garduño, H. 2006. *Groundwater Dependent Ecosystems: The Challenge of Balanced Assessment and Adequate Conservation.* GW-MATE Briefing Note Series No. 15. Washington, DC, World Bank Group. documents.worldbank.org/curated/en/717061468155365572/Groundwater-dependent-ecosystems-the-challenge-of-balanced-assessment-and-adequate-conservation.

Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F. y Schiffler, M. 2008. *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability.* Water P-Notes No. 19. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11749.

Foster, S., Van Steenbergen, F., Zuleta, J. y Garduño, H. 2010a. *Uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales: De la estrategia de afrontamiento espontáneo a la gestión adaptativa de los recursos.* GW-MATE Strategic Overview Series No. 2. Washington, DC, Grupo del Banco Mundial. documents.worldbank.org/curated/en/874731468315319173/Conjunctive-use-of-groundwater-and-surface-water-from-spontaneous-coping-strategy-to-adaptive-resource-management.

Foster, S., Hirata, R. y Garduño, H. 2010b. *Urban Groundwater Use Policy – Balancing the Benefits and Risks in Developing Nations*. GW-MATe Strategic Overview Series No. 3. Washington, DC, Grupo del Banco Mundial.

Foster, S., Garduño, H., Tuinhof, A. y Tovey, C. 2010c. *Gobernanza de las aguas subterráneas: Marco conceptual para la evaluación de disposiciones y necesidades.* GW-MATE Strategic Overview Series No. 1. Washington, DC, Banco Mundial. documents.worldbank.org/curated/en/603871468323116801/Groundwater-governance-conceptual-framework-for-assessment-of-provisions-and-needs.

Foster, S., Tuinhof, A. y Van Steenbergen, F. 2012. Managed groundwater development for water-supply security in Sub-Saharan Africa: Investment priorities. *Water SA*, Vol. 38, No. 3, pp. 359–366. doi.org/10.4314/wsa.v38i3.1.

Foster, S., Evans, R. y Escolero, O. 2015. El plan de gestión de aguas subterráneas: Elogio de una descuidada "herramienta de nuestro oficio". *Hydrogeology Journal*, Vol. 23, No. 5, pp. 847-850. doi.org/10.1007/s10040-015-1261-2.

Foster, S., Bousquet, A. y Furey, S. 2018. El uso urbano de las aguas subterráneas en el África tropical: ¿un factor clave para mejorar la seguridad del agua? *Water Policy*. Vol. 20, No. 5, pp. 982-994. doi.org/10.2166/wp.2018.056.

Foster, S., Gathu, J., Eichholz, M. y Hirata, R. 2020a. Climate change: El papel de las aguas subterráneas de utilidad en la seguridad del abastecimiento. *The Source*, abril de 2020, pp. 50-54. www.thesourcemagazine.org/climate-change-the-utility-groundwater-role-in-supply-security/.

Foster, S., Mielby, S., Hirata, R., Tubic, A. y Gathu, J. 2020b. Gestión de la calidad de las aguas subterráneas para la seguridad del abastecimiento urbano. *The Source*, julio de 2020, pp. 45-49. www.thesourcemagazine.org/groundwater-quality-management-for-urban-supply-security/.

Foster, S., Eichholz, M., Nlend, B. y Gathu, J. 2020c. Garantizar el papel crítico de las aguas subterráneas para el abastecimiento de agua resiliente en las zonas urbanas de África. *Water Policy*, Vol. 22, No. 1, pp. 121-132. doi.org/10.2166/wp.2020.177.

Fraser, C. M., Kalin, R. M., Rivett, M. O., Nkhata, M. y Kanjaye, M. 2018. Un enfoque nacional para la evaluación y conceptualización sistemática de acuíferos transfronterizos a escalas relevantes: Un estudio de caso de Malawi. *Revista de hidrología: Regional Studies,* Vol. 20. pp. 35–48. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.001.

Fraser, C. M., Kalin, R. M., Kanjaye, M. y Uka, Z. 2020. Una evaluación nacional basada en la frontera de las unidades acuíferas transfronterizas de Malawi: Hacia la consecución del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.5.2. *Journal of Hydrology: Regional Studies,* Vol. 31, Artículo 100726. doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100726.

Frątczak, W., Michalska-Hejduk, D., Zalewski, M. y Izydorczyk, K. 2019. Reducción efectiva de fósforo mediante una zona de amortiguación vegetal ribereña mejorada con una barrera a base de piedra caliza. *Ecological Engineering,* Vol. 130, pp. 94-100. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.015.

Freeze, R. A. y Cherry, J. A. 1979. *Groundwater.* Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall Inc.

Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A. y Rybach, L. 2008. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. *Proceedings of the IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources*. Presented at the IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Lübeck, Germany, pp. 59–80. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/proc-renewables-lubeck.pdf.

G

GAA (Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní). 2020. *Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní*. www.internationalwaterlaw.org/documents/regionaldocs/Guarani_Aquifer_Agreement-English.pdf.

Gage, A. y Milman, A. 2020. Planes de aguas subterráneas en los Estados Unidos: Marcos normativos y objetivos de gestión. *Groundwater*, Vol. 59, No. 2, pp. 175-189. doi.org/10.1111/gwat.13050.

García, G. D. H. 2015. *Subcomponent II.3, Groundwater for the Transboundary Diagnostic Analysis:* Characterization and Diagnostic of Goundwater in the Río de la Plata Basin [Subcomponent II.3, Aguas subterráneas para el ADT: *Caracterización y diagnóstico transfronterizo relacionado a las aguas subterráneas de la cuenca del Plata*] cicplata.org/wp-content/uploads/2019/08/Agua-subterr%C3%A1nea_Garc%C3%ADa-Segredo.pdf. (En español).

Garduño, H. y Foster, S. 2010. *Irrigación sostenible de aguas subterráneas: Enfoques para conciliar la demanda con los recursos.* GW-MATE Strategic Overview Series No. 4. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27818.

Gaye, C. B. y Tindimugaya, C. 2019. Revisión: Desafíos y oportunidades para la gestión sostenible de las aguas subterráneas en África. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pp. 1099-1110. doi.org/10.1007/s10040-018-1892-1.

Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y. y Van der Meer, Th. H. 2008. *Water Footprint of Bio-Energy and Other Primary Energy Carriers.* Value of Water Research Report Series No. 29. Delft, Países Bajos, Instituto UNESCO-IHE para la Educación relativa al Agua.

Gerlak, A. K., Medgal, S. B., Varady, R. G. y Richards, H. 2013. Gobernanza de las aguas subterráneas en los Estados Unidos: Resumen de los resultados de la encuesta inicial. Mayo de 2013. *Universidad de Arizona. wrrc.arizona.edu/sites/wrrc.arizona.edu/files/pdfs/GroundwaterGovernanceReport*-FINALMay2013.pdf.

Gerland, P., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B. K., Chunn, J., Lalic, N., Bay, G., Buettner, T., Heilig, G. K. y Wilmoth, J. 2014. La estabilización de la población mundial es improbable este siglo. *Science*, Vol. 346, No. 6206, pp. 234-237. doi.org/10.1126/science.1257469.

Gilbrich, W. H. y Struckmeier, W. F. 2014. *50 años de actividades de cartografía hidro(geo)lógica*. París, UNESCO.

Giménez, R., Mercau, J., Nosetto, M., Páez, R. y Jobbágy, E. 2016. La huella ecohidrológica de la deforestación en el Chaco semiárido: Perspectivas de los últimos remanentes de bosque de un paisaje altamente cultivado. *Hydrological Processes,* Vol. 30, No. 15, pp. 2603-2616. doi.org/10.1002/hyp.10901.

Giordano, M. 2006. El uso de las aguas subterráneas para la agricultura y los medios de vida rurales en el África Subsahariana: A first-cut assessment. *Hydrogeology Journal,* Vol. 14, No. 3, pp. 310-318. doi.org/10.1007/s10040-005-0479-9.

____. 2009. ¿Aguas subterráneas globales? Problemas y soluciones. *Annual Review of Environment and Resources,* Vol. 34, No. 1, pp. 153-178. doi.org/10.1146/annurev.environ.030308.100251.

Glazema, R. 2003. *Windenergie. Cursus Duurzame Energie in Ontwikkelingslanden* [Energía eólica. Cursus Energía sostenible en países en desarrollo]. Enschede, Países Bajos, Universidad de Twente. www.wot.utwente.nl/publications/cde/windenergie.pdf. (en neerlandés).

Gleeson, T. y Richter, B. 2017. ¿Cuánta agua subterránea podemos bombear y proteger los flujos ambientales a través del tiempo? Normas presuntivas para la gestión conjunta de acuíferos y ríos. *River Research and Applications,* Vol. 34, No. 1, pp. 83-92. doi.org/10.1002/rra.3185.

Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P. y Van Beek, L. P. H. 2012. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, Vol. 488, No. 7410, pp. 197–200. doi.org/10.1038/nature11295.

Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E. y Cardenas, M. B. 2016. El volumen global y la distribución de las aguas subterráneas modernas. *Nature Geoscience*, Vol. 9, pp. 161-167. doi.org/10.1038/ngeo2590.

Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Putkka, M., Zipper, S. C., Jaramillo, F., Gerten, D., Fetzer, I., Cornell, S. E., Piemontese, L., Gordon, L. J., Rockström, J., Oki, T., Sivapalan, M., Wada, Y., Brauman, K. A., Flörke, M., Bierkens, M. F. P., Lehner, B., Keys, P., Kummu, M., Wagener, T., Dadson, S., Troy, T. J., Steffen, W., Falkenmark, M. y Famiglietti, J. S. 2020a. Iluminando las modificaciones del ciclo del agua y la resiliencia del sistema terrestre en el Antropoceno. *Water Resources Research,* Vol. 56, No. 4. doi.org/10.1029/2019WR024957.

Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G. y Perrone, D. 2020b. Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 48, pp. 431–463. doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251.

Gobierno de Alberta. 2019. *Proyecto de captura y almacenamiento de carbono de Quest. Annual Summary Report 2019.* open.alberta.ca/publications/quest-carbon-capture-and-storage-project-annual-report-2019.

Gobierno del Canadá. 2013. *Water Sources: Groundwater.* www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/water-overview/sources/groundwater.html#sub5.

Gobierno de Kazajstán. 2018. *Kazakhstan do 2025 goda i priznanii utrativšimi silu nekotorych ukazov Prezidenta Respubliki Kazakhstan. Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan ot 15 fevralja 2018 goda № 636*. [Aprobación del Plan de Desarrollo Estratégico de la República de Kazajstán hasta 2025 e invalidación de algunos decretos del Presidente de la República de Kazajstán. Decreto del Presidente de la República de Kazajstán de fecha 15 de febrero de 2018 nº 636.]. www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC191496/.

Gobierno de Nueva Gales del Sur. 2020. *Water Sharing Plan for the NSW Great Artesian Basin Shallow Groundwater Sources Order 2020.* legislation.nsw.gov.au/view/pdf/asmade/sl-2020-347.

____. 2021. *NSW Water Strategy*. Sydney, Departamento de Planificación, Industria y Medio Ambiente. dpie.nsw.gov.au/water/plans-and-programs/nsw-water-strategy.

____. s.f. *Cómo se gestiona el agua*. El agua en Nueva Gales del Sur. Sitio web del Gobierno de Nueva Gales del Sur. www.industry.nsw.gov.au/water/what-we-do/how-water-is-managed.

____. s.d.b. *Plan de Acción para la Reforma del Agua.* El agua en Nueva Gales del Sur. Sitio web del Gobierno de Nueva Gales del Sur. www.industry.nsw.gov.au/water/environmental-water-hub/water-reform-action-plan.

Goldscheider, N. y Drew, D. (eds.). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology: IAH: International Contributions to Hydrogeology.* CRC Press.

Gomes, N. 2006. *Access to Water, Pastoral Resource Management and Pastoralists' Livelihoods: Lessons Learned from Water Development in Selected Areas of Eastern Africa* (Kenya, Ethiopia, Somalia). Documento de trabajo LSP nº 26. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). www.fao.org/documents/card/en/c/2ef1b69b-d980-5860-bd4e-dbf613b8e487/.

Gong, H., Pan, Y., Zheng, L., Li, X., Zhu, L., Zhang, C., Huang, Z., Li, Z., Wang, H. y Zhou, C. 2018. Cambios de almacenamiento de agua subterránea a largo plazo y desarrollo de la subsidencia de la tierra en la llanura del norte de China (1971-2015). *Hydrogeology Journal*, Vol. 26, pp. 1417-1427. doi.org/10.1007/s10040-018-1768-4.

Goodman, A., Sanguinito, S. y Levine, J. S. 2016. Prospective CO_2 saline resource estimation methodology: Perfeccionamiento de los métodos US-DOE-NETL existentes en función de la disponibilidad de datos. *International Journal of Greenhouse Gas Control,* Vol. 54, No. 1, pp. 242-249. doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.09.009.

Gorelick, S. M. y Zheng, C. 2015. El cambio global y el desafío de la gestión de las aguas subterráneas. *Water Resources Research,* Vol. 51, No. 5, pp. 3031-3051. doi.org/10.1002/2014WR016825.

Goulburn-Murray Water. 2013. *Diverters' Tariff Strategy.* www.g-mwater.com.au/downloads/gmw/currentProjects/Diverters_Tariff_Strategy_Nov13_WEB.pdf.

Gowing, J., Walker, D., Parkin, G., Forsythe, N., Haile, A. T. y Ayenew, D. A. 2020. ¿Puede el agua subterránea poco profunda sostener la agricultura de regadío a pequeña escala en el África Subsahariana? Evidence from N-W Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, Vol. 10, Artículo 100290. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100290.

GRACE 2.0. s.f. *GRACE 2.0 App*. tethys2.byu.edu/apps/newgrace/ (Consultado el 17 de marzo de 2021).

Graham, G., Allen, D. M. y Finkbeiner, B. 2015. Climate controls on nitrate concentration variability in the Abbotsford-Sumas aquifer, British Columbia. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 73, No. 6, pp. 2895–2907. doi.org/10.1007/s12665-014-3072-5.

Grech-Madin, C., Döring, S., Kim, K. y Swain, A. 2018. Negociando el agua a través de los niveles: Una "caja de herramientas" de paz y conflicto para la diplomacia del agua. *Journal of Hydrology*, Vol. 559, pp. 100-109. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.008.

Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H. y Aureli, A. 2011. Bajo la superficie del cambio global: Impactos del cambio climático en las aguas subterráneas. *Journal of Hydrology,* Vol. 405, No. 3-4, pp. 532-560. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.002.

Grey, D. y Sadoff, C. W. 2007. ¿Hundirse o nadar? Water security for growth and development. *Water Policy*, Vol. 9, No. 6, pp. 545-571. doi.org/10.2166/wp.2007.021.

Griebler, C. y Avramov, M. 2015. Servicios ecosistémicos de las aguas subterráneas: A review. *Freshwater Science*, Vol. 34, No. 1, pp. 355-367. doi.org/10.1086/679903.

Grönwall, J. 2011. La dependencia de las aguas subterráneas entre la población urbana pobre: ¿Lo que no se ve es lo que no se piensa? *International Journal Urban Sustainable Development*, Vol. 3, No. 1, pp. 26-39. doi.org/10.1080/19463138.2010.547042.

____. 2016. Autoabastecimiento y responsabilidad: Gobernar o no gobernar el agua subterránea para los pobres (peri) urbanos en Accra, Ghana. *Environmental Earth Science*, Vol. 75, Artículo 1163. doi.org/10.1007/s12665-016-5978-6.

Grönwall, J. y Danert, K. 2020. El acceso a las aguas subterráneas y al agua potable desde el punto de vista de los derechos humanos: El autoabastecimiento como norma. *Water,* Vol. 12, No. 2, Artículo 419. doi.org/10.3390/w12020419.

Grönwall, J. y Jonsson, A. C. 2017a. Regulación de los efluentes del sector textil de la India: Nuevos mandatos y supervisión del cumplimiento para el vertido cero de líquidos. *Law, Environment and Development Journal*, Vol. 13, No. 1.

____. 2017b. El impacto de la puesta de moda de "cero": La asimilación de la descarga líquida cero y las transiciones sociotécnicas en Tirupur. *Water Alternatives*, Vol. 10, No. 2, pp. 602-624. www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol10/v10issue2/372-a10-2-22/file.

Grönwall, J. y Oduro-Kwarteng, S. 2018. El agua subterránea como recurso estratégico para mejorar la resiliencia: Un estudio de caso de Accra periurbana. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 77, Artículo 6. doi.org/10.1007/s12665-017-7181-9.

Grönwall, J., Mulenga, M. y McGranahan, G. 2010. Groundwater, *Self-Supply and Poor Urban Dwellers: A Review with Case Studies of Bangalore and Lusaka*. Human Settlements Working Paper Series - Water and Sanitation No. 26. Londres, Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo (IIED). pubs.iied.org/10584iied.

____. 2016b. *Visión global compartida para la gobernanza de las aguas subterráneas 2030 y un llamamiento a la acción.* Edición revisada. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). www.fao.org/3/a-i5508e.pdf.

____. 2016c. *Marco de acción mundial para el logro de la visión sobre la gobernanza de las aguas subterráneas.* Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). www.fao.org/3/a-i5705e.pdf.

Grupo de Alto Nivel sobre el Agua. 2018. *Hacer que cada gota cuente: Una agenda para la acción por el agua. Informe de resultados del* HLPW. Nueva York, Naciones Unidas/Grupo del Banco Mundial. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17825HLPW_Outcome.pdf.

Grupo de trabajo de la CEPE sobre Seguimiento y Evaluación. 2000. *Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters.* Lelystad, Países Bajos. unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/guidelinesgroundwater.pdf.

Güntner, A., Schmidt, R. y Döll, P. 2007. Supporting large-scale hydrogeological monitoring and modelling by time-variable gravity data. *Hydrogeology Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 167–170. doi.org/10.1007/s10040-006-0089-1.

Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K. G. y Smakhtin, V. 2018. *Aguas subterráneas y Objetivos de Desarrollo Sostenible: Análisis de las interrelaciones.* UNU-INWEH Report Series No. 4. Hamilton, Ontario, Instituto de la Universidad de las Naciones Unidas para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud (UNU-INWEH). inweh.unu.edu/groundwater-and-sustainable-development-goals-analysis-of-interlinkages/.

Gurdak, J. J., Hanson, R. T., McMahon, P. B., Bruce, B. W., McCray, J. E., Thyne, G. D. y Reedy, R. C. 2007. Climate variability controls on unsaturated water and chemical movement, High Plains aquifer, USA. *Vadose Zone Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 533–547. doi.org/10.2136/vzj2006.0087.

Guzy, A. y Malinowska, A. A. 2020. State of the art and recent advancements in modelling of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Water*, Vol. 12, No. 7, Article 2051. doi.org/10.3390/w12072051.

GWP (Global Water Partnership). 2017. *Groundwater Management Plans (C4.03)*. GWP. www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Planning_for_IWRM/Groundwater_management_plans/. (Consultado el 24 de mayo de 2021).

H

Haacker, E. M. K., Kendall, A. D. y Hyndman, D. W. 2016. Descensos del nivel de agua en el acuífero de las Altas Llanuras: desde el predesarrollo hasta la senectud del recurso. *Groundwater,* Vol. 54, No. 2, pp. 231-242. doi.org/10.1111/gwat.12350.

Han, Z. y Cheng, M. 2013. Historia de la hidrogeología en China. N. Howden y J. Mather (eds.), *History of Hydrogeology. IAH International Contributions to Hydrogeology,* Vol. 28, Boca Ratón, Florida/Londres/Nueva York/Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema, pp. 4-46.

Haque, S., Nahar, N. y Sayem, S. 2021. Gestión del agua industrial y sostenibilidad: Development of SIWP tool for textile industries of Bangladesh. *Water Resources and Industry,* Vol. 25, Artículo 100145. doi.org/10.1016/j.wri.2021.100145.

Hara, K. 2006. Contaminación de las aguas subterráneas y política de gestión de la calidad en Asia. *International Review for Environmental Strategies,* Vol. 6, No. 2, pp. 291-306.

Harlan, R. L., Kolm, K. E. y Gutentag, E. D. 1989. *Water-Well Design and Construction. Developments in Geotechnical Engineering.* Amsterdam/Oxford, Reino Unido/Nueva York/Tokio, Elsevier.

Harpold, A. A. y Kohler, M. 2017. Potencial de cambio de los eventos extremos de deshielo y precipitación en las montañas del oeste de los Estados Unidos. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* Vol. 122, No. 24, pp. 13219-13228. doi.org/10.1002/2017JD027704.

Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J. y Lister, D. H. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – The CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 3, pp. 623–642. doi.org/10.1002/joc.3711.

Harris, M. 2015. Las ciudades esponjan de China: Absorbiendo el agua para reducir los riesgos de inundación. *The Guardian,* 1 de octubre de 2015.

Hayashi, M. 2013. La zona vadosa fría: Importancia hidrológica y ecológica de los procesos del suelo congelado. *Vadose Zone Journal*, Vol. 12, No. 4, pp. 1-8. doi.org/10.2136/vzj2013.03.0064.

Healy, A., Allan, S., Bristow, G., Capstick, S., Danert, K., Goni, I., MacDonald, A. M., Tijani, M., Upton, K. y Whitmarsh, L. 2017. *Abastecimiento individual de agua: Entendiendo los riesgos y la resiliencia de la extracción de recursos hídricos subterráneos en Nigeria*. 40th WEDC International Conference, Loughborough, UK.

Healy, A., Upton, K., Capstick, S., Bristow, G., Tijani, M., MacDonald, A., Goni, I., Bukar, Y., Whitmarsh, L., Theis, S., Danert, K. y Allan, S. 2020. Domestic groundwater abstraction in Lagos, Nigeria: ¿Una disyuntiva en la interfaz ciencia-política-práctica? *Environmental Research Letters*, Vol.15, No. 4, Artículo 045006. doi.org/10.1088/1748-9326/ab7463.

Healy, R. W. 2010. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/CBO9780511780745.

Heinke, J., Lannerstad, M., Gerten, D., Havlík, P., Herrero, M., Notenbaert, A. M. O., Hoff, H. y Müller, C. 2020. Water use in global livestock production – Opportunities and constraints for increasing water productivity. *Water Resources Research*, Vol. 56, No. 12, e2019WR026995. doi.org/10.1029/2019WR026995.

Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W. C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H. y Ye, S. 2020. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, Vol. 371, No. 6524, pp. 34–36. doi.org/10.1126/science.abb8549.

Hinsby, K., Condesso de Melo, M. T. y Dahl, M. 2008. European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment*, Vol. 401, No. 1–3, pp. 1–20. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.018.

Hirji, R. F., Mandal, S. y Pangare, G. 2017. *Foro de aguas subterráneas del sur de Asia: Regional Challenges and Opportunities for Building Drought and Climate Resilience for Farmers, Cities, and Villages.* Washington, DC, Banco Mundial. documents.worldbank.org/curated/en/917111513695938541/South-Asia-groundwater-forum-regional-challenges-and-opportunities-for-building-drought-and-climate-resilience-for-farmers-cities-and-villages.

Hiscock, K., Sparkes, R. y Hodgson, A. 2011. Evaluation of future climate change impacts on European groundwater resources. H. Treidel, J. L. Martin-Bordes y J. J. Gurdak (eds.), *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations*. London, CRC Press, pp. 351–365. doi.org/10.1201/b11611.

Hodgson, S. 2016. *Explorando el concepto de tenencia del agua*. Documento de debate sobre la tierra y el agua nº 10. Rome, FAO. www.fao.org/publications/card/en/c/f5d1fc87-ac13-438d-8957-4f7214b0ea55/.

Hoekstra, A. Y. 2018. Dimensiones alimentarias y comerciales globales de la gobernanza de las aguas subterráneas. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance.* Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema, pp. 353-366.

Hofmann, J., Venohr, M., Behrendt, H. y Opitz, D. 2010. Gestión integrada de los recursos hídricos en Asia central: Emisiones de nutrientes y metales pesados y su relevancia para la cuenca del río Kharaa, Mongolia. *Water Science and Technology,* Vol. 62, No. 2, pp. 353-363. doi.org/10.2166/wst.2010.262.

Hofmann, J., Watson, V. y Scharaw, B. 2015. La calidad de las aguas subterráneas bajo estrés: Contaminantes en la cuenca del río Kharaa (Mongolia). *Environmental Earth Sciences*, Vol. 73, pp. 629-648. doi.org/10.1007/s12665-014-3148-2.

Hogeboom, R. J., Kamphuis, I. y Hoekstra, A. Y. 2018. Sostenibilidad hídrica de los inversores: Desarrollo y aplicación de un marco de evaluación. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 202, pp. 642-648. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.142.

Holding, S. y Allen, D. M. 2015. De días a décadas: Modelización numérica de la respuesta del lente de agua dulce a los factores de estrés del cambio climático en las islas pequeñas. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, pp. 933-949. doi.org/10.5194/hess-19-933-2015.

Holding, S., Allen, D. M., Foster, S., Hsieh, A., Larocque, I., Klassen, J. y Van Pelt, S. C. 2016. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas en las islas pequeñas. *Nature Climate Change*, Vol. 6, pp. 1100-1103. doi.org/10.1038/nclimate3128.

Holmgren, J. M. y Werner, M. J. 2021. Raspberry shake instruments provide initial ground-motion assessment of the induced seismicity at the United Downs deep geothermal power project in Cornwall, United Kingdom. *The Seismic Record,* Vol. 1, No. 1, pp. 27–34. doi.org//10.1785/0320210010.

Hoogeveen, J., Faurès, J-M., Peiser, L., Burke, J. y Van de Giesen, N. 2015. GlobWat – A global water balance model to assess water use in irrigated agriculture. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 19, No. 9, pp. 3829–3844. doi.org/10.5194/hess-19-3829-2015.

Hora, T., Srinivasan, V. y Basu, N. B. 2019. The groundwater recovery paradox in South India. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 16, pp. 9602–9611. doi.org/10.1029/2019GL083525.

Hosono, T., Ono, M., Burnett, W. C., Tokunaga, T., Taniguchi, M. y Akimichi, T. 2012. Distribución espacial de la descarga de aguas subterráneas submarinas y nutrientes asociados dentro de un área costera local. *Environmental Science & Technology,* Vol. 46, No. 10, pp. 5319-5326. doi.org/10.1021/es2043867.

Houéménou, H., Tweed, S., Dobigny, G., Mama, D., Alassane, A., Silmer, R., Babic, M., Ruy, S., Chaigneau, A., Gauthier, P., Socohou, A., Dossou, H.-B., Badou, S. y Leblanc, M. 2020. Degradación de la calidad de las aguas subterráneas en las ciudades en expansión de África Occidental. A case study of the unregulated shallow aquifer in Cotonou. *Journal of Hydrology*, Vol. 582, Artículo 124438. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124438.

Howard, J. y Merrifield, M. 2010. Mapping groundwater dependent ecosystems in California. *PLoS One*, Vol. 5, No. 6, e11249. doi.org/10.1371/journal.pone.0011249.

Hu, K., Awange, J., Khandu, K., Forootan, E., Mikosz Goncalves, R. y Fleming, K. 2017. Caracterización hidrogeológica de las aguas subterráneas sobre el Brasil utilizando productos de teledetección y modelos. *Science of The Total Environment,* Vol. 599-600, pp. 372-386. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188.

Hughes, D. A., Kingston, D. G. y Todd, M. C. 2011. Incertidumbre en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Okavango como resultado del cambio climático. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 3, pp. 931-941. doi.org/10.5194/hess-15-931-2011.

Humphreys, W. F. 2006. Aquifers: the ultimate groundwater-dependent ecosystems. *Australian Journal of Botany*, Vol. 54, No. 2, pp. 115–132. doi.org/10.1071/BT04151.

Huss, M. y Hock, R. 2018. Respuesta hidrológica a escala global a la futura pérdida de masa de los glaciares. *Nature Climate Change,* Vol. 8, pp. 135-140. doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x.

Hutton, G. y Varughese, M. 2016. *The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene.* Documento técnico del Programa de Agua y Saneamiento. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23681.

Huttrer, G. W. 2021. *Informe de actualización de la generación de energía geotérmica en el mundo* 2015-2020. Actas del Congreso Mundial de Geotermia 2020+1. Reikiavik, abril-octubre 2021.

Hynds, P., Regan, S., Andrade, L., Mooney, S., O'Malley, K., DiPelino, S. y O'Dwyer, J. 2018. Aguas turbias: Afinando el camino a seguir para la "ciencia de la sostenibilidad" de la socio-hidrogeología. *Water,* Vol. 10, No. 9, Artículo 1111. doi.org/10.3390/w10091111.

ICMM (International Council on Mining & Metals). 2012. *Water Management in Mining: A Selection of Case Studies*. London, ICMM. icmm.uat.byng.uk.net/en-gb/publications/water/water-management-in-mining-a-selection-of-case-studies.

ICTA-UAB (Instituto de ciencia y tecnología ambiental, Universidad Autónoma de Barcelona). s.f. *Environmental Justice Atlas*. ejatlas.org/commodity/water. (Consultado el 21 de junio de 2021).

ICWE (Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente) 1992. *The Dublin Statement on Water and Sustainable Development.* Dublín, 31 de enero de 1992, ICWE. www.un-documents.net/h2o-dub.htm.

Idowu, T. E. y Lasisi, K. H. 2020. Intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros del Este y el Cuerno de África: Una revisión desde una perspectiva regional. *Scientific African*, Vol. 8, e00402. doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00402.

IFC (Corporación Financiera Internacional). *2014. Agua, minería y comunidades: Creación de valor compartido a través de la gestión sostenible del agua.* Borrador para debate. commdev.org/publications/water-mining-and-communities/.

IGB (Instituto Leibniz de Ecología de Aguas Dulces y Pesca Continental). 2020. *Posición del IGB respecto al proyecto de construcción de Tesla en Grünheide.* www.igb-berlin.de/en/news/igb-position-regarding-tesla-building-project-grunheide.

IGRAC (Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas). 2014. *América Latina y el Caribe.* Informe resumen de la información compartida durante el Taller Regional de Monitoreo de Aguas Subterráneas. IGRAC. www.un-igrac.org/resource/groundwater-monitoring-latin-america.

____. 2016. *Análisis de riesgo del inversor: ¿Por qué las aguas subterráneas son importantes? El valor de las aguas subterráneas.* Delft, Países Bajos, IGRAC. www.un-igrac.org/resource/investor-risk-analysis-why-groundwater-matters.

____. 2020. *Programas nacionales de seguimiento de las aguas subterráneas: A Global Overview of Quantitative Groundwater Monitoring Networks*. Delft, Países Bajos, IGRAC. www.un-igrac.org/stories/national-groundwater-monitoring-programmes.

____. 2021. *Acuíferos transfronterizos del mundo [mapa].* Edición 2021. Escala 1 : 50 000 000. Delft, Países Bajos, IGRAC. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/2021TBAMap_UNESCO%20Version.pdf; unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380193.

____. s.f. *El Sistema Mundial de Información sobre las Aguas Subterráneas* (GGIS). ggis.un-igrac.org.

IGRAC/PHI de la UNESCO (Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas/Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO). 2015. *Directrices para la evaluación multidisciplinaria de los acuíferos transfronterizos.* Versión borrador. Septiembre de 2015. Delft, Países Bajos, IGRAC. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Guidelines%20for%20TBA%20Assessment%2020150901.pdf.

Ionescu, D., Siebert, C., Polerecky, L., Munwes, Y. Y., Lott, C., Häusler, S., Bižić-Ionescu, M., Quast, C., Peplies, J., Glockner, F. O., Ramette, A., Rödiger, T., Dittmar, T., Oren, A., Geyer, S., Stärk, H-J., Sauter, M., Licha, T., Laronne, J. B. y De Beer, D. 2012. Caracterización microbiana y química de los manantiales de agua dulce submarinos del Mar Muerto. *PLoS One*, Vol. 7, No. 6, e38319. doi.org/10.1371/journal.pone.0038319.

IPBES (Plataforma intergubernamental científico-normativa sobre diversidad biológica y servicios de los ecosistemas). 2019. *Informe de evaluación global de la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas*. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio, H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis and C. N. Zayas (eds.). Bonn, Germany, IPBES Secretariat. doi.org/10.5281/zenodo.3553579.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2014a. Cambio climático a largo plazo: Proyecciones, compromisos e irreversibilidad. *Cambio climático* 2013: *The Physical Science Basis.* Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, pp. 1029-1136. doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024.

____. 2014b. *Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Cambridge, Reino Unido/Nueva York, Cambridge University Press. climateanalytics.org/publications/2014/climate-change-2014-mitigation-of-climate-change-ipcc-working-group-iii-contribution-ar5/.

IPES-Food (Panel internacional de expertos en sistemas alimentarios sostenibles). 2018. *Rompiendo con los sistemas alimentarios y agrícolas industriales: Siete estudios de caso de transición agroecológica*. www.ipes-food.org/_img/upload/files/CS2_web.pdf.

Izydorczyk, K., Frątczak, W., Drobniewska, A., Cichowicz, E., Michalska-Hejduk, D., Gross, R. y Zalewski, M. 2013. Una barrera biogeoquímica para mejorar una zona de amortiguación para reducir la contaminación difusa por fósforo - Resultados preliminares. *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol. 13, No. 2, pp. 104-112. doi.org/10.1016/j.ecohyd.2013.06.003.

Jacobsen, M., Webster, M. y Vairavamoorthy, K. (eds.). 2013. *El futuro del agua en las ciudades africanas: ¿Por qué desperdiciar el agua?* Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/11964. Licencia: CC BY 3.0 IGO.

Jadeja, Y., Maheshwari, B., Packham, R., Bohra, H., Purohit, R., Thaker, B., Dillon, P., Oza, S., Dave, S., Soni, P., Dashora, Y., Dashora, R., Shah, T., Gorsiya, J., Katara, P., Ward, J., Kookana, R., Singh, P. K., Chinnasamy, P., Goradiya, V., Prathapar, S., Varua, M. y Chew, M. 2018. Gestionar la recarga de acuíferos y sostener el uso de las aguas subterráneas: Desarrollando un programa de desarrollo de capacidades para crear campeones locales de aguas subterráneas. *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 4, pp. 317-329. doi.org/10.1007/s40899-018-0228-6.

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J-D. y Ross, A. 2016. *Gestión integrada de las aguas subterráneas: Conceptos, enfoques y desafíos.* Springer Open.

Jamali Jaghdani, T. y Kvartiuk, V. 2021. The energy-water nexus in Iran: The political economy of energy subsidies for groundwater pumping. S. Hülsmann y M. Jampani (eds.), *A Nexus Approach for Sustainable Development*. Cham, Switzerland, Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-57530-4_8.

Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M. y Foolad, M. R. 2011. Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, Vol. 30, No. 5, pp. 435–458. doi.org/10.1080/07352689.2011.605739.

Jarraya-Horriche, F., Benabdallah, S. y Ayadi, M. 2020. Seguimiento de las aguas subterráneas para evaluar la recarga artificial en el acuífero costero mediterráneo de Korba (noreste de Túnez). *Environmental Monitoring and Assessment,* Vol. 192, No. 7, Article 422. doi.org/10.1007/s10661-020-08408-w.

Jasechko, S. y Taylor, R. G. 2015. Las precipitaciones intensivas recargan las aguas subterráneas tropicales. *Environmental Research Letters,* Vol. 10, No. 12, Artículo 124015. doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124015.

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y. y Kirchner, J. W. 2021. Pérdida potencial generalizada de caudal en los acuíferos subyacentes en los Estados Unidos. *Nature*, Vol. 591, pp. 391-395. doi.org/10.1038/s41586-021-03311-x.

Jia, X., O'Connor, D., Hou, D., Jin, Y., Li, G., Zheng, C., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W. y Luo, J. 2019. Agotamiento y contaminación de las aguas subterráneas: Distribución espacial de la sostenibilidad de los recursos de agua subterránea en China. *Science of The Total Environment*, Vol. 672, pp. 551-562. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.457.

Kadhem, G. M. and Zubari, W. K. 2020. Identifying optimal locations for artificial groundwater recharge by rainfall in the Kingdom of Bahrain. *Earth Systems and Environment,* Vol. 4, pp. 551–566. doi.org/10.1007/s41748-020-00178-2.

Kalbus, E., Reinstorf, F. y Schirmer, M. 2006. Métodos de medición de las interacciones entre aguas subterráneas y superficiales: A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, No. 6, pp. 873-887. doi.org/10.5194/hess-10-873-2006.

Kataoka, Y. y Shivakoti, B. R. 2013. *Groundwater Governance Regional Diagnosis: Asia and the Pacific Region.* IGES (Instituto de Estudios Ambientales Globales).

Kelkar Khambete, A. 2020. *La política del agua del estado de Karnataka 2019.* India Water Portal, 20 de enero de 2020. www.indiawaterportal.org/articles/karnataka-state-water-policy-2019.

Kemper, K. E. 2007. Instrumentos e instituciones para la gestión de las aguas subterráneas. M. Giordano y K. G. Villholth, *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development*. Wallingford, Reino Unido, CABI. pp. 153-172.

Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B. y Simmons, C. T. 2016. Impactos del aumento del nivel del mar en la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros: Revisión e integración. *Journal of Hydrology,* Vol. 535, pp. 235-255. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.083.

Kidmose, J., Refsgaard, J. C., Troldborg, L., Seaby, L. P. y Escrivà, M. M. 2013. Impacto del cambio climático en los niveles de agua subterránea: Modelización conjunta de valores extremos. *Hydrology and Earth System Sciences,* Vol. 17, pp. 1619-1634. doi.org/10.5194/hess-17-1619-2013.

Kim, S. G. y Kim, G-B. 2019. ¿Son económicas las redes de monitoreo de aguas subterráneas? Análisis coste-beneficio en el proyecto de abastecimiento de aguas subterráneas a largo plazo de Corea del Sur. *Water*, Vol. 11, No. 4, Artículo 753. doi.org/10.3390/w11040753.

Korzun, V. (ed.). 1974. *Mirovoj vodnyj balans i vodnye resursy Zemli* [Balance hídrico mundial y recursos hídricos de la Tierra]. Leningrado, URSS, Hidrometeoizdat. (En ruso).

Kiparsky, M., Milman, A., Owen, D. y Fisher, A. T. 2017. La importancia del diseño institucional para la gobernanza distribuida a nivel local de las aguas subterráneas: El caso de la Ley de Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas de California. *Water*, Vol. 9, No. 10, Art. 755. doi.org/10.3390/w9100755.

Kiran, S. y Rao, V. 2019. Implementación de Zero Liquid Discharge en la industria textil - Desafíos y camino a seguir. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10, No. 9, pp. 205-208.

Kiron, M. I. 2014. *Consumo de agua en la industria de transformación textil*. Textile Learner, 27 de abril de 2014. www.textilelearner.net/water-consumption-in-textile-processing-industry/.

Klausmeyer, K., Howard, J., Keeler-Wolf, T., Davis-Fadtke, K., Hull, R. y Lyons, A. 2018. *Mapeo de indicadores de ecosistemas dependientes de aguas subterráneas en California: Methods Report.* San Francisco, California. groundwaterresourcehub.org/public/uploads/pdfs/iGDE_data_paper_20180423.pdf.

Klausmeyer, K., Howard, J., Rohde, M. M. y Stanley, C. s.f. *Natural Communities Commonly Associated with Groundwater Version* 2.0 (NCCAG 2.0). Base de datos de The Nature Conservancy. www.scienceforconservation.org/products/natural-communities-groundwater-v2. (Consultado el 9 de mayo de 2021).

Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J., Karakaya, N., Kupfersberger, H., Kvœrner, J., Lundberg, A., Mileusnić, M., Moszczynska, A., Muotka, T., Preda, E., Rossi, P., Siergieiev, D., Šimek, J., Wachniew, P., Angheluta, V. y Widerlund, A. 2011. Ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas. Part I: Hydroecological status and trends. *Environmental Science & Policy*, Vol. 14, No. 7, pp. 770-781. doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.002.

Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., Bertacchi Uvo, C., Velasco, E. y Pulido-Velazquez, M. 2014. Impactos del cambio climático en las aguas subterráneas y los ecosistemas dependientes. *Journal of Hydrology*, Vol. 518, Parte B, pp. 250-266. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.

Knobeloch, L., Salna, B., Hogan, A., Postle, J. y Anderson, H. 2000. Blue babies and nitrate-contaminated well water. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 108, No. 7, pp. 675–678. doi.org/10.1289/ehp.00108675.

Kolker, J. E., Kingdom, B., Trémolet, S., Winpenny, J. y Cardone, R. 2016. *Opciones de financiación para la Agenda del Agua 2030.* Water Global Practice Knowledge Brief. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25495.

Kolusu, S. R., Shamsudduha, M., Todd, M. C., Taylor, R. G., Seddon, D., Kashaigili, J. J., Ebrahim, G. Y., Cuthbert, M. O., Sorensen, J. P. R., Villholth, K. G., MacDonald, A. M. y MacLeod, D. A., 2019. El evento de El Niño de 2015-2016: Anomalías climáticas y su impacto en los recursos hídricos subterráneos de África Oriental y Meridional. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, pp. 1751-1762. doi.org/10.5194/hess-23-1751-2019.

Konikow, L. F. 2011. Contribución del agotamiento global de las aguas subterráneas desde 1900 al aumento del nivel del mar. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 17, L17401, doi.org/10.1029/2011GL048604.

____. 2013. Almacenamiento de agua sobreestimado. *Nature Geoscience*, Vol. 6, p. 3. doi.org/10.1038/ngeo1659.

Kotwicki, V. 2009. Water balance of Earth. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 54, No. 5, pp. 829–840. doi.org/10.1623/hysj.54.5.829.

Kowalczyk, A., Witkowski, A., Rozkowski, A., Szczepanski, A., Rogoz, M., Przybylek, J. y Stasko, S. 2010. Lo que la minería polaca debe a la hidrogeología polaca. *Przeglad Geologiczny*, Vol. 58, No. 9, pp. 776-788.

Kramers, L., Van Wees, J-D., Pluymaekers, M. P. D., Kronimus, A. y Boxem, T. 2012. Evaluación de los recursos térmicos directos y sistemas de información del subsuelo para los acuíferos geotérmicos; La perspectiva holandesa. *Netherlands Journal of Geosciences*, Vol. 91, No. 4, pp. 637-649. doi.org/10.1017/S0016774600000421.

Kreamer, D. K. y Springer, A. E. 2008. The hydrology of desert springs in North America. L. E. Stevens y V. J. Meretsky (eds.), *Aridland Springs in North America, Ecology and Conservation*. Tucson, Ariz., University of Arizona Press.

Kreamer, D. K., Stevens, L. E. y Ledbetter, J. D. 2015. Groundwater dependent ecosystems – Science, challenges, and policy directions. S. Adelana (ed.), *Groundwater: Hydrogeochemistry, Environmental Impacts and Management Practices*. Hauppauge, NY, Nova Science Publishers. pp. 205–230.

Kuhn, O. 2004. La antigua perforación china. *CSEG Recorder*, Vol. 29, No. 6. csegrecorder.com/articles/view/ancient-chinese-drilling.

Kulongoski, J. T. y McMahon, P. B. 2019. Methane emissions from groundwater pumping in the USA. *npj Climate and Atmospheric Science*, Vol. 2, Article 11. doi.org/10.1038/s41612-019-0068-6.

Lall, U., Josset, L. y Russo, T. 2020. Una instantánea de los desafíos de las aguas subterráneas en el mundo. *Annual Review of Environment and Resources,* Vol. 45, No. 1, pp. 171-194. doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800.

Lamontagne-Hallé, P., McKenzie, J. M., Kurylyk, B. L. y Zipper, S. C. 2018. Cambio de la dinámica de la descarga de aguas subterráneas en las regiones de permafrost. *Environmental Research Letters*, Vol. 13, No. 8, Artículo 084017. doi.org/10.1088/1748-9326/aad404.

Lapworth, D. J., Baran, N., Stuart, M. E. y Ward, R. S. 2012. Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, Vol. 163, pp. 287–303. doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.034.

Lapworth, D. J., Das, P., Shaw, A., Mukherjee, A., Civil, W., Petersen, J. O., Gooddy, D. C., Wakefield, O., Finlayson, A., Krishan, G., Sengupta, P. y MacDonald, A. M. 2018. Vulnerabilidad de las aguas subterráneas urbanas profundas en la India revelada a través del uso de contaminantes orgánicos emergentes y trazadores de tiempo de residencia. *Environmental Pollution*, Vol. 240, pp. 938-949. doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.053.

Lapworth, D. J., MacDonald, A. M., Kebede, S., Owor, M., Chavula, G., Fallas, H., Wilson, P., Ward, J. S. T., Lark, M., Okullo, J., Mwathunga, E., Banda, S., Gwengweya, G., Nedaw, D., Jumbo, S., Banks, E., Cook, P. y Casey, V. 2020. Drinking water quality from rural handpump-boreholes in Africa. *Environmental Research Letters*, Vol. 15, No. 6. doi.org/10.1088/1748-9326/ab8031.

Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Okotto-Okotto, J., Pedley, S., Stuart, M. E., Tijani, M. N. y Wright, J. 2017. Calidad de las aguas subterráneas urbanas en el África Subsahariana: Estado actual e implicaciones para la seguridad del agua y la salud pública. *Hydrogeology Journal,* Vol. 25, pp. 1093-1116. doi.org/10.1007/s10040-016-1516-6.

Larned, S. T., Datry, T., Arscott, D. B. y Tockner, K. 2010. Emerging concepts in temporary-river ecology. *Freshwater Biology*, Vol. 55, No. 4, pp. 717–738. doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02322.x.

Leblanc, M. J., Tregoning, P., Ramillien, G., Tweed, S. O. y Fakes, A. 2009. Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 4, W04408. doi.org/10.1029/2008WR007333.

Lecher, A. L. y Mackey, K. R. M. 2018. Synthesizing the Effects of submarine groundwater discharge on marine biota. *Hydrology*, Vol. 5, No. 4, Article 60. doi.org/10.3390/hydrology5040060.

Lee, S-Y., Swager, L., Pekot, L., Piercey, M., Will, R. y Zaluski, W. 2018a. Estudio de los datos dinámicos operativos en el proyecto Aquistore. *International Journal of Greenhouse Gas Control,* Vol. 76, pp. 62-77. doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.06.008.

Lee, E., Jayakumar, R., Shrestha, S. y Han, Z. 2018b. Evaluación de los recursos acuíferos transfronterizos en Asia: Estado y progreso hacia la gestión sostenible de las aguas subterráneas. *Revista de Hidrología: Regional Studies,* Vol. 20, pp. 103-115. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.01.004.

Le Luu, T. 2019. Observaciones sobre la calidad actual de las aguas subterráneas en Viet Nam. *Environmental Science and Pollution Research,* Vol. 26, pp. 1163-1169. doi.org/10.1007/s11356-017-9631-z.

Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H. y Zhang, T. 2007. Observaciones: Cambios en la nieve, el hielo y el suelo congelado. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller (eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Contribución del Grupo de Trabajo I a la Cuarta Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press, pp. 337-383. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter4-1.pdf.

Li, X., Atwill, E. R., Antaki, E., Applegate, O., Bergamaschi, B., Bond, R. F., Chase, J., Ransom, K. M., Samuels, W. y Watanabe, N. 2015. Fecal indicator and pathogenic bacteria and their antibiotic resistance in alluvial groundwater of an irrigated agricultural region with dairies. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 44, No. 5, pp. 1435–1447. doi.org/10.2134/jeq2015.03.0139.

Liao, X. y Ming, J. 2019. Presiones impuestas por la producción de energía sobre el cumplimiento de la política hídrica de las "Tres Líneas Rojas" de China en las provincias con escasez de agua. *Water Policy*, Vol. 21, No. 1, pp. 38-48. doi.org/10.2166/wp.2018.211.

Liljedahl, A. K., Gädeke, A., O'Neel, S., Gatesman, T. A. y Douglas, T. A. 2017. Glacierized headwater streams as aquifer recharge corridors, subarctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, No. 13, pp. 6876–6885. doi.org/10.1002/2017GL073834.

Linton, J. y Brooks, D. 2011. Gobernanza de los acuíferos transfronterizos: Nuevos retos y nuevas oportunidades. *Water International,* Vol. 36, No. 5. doi.org/10.1080/02508060.2011.599312.

Lipponen, A. y Chilton, J. 2018. Desarrollo de la cooperación en la gestión de las aguas subterráneas transfronterizas en la región paneuropea: El papel de los marcos internacionales y las evaluaciones conjuntas. *Revista de Hidrología: Regional Studies*, Vol. 20, pp. 1451-157. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.05.001.

Liu, C. M., Yu, J. J. y Kendy, E. 2010. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain. *Water International*, Vol. 26, No. 2, pp. 265–272. doi.org/10.1080/02508060108686913.

Liu, T., Bruins, R. J. F. y Heberling, M. T. 2018. Factores que influyen en la adopción por parte de los agricultores de las mejores prácticas de gestión: Una revisión y síntesis. *Sustainability*, Vol. 10, No. 2, Article 432. doi.org/10.3390/su10020432.

Liu, J. y Zheng, C. 2016. Hacia una gestión integrada de las aguas subterráneas en China. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J-D. Rinaudo y A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Cham, Suiza, Springer International Publishing, pp. 455-475. doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_18.

Lowenberg-DeBoer, J. y Erickson, B. 2019. Poniendo las cosas en claro sobre la adopción de la agricultura de precisión. *Agronomy Journal*, Vol. 111, No. 4, pp. 1552-1569. doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779.

Lund, J. W. y Tóth, A. N. 2020. Utilización directa de la energía geotérmica 2020 revisión mundial. *Geothermics*, Vol. 90, Artículo 101915. doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915.

Lundgren, E. J., Ramp, D., Stromberg, J. C., Wu, J., Nieto, N. C., Sluk, M., Moeller, K. T. y Wallach, A. D. 2021. Los équidos diseñan la disponibilidad de agua en el desierto. *Science,* Vol. 372, No. 6541, pp. 491-495. doi.org/10.1126/science. abd6775.

Luijendijk, E., Gleeson, T. y Moosdorf, N. 2020. La descarga de agua dulce subterránea es insignificante para los océanos del mundo, pero importante para los ecosistemas costeros. *Nature Communications*, Vol. 11, No. 1, Artículo 1260. doi.org/10.1038/s41467-020-15064-8.

Lytton, L., Ali, A., Garthwaite, B., Punthakey, J. F. y Saeed, B. 2021. *Groundwater in Pakistan's Indus Basin: Present and Future Prospects*. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35065.

Lyuta, N., Sanina, I., Biarozka, O., Vasniova, O., Scheidleder, A. y Humer, F. 2021. *Subpartes transfronterizas de las masas de agua subterránea (GWB) y red de seguimiento transfronterizo de la República de Belarús y Ucrania - Desarrollado bajo la Iniciativa Europea del Agua Plus para los países de la Asociación Oriental (EUWI+*). EGU General Assembly 2021, abstract 4599. www.euwipluseast.eu/en/component/k2/item/1788-ukraine-belarus-abstract-for-the-egu21-conference-on-transboundary-groundwater-bodies-2021-eng.

M

MacAllister, D. J., MacDonald, A. M., Kebede, S., Godfrey, S. y Calow, R. 2020. Rendimiento comparativo de los abastecimientos rurales de agua durante la sequía. *Nature Communications,* Vol. 11, Artículo 1099. doi.org/10.1038/s41467-020-14839-3.

MacDonald, A. M. y Calow, R. C. 2009. Developing groundwater for secure rural water supplies in Africa. *Desalination*, Vol. 248, No. 1–3, pp. 546–556. doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.100.

MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Dochartaigh, B. É. Ó. y Taylor, R. G. 2012. Mapas cuantitativos de los recursos de agua subterránea en África. *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 2, Artículo 024009. doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024009.

MacDonald, A. M., Bonsor, H. C., Ahmed, K. M., Burgess, W. G., Basharat, M., Calow, R. C., Dixit, A., Foster, S. S. D., Gopal, K., Lapworth, D. J., Lark, R. M., Moench, M., Mukherjee, A., Rao, M. S., Shamsudduha, M., Smith, L., Taylor, R. G., Tucker, J., Van Steenbergen, F. y Yadav, S. K. 2016. Groundwater quality and depletion in the Indo-Gangetic Basin mapped from in situ observations. *Nature Geoscience*, Vol. 9, No. 10, pp. 762–766. doi.org/10.1038/ngeo2791.

MacDonald, A. M., Bell, R. A., Kebede, S., Azagegn, T., Yehualaeshet, T., Pichon, F., Young, M., McKenzie, A. A., Lapworth, D. J., Black, E. y Calow, R. C. 2019. Aguas subterráneas y resiliencia a la sequía en las tierras altas de Etiopía. *Environmental Research Letters*, Vol. 14, No. 9, Artículo 095003. doi.org/10.1088/1748-9326/ab282f.

MacDonald, A. M., Lark, R. M., Taylor, R. G., Abiye, T., Fallas, H. C., Favreau, G., Goni, I. B., Kebede, S., Scanlon, B., Sorensen, J. P. R., Tijani, M., Upton, K. A. y West, C. 2021. Mapping groundwater recharge in Africa from ground observations and implications for water security. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, No. 3, Article 034012. doi.org/10.1088/1748-9326/abd661.

Macdonald, D. M. J., Bloomfield, J. P., Hughes, A. G., MacDonald, A. M., Adams, B. y McKenzie, A. A. 2008. Improving the understanding of the risk from groundwater flooding in the UK. FLOODrisk 2008, *Conferencia europea sobre la gestión del riesgo de inundación.* Oxford, Reino Unido, 30 de septiembre - 2 de octubre de 2008. Países Bajos, CRC Press.

Macdonald, D. M. J., Dixon, A., Newell, A. y Hallaways, A. 2012. Groundwater flooding within an urbanised flood plain. *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 5, No. 1, pp. 68–80. doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01127. x.

Maheshwari, B., Varua, M., Ward, J., Packham, R., Chinnasamy, P., Dashora, Y., Dave, S., Soni, P., Dillon, P., Purohit, R., Hakimuddin, Shah, T., Oza, S., Singh, P., Prathapar, S., Patel, A., Jadeja, Y., Thaker, B., Kookana, R., Grewal, H., Yadav, K., Mittal, H., Chew, M. and Rao, P. 2014. The role of transdisciplinary approach and community participation in village scale groundwater management: Insights from Gujarat and Rajasthan, India. *Water*, Vol. 6, No. 11, pp. 3386–3408. doi.org/10.3390/w6113386.

Majumdar, D. 2003. El síndrome del bebé azul: Intoxicación por nitrato en humanos. *Resonance*, Vol. 8, pp. 20-30. doi.org/10.1007/BF02840703.

Manyi-Loh, C., Mamphweli, S., Meyer, E. y Okoh, A. 2018. Uso de antibióticos en la agricultura y su consecuente resistencia en fuentes ambientales: Posibles implicaciones para la salud pública. *Molecules,* Vol. 23, No. 4, Artículo 795. doi.org/10.3390/molecules23040795.

Manzano, M. y Lambán, L. J. 2011. Evaluación de los servicios de los ecosistemas de las aguas subterráneas en España [Assessment of groundwater-related ecosystem services in Spanish aquifers]. *Ecosistemas y biodiversidad para el bienestar humano. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España* [Ecosystems and biodiversity for human well-being. Millennium Ecosystem Assessment for Spain]. Madrid, Fundación Biodiversidad, Spanish Ministry of Environment, Rural and Marine Areas. www.ecomilenio.es/informe-de-resultados-eme/1760. (En español).

Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A. y Palma, T. 2019. Hidrodinámica de cuencas salinas: El ejemplo del Salar de Atacama. *Science of the Total Environment*, Vol. 651, Parte 1, pp. 668-683. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190.

Marchesini, V. A., Fernández, R. J. y Jobbágy, E. G. 2013. La lixiviación de sales conduce a suelos más secos en bosques semiáridos perturbados del centro de la Argentina. *Oecologia*, Vol. 171, pp. 1003-1012. doi.org/10.1007/s00442-012-2457-y.

Margat, J. y Van der Gun, J. 2013. *Las aguas subterráneas en el mundo: A Geographical Synopsis*. Boca Ratón, Florida, CRC Press.

Maron, D. F., Smith, T. J. y Nachman, K. E. 2013. Restricciones en el uso de antimicrobianos en la producción de animales para consumo: Un estudio internacional sobre regulación y economía. *Globalization and Health*, Vol. 9, No. 48. doi.org/10.1186/1744-8603-9-48.

Mas-Pla, J. y Menció, A. 2019. Contaminación de aguas subterráneas por nitratos y cambio climático: Aprendizajes de un análisis basado en el balance hídrico de varios acuíferos en una región mediterránea occidental (Cataluña). *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, pp. 2184-2202. doi.org/10.1007/s11356-018-1859-8.

Mateo-Sagasta, J. y Burke, J. 2010. *Interacciones entre la agricultura y la calidad del agua: A Global Overview.* SOLAW Background Thematic Report - TR08. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). www.fao.org/3/bl092e/bl092e.pdf.

Matheswaran, K., Khadka, A., Dhaubanjar, S., Bharati, L., Kumar, S. y Shrestha, S. 2019. Delineación de las zonas de recarga de los manantiales utilizando isótopos ambientales para apoyar las intervenciones resistentes al clima en dos cuencas montañosas en el Lejano Oeste de Nepal. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pp. 2181-2197. doi.org/10.1007/s10040-019-01973-6.

Maven's Notebook. 2015. *Problemas y perspectivas de las aguas subterráneas, Parte 1: Una visión general de las aguas subterráneas.* 12 de marzo de 2015. mavensnotebook.com/2015/03/12/groundwater-problems-and-prospects-part-1-an-overview-of-groundwater/.

McDonough, L. K., Santos, I. R., Andersen, M. S., O'Carroll, D. M., Rutlidge, H., Meredith, K., Oudone, P., Bridgeman, J., Gooddy, D. C., Sorensen, J. P. R., Lapworth, D. J., MacDonald, A. M., Ward, J. y Baker, A. 2020. Changes in global groundwater organic carbon driven by climate change and urbanization. *Nature Communications*, Vol. 11, Article 1279. doi.org/10.1038/s41467-020-14946-1.

McGill, B. M., Altchenko, Y., Hamilton, S. K., Kenabatho, P. K., Sylvester, S. R. y Villholth, K. G. 2019. Interacciones complejas entre el cambio climático, el saneamiento y la calidad de las aguas subterráneas: Un estudio de caso de Ramotswa, Botswana. *Hydrogeology Journal,* Vol. 27, pp. 997-1015. doi.org/10.1007/s10040-018-1901-4.

McManamay, R. A., Griffiths, N. A., DeRolph, C. R. y Pracheil, B. M. 2017. Una sinopsis de la cartografía mundial de los hábitats de agua dulce y la biodiversidad: Implicaciones para la conservación. L. Hufnagel (ed.), *Pure and Applied Biogeography*, IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.70296.

McPhaden, M. J., Santoso, A. y Cai, W. (eds.). 2020. *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate*. American Geophysical Union. doi.org/10.1002/9781119548164.

McStraw, T. C. 2020. *An Open-Source Web-Application for Regional Analysis of GRACE Groundwater Data and Engaging Stakeholders in Groundwater Management.* Master's thesis. Provo, Utah, Brigham Young University. scholarsarchive.byu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9144&context=etd.

Mechlem, K. 2016. Gobernanza de las aguas subterráneas: El papel de los marcos legales a nivel local y nacional - Práctica establecida y tendencias emergentes. *Water*, Vol. 8, No. 8, Article 347. doi.org/10.3390/w8080347.

Megdal, S. B., Gerlak, A., Varady, R. y Ling-Yee, H. 2014. Gobernanza de las aguas subterráneas en los Estados Unidos: Prioridades y desafíos comunes. *Groundwater,* Vol. 53, No. 5, pp. 677-684. doi.org/10.1111/gwat.12294.

Meglioli, P. A., Aranibar, J. N., Villagra, P. E., Álvarez, J. A. y Jobbágy, E. G. 2013. Estaciones ganaderas como focos de recarga de agua subterránea y lixiviación de nitratos en un desierto arenoso del Monte Central, Argentina. *Ecohydrology*, Vol. 7, No. 2, pp. 600-611. doi.org/10.1002/eco.1381.

Meinzen-Dick, R. y Nkonya, L. 2007. Understanding legal pluralism in water and land rights: Lessons from Africa and Asia. B. van Koppen, M. Giordano and J. Butterworth (eds.), *Community-Based Water Law and Water Resource Management Reform in Developing Countries*. Wallingford, UK, CABI.

Mekonnen, M. M. y Gerbens-Leenes, W. 2020. La huella hídrica de la producción mundial de alimentos. *Water,* Vol. 12, No. 10, Artículo 2696. doi.org/10.3390/w12102696.

Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. 2012. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, Vol. 15, No. 3, pp. 401–415. doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8.

____. 2016. Cuatro mil millones de personas se enfrentan a una grave escasez de agua. *Science Advances*, Vol. 2, No. 2, e1500323. doi.org/10.1126/sciadv.1500323.

Michael, H. A., Russoniello, C. J. y Byron, L. A. 2013. Evaluación global de la vulnerabilidad al aumento del nivel del mar en sistemas de aguas subterráneas costeras limitadas por la topografía y por la recarga. *Water Resources Research,* Vol. 49, No. 4, pp. 2228-2240. doi.org/10.1002/wrcr.20213.

Milman, A., Bylo, K., Gage, A. y Blomquist, W. 2021. Groundwater recharge to support wildlife and water users: The Heyborne ponds project, Sedgwick County, Colorado. *Case Studies in the Environment*, Vol. 5, No. 1, Article 1235924. doi.org/10.1525/cse.2021.1235924.

Ministerio de Medio Ambiente del Japón/IGES (Instituto de Estrategias Ambientales Globales). 2018. *Perspectiva de la WEPA sobre la gestión ambiental del agua en Asia 2018*. Tokio, Ministerio de Medio Ambiente. wepa-db.net/en/publication/2018_outlook/wepa_outlook_report_2018_en.pdf.

Ministerio de Municipios Regionales, Medio Ambiente y Recursos Hídricos del Sultanato de Omán. 2006. *Sistema de irrigación de Aflaj de Omán*. Nominación a la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO. whc.unesco.org/document/168885.

Ministerio de Recursos Hídricos de la India. 2012. National Water Policy (2012). Government of India, Ministry of Water Resources. jalshakti-dowr.gov.in/sites/default/files/NWP2012Eng6495132651_1.pdf.

____. 2017. 5th Census of Minor Irrigation Schemes Report. Government of India, Ministry of Water Resources, River Development and Ganga Rejuvenation. jalshakti-dowr.gov.in/sites/default/files/5th-MICensusReport_0.pdf

Misstear B., Banks, D. y Clark, L. 2017. *Pozos de agua y perforaciones*. Segunda edición. Chichester, Reino Unido, J. Wiley & Sons.

Moench, M. 2004. Las aguas subterráneas: El reto del control y la gestión. P. Gleick (ed.), *The World's Water 2004-2005: The Biennial Report on Freshwater Resources.* Washington, DC, Island Press.

Mohan, C., Western, A. W., Wei, Y. y Saft, M. 2018. Predicción de la recarga de las aguas subterráneas para variar la cobertura del suelo y las condiciones climáticas - Un meta-estudio global. *Hydrology Earth System Sciences*, Vol. 22, No. 5, pp. 2689-2703. doi.org/10.5194/hess-22-2689-2018.

Molle, F. y Berkoff, J. 2007. *Política de tarificación del agua de irrigación: The Gap Between Theory and Practice.* Cambridge, Mass., CABI North American Office. doi.org/10.1079/9781845932923.0000.

____. 2009. Ciudades vs. agricultura: Una revisión de la reasignación intersectorial del agua. *Natural Resources Forum,* Vol. 33, No. 1, pp. 6-18. doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01204.x.

Molle, F. y Closas, A. 2019. ¿Por qué la gobernanza de las aguas subterráneas centrada en el Estado es en gran medida ineficaz? Una revisión. *WIREs Water*, Vol. 7, No. 1, e1395. doi.org/10.1002/wat2.1395.

____. 2020. La concesión de licencias de aguas subterráneas y sus retos. *Hydrogeology Journal*, Vol. 28, No. 6, pp. 1961-1974. doi.org/10.1007/s10040-020-02179-x.

Mostafaeipour, A. 2010. Historical background, productivity and technical issues of qanats. *Water History*, Vol. 2, pp. 61–80. doi.org/10.1007/s12685-010-0018-z.

Mukherjee, A. 2018. Groundwater of South Asia. A. Mukherjee (ed.), *Springer Hydrogeology*. Springer Singapore. doi.org/10.1007/978-981-10-3889-1.

Mukherji, A. 2017. Managing energy-irrigation nexus: Insights from Karnataka and Punjab states in India. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema, pp. 289-305.

Mukherji, A. 2020. La gestión sostenible de las aguas subterráneas en la India necesita un enfoque del nexo agua-energía-alimentación. *Applied Economic Perspectives and Policy.* doi.org/10.1002/aepp.13123.

Mukherji, A., Das, B., Majumdar, N., Nayak, N. C., Sethi, R. R. y Sharma, B. R. 2009. Metering of agricultural power supply in West Bengal, India: ¿Quién gana y quién pierde? *Energy Policy*, Vol. 37, No. 12, pp. 5530-5539. doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.051.

Müller Schmied, H., Cáceres, D., Eisner, S., Flörke, M., Herbert, C., Niemann, C., Peiris, T.A., Popat, E., Portmann, F. T., Reinecke, R., Schumacher, M., Shadkam, S., Telteu, C-E., Trautmann, T. y Döll, P. 2021. The global water resources and use model WaterGAP v2.2d: Descripción y evaluación del modelo. *Geoscientific Model Development,* Vol. 14, pp. 1037-1079. doi.org/10.5194/gmd-14-1037-2021.

Murray, B. R., Zeppel, M. J. B., Hose, G. C. y Eamus, D. 2003. Groundwater-dependent ecosystems in Australia: Es algo más que agua para los ríos. *Ecological Management & Restoration,* Vol. 4, No. 2, pp. 110-113. doi.org/10.1046/j.1442-8903.2003.00144.x.

Murray, R., Louw, D., Van der Merwe, B. y Peters, I. 2018. Windhoek, Namibia: de la conceptualización a la operación y expansión de un esquema de MAR en un acuífero de cuarcita fracturado para la seguridad hídrica de la ciudad. *Sustainable Water Resources Management*, Vol. 4, pp. 217-223. doi.org/10.1007/s40899-018-0213-0.

Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C. W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B. H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M. y Stohl, A. 2019. La frecuencia de las precipitaciones extremas aumenta ampliamente con la rareza del evento bajo el calentamiento global. *Scientific Reports*, Vol. 9, Artículo 16063. doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4.

Naciones Unidas. 1997. *Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación.* Naciones Unidas. legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/conventions/8_3_1997.pdf.

____. 2018. *Objetivo de Desarrollo Sostenible 6. Informe de síntesis sobre agua y saneamiento 2018.* Nueva York, Naciones Unidas. www.unwater.org/publications/highlights-sdg-6-synthesis-report-2018-on-water-and-sanitation-2/.

____. 2021. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: el Valor del Agua*. París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724.

NASA/NDMC (US National Aeronautics and Space Administration/National Drought Mitigation Center). 2021. *Indicador de sequía de aguas subterráneas poco profundas basado en GRACE para el 7 de junio de 2021.* NDMC, Universidad de Nebraska-Lincoln. nasagrace.unl.edu.

Nel, J., Xu, Y., Batelaan, O. y Brendonck, L. 2009. Beneficio y aplicación de la zonificación de protección de las aguas subterráneas en Sudáfrica. *Water Resources Management*, Vol. 23, No. 14, Article 2895. doi.org/10.1007/s11269-009-9415-4.

Nelson, R. y Quevauviller, P. 2016. Derecho de las aguas subterráneas: Conceptos, enfoques y desafíos. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J.-D. Rinaudo y A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concept, Approaches and Challenges.* Cham, Suiza, Springer International Publishing, pp. 173-196.

Ngowi, A. V. F., Wesseling, C. y London, L. 2012. Developing countries: Pesticide health impacts. S. E. Jorgensen (ed.), *Encyclopedia of Environmental Management.* Boca Raton, Fla., CRC Press, pp. 573–577.

Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meyssignac, B., Hanson, S. E., Merkens, J-L. y Fang, J. 2021. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, Vol. 11, pp. 338–342. doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z.

Nijsten, G-J., Ansems, N., Kukurić, N. y Aureli, A. 2016. *A Multi-Disciplinary Approach and Tools for Comparative and In-Depth Assessments of Transboundary Aquifers.* Documento presentado en la Viet Nam wAter Cooperation Initiative 2016 (WACI 2016), Hanoi, 3-4 de octubre de 2016. www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Nijsten%20et.al_TBA%20assessment%20and%20IMS_VACI2016.pdf.

Northey, S. A., Mudd, G. M., Werner, T. T., Haque, N. y Yellishetty, M. 2019. La gestión sostenible del agua y los informes corporativos en la minería. *Recursos hídricos e industria*, Vol. 21, Artículo 100104. doi.org/10.1016/j.wri.2018.100104.

NWSAS (Sistema Acuífero del Noroeste del Sáhara), Mecanismo de consulta. 2020. *Los beneficios de la cooperación hídrica transfronteriza en la cuenca del Sistema Acuífero del Sáhara Noroccidental.* Policy Brief. www.unece.org/fileadmin/DAM/env/water/activities/Benefits_cooperation/ENG_NWSAS_Brief_BenefitsTransbWatCoop_2020_Web.pdf.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). 2008. *Environmental Performance of Agriculture in OECD Countries since 1990.* París, OECD Publishing. www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/44254899.pdf.

____. 2010a. *La tarificación del agua en la agricultura: UE y México.* París, OCDE. www.oecd.org/eu/45015101.pdf.

____. 2010b. *Programa Horizontal del Agua de la OCDE - Financiación de la gestión de los recursos hídricos. Background Notes on Financing Water Resources Management*. www.oecd.org/env/resources/46228672.pdf.

____. 2011. *Environmental Taxation. A Guide for Policy Makers*. www.oecd.org/env/tools-evaluation/48164926.pdf.

____. 2012a. *Calidad del agua y agricultura: Meeting the Policy Challenge.* Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264168060-en.

____. 2012b. *Un marco para la financiación de la gestión de los recursos hídricos.* Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264179820-en.

____. 2016. *Afrontar los retos del uso de las aguas subterráneas en la agricultura*. Mayo de 2016. www.oecd.org/greengrowth/sustainable-agriculture/Challenges%20of%20groundwater%20use.pdf

____. 2017a. *Contaminación difusa, aguas degradadas: Soluciones políticas emergentes.* Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264269064-en.

____. 2017b. Asignación de aguas subterráneas: *Gestión de las crecientes presiones sobre la cantidad y la calidad.* Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/9789264281554-en.

____. 2018. *Financiación del agua: Invertir en el crecimiento sostenible.* Documentos de política medioambiental de la OCDE nº 11. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/bf67ec4e-en.

____. 2019a. *Residuos farmacéuticos en el agua dulce: Peligros y respuestas políticas*. Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/c936f42d-en.

____. 2019b. *Hacer que la financiación combinada funcione para el agua y el saneamiento: Unlocking Commercial Finance for SDG 6*. Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/5efc8950-en.

____. 2021. *Gobernanza del agua en el Perú*. Estudios de la OCDE sobre el agua. París, OECD Publishing. doi.org/10.1787/568847b5-en.

____. s.f. *Registro de emisiones y transferencias de contaminantes*. Sitio web de la OCDE. www.oecd.org/chemicalsafety/pollutant-release-transfer-register/.

Ochieng, G. M., Seanego, E. S. y Nkwonta, O. I. 2010. Impacts of mining on water resources in South Africa: A review. *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, No. 22, pp. 3351–3357.

OEA (Organización de Estados Americanos). 2009. *Aquífero Guarani: programa estratégico de ação = Acuífero Guaraní: programa estratégico de acción*. OEA (En portugués y español).

OIM (Organización Internacional para las Migraciones). 2019. *Skyscraper-Depth Well brings Clean Water to Rohingya Refugees*. Noticias y comunicado de prensa, 17 de mayo de 2019. reliefweb.int/report/bangladesh/skyscraper-deepth-well-brings-clean-water-rohingya-refugees.

Oiro, S., Comte, J-C., Soulsby, C., MacDonald, A. M. y Mwakamba, C. 2020. Agotamiento de los recursos hídricos subterráneos bajo la rápida urbanización en África: Recent and future trends in the Nairobi Aquifer System, Kenya. *Hydrogeology Journal*, Vol. 28, pp. 2635-2656. doi.org/10.1007/s10040-020-02236-5.

Olago, D., Marshall, M., Wandiga, S. O., Opondo, M., Yanda, P. Z., Kangalawe, R., Githeko, A., Downs, T., Opere, A., Kabumbuli, R., Kirumira, E., Ogallo, L., Mugambi, P., Apindi, E., Githui, F., Kathuri, J., Olaka, L., Sigalla, R., Nanyunja, R., Baguma, T. y Achola, P. 2007. Climatic, socio-economic, and health factors affecting human vulnerability to cholera in the Lake Victoria basin, East Africa. *Ambio*, Vol. 36, No. 4, pp. 350–358. doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[350:csahfa]2.0.co;2.

Olivier, D. W. y Xu, Y. 2019. Hacer un uso eficaz de las aguas subterráneas para evitar otra crisis de abastecimiento de agua en Ciudad del Cabo, Sudáfrica. *Hydrogeology Journal*, Vol. 27, pp. 823-826. doi.org/10.1007/s10040-018-1893-0.

Olson, D. M. y Dinerstein, E. 2002. The Global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden,* Vol. 89, No. 2, pp. 199-224. doi.org/10.2307/3298564.

Oluwasanya, G., Smith, J. y Carter, R. 2011. Sistemas de autoabastecimiento: Urban dug wells in Abeokuta, Nigeria. *Water Supply*, Vol. 11, No. 2, pp. 172-178. doi.org/10.2166/ws.2011.026.

OMS (Organización Mundial de la Salud). 2018. *Liberaciones de sustancias químicas causadas por eventos de peligro natural y desastres. Información para las autoridades de salud pública.* Ginebra, OMS. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. www.who.int/publications/i/item/9789241513395.

ONU-Agua. 2018. *SDG 6 Public Dialogue Report*. www.unwater.org/publications/sdg-6-public-dialogue-report/.

____. 2021. *Resumen de los progresos realizados en 2021 - ODS 6 - agua y saneamiento para todos*. Versión: Julio 2021. Ginebra, Suiza. www.unwater.org/app/uploads/2021/12/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021a.pdf.

ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial). Sin publicar. Información obtenida de Christian Susan (ONUDI, Oficial de Desarrollo Industrial) en 2021.

ONUDI/Grupo del Banco Mundial/GIZ (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial/Grupo del Banco Mundial/ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH). 2021. *An International Framework for Eco-Industrial Parks, Version 2.0*. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35110.

Opie, S., Taylor, R. G., Brierley, C. M., Shamsudduha, M. y Cuthbert, M. O. 2020. Climate–groundwater dynamics inferred from GRACE and the role of hydraulic memory. *Earth System Dynamics*, Vol. 11, pp. 775–791. doi.org/10.5194/esd-11-775-2020.

Ortigara, A. R. C., Kay, M. y Uhlenbrook, S. 2018. Una revisión del informe de síntesis del ODS 6 2018 desde una perspectiva de educación, formación e investigación. *Water*, Vol. 10, No. 10, Article 1353. doi.org/10.3390/w10101353.

Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S. y De Louw, P. G. B. 2010. Efectos del cambio climático en los sistemas de aguas subterráneas costeras: Un estudio de modelización en los Países Bajos. *Water Resources Research,* Vol. 46, No. 10, W00F04. doi. org/10.1029/2009WR008719.

P

Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J. y Sidhu, J. 2018. Managed Aquifer Recharge (MAR) en la gestión sostenible del agua urbana. *Water*, Vol. 10, No. 3, Article 239. doi.org/10.3390/w10030239.

Pandit, C. y Biswas, A. K. 2019. La Política Nacional del Agua de la India: un documento "para sentirse bien", nada más. *International Journal of Water Resources Development,* Vol. 35, No. 6, pp. 1015-1028. doi.org/10.1080/07900627.2019.1576509.

Parlamento Europeo/Consejo. 2000. Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L. 327/1. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj.

____. 2006. Directiva 2006/118/EC del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de diciembre de 2006 relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L. 372/19. eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/118/oj.

Pascolini-Campbell, M., Reager, J. T., Chandanpurkar, H. A. y Rodell, M. 2021. Un aumento del 10 % en la evapotranspiración terrestre mundial de 2003 a 2019. *Nature*, Vol. 593, pp. 543-547. doi.org/10.1038/s41586-021-03503-5.

Pavelic, P., Giordano, M., Keraita, B., Ramesh, V. y Rao, T. (eds.). 2012. *Groundwater Availability and Use in Sub-Saharan Africa: A Review of 15 Countries*. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). doi.org/10.5337/2012.213.

Pavelic, P., Villholth, K. G., Shu, Y., Rebelo, L.-M. y Smakhtin, V. 2013. Irrigación de aguas subterráneas para pequeños agricultores en el África subsahariana: Estimaciones a nivel de país del potencial de desarrollo. *Water International,* Vol. 38, No. 4, pp. 392-407. doi.org/10.1080/02508060.2013.819601.

Peal, A., Evans, B., Ahilan, S., Ban, R., Blackett, I., Hawkins, P., Schoebitz, L., Scott, R., Sleigh, A., Strande, L. y Veses, O. 2020. Estimación del saneamiento gestionado de forma segura en áreas urbanas: Lecciones aprendidas para una implementación global de diagramas de flujo de excretas. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 8, No.1. doi.org/10.3389/fenvs.2020.00001.

Petersen-Perlman, J. D., Megdal, S. B., Gerlak, A. K., Wireman, M., Zuniga-Teran, A. A. y Varady, R. G. 2018. Cuestiones críticas que afectan a la gobernanza y la gestión de la calidad de las aguas subterráneas en los Estados Unidos. *Water*, Vol. 10, No. 6, Artículo 735. doi.org/10.3390/w10060735.

Pimentel, D. 2005. Costes ambientales y económicos de la aplicación de plaguicidas principalmente en los Estados Unidos. *Environment, Development and Sustainability,* Vol. 7, pp. 229-252. doi.org/10.1007/s10668-005-7314-2.

Plummer, J. 2012. *Diagnosticando la corrupción en Etiopía: Perceptions, Realities, and the Way Forward for Key Sectors. Directions in Development-Public Sector Governance*. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13091.

PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo)/Ministerio de Energía y Agua del Líbano. 2014. *Evaluación de los recursos de aguas subterráneas del Líbano.* www.lb.undp.org/content/lebanon/en/home/library/environment_energy/assessment-of-groundwater-resources-of-lebanon.html.

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2019. *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial Geo 6: Planeta sano, gente sana.* Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781108627146.

____. 2020. *SDG Indicator 6.3.2 Technical Guidance Document No. 3: Monitoring and Reporting for Groundwater.* communities.unep.org/download/attachments/32407814/CDC_GEMI2_TechDoc3_Groundwaters_20200402.pdf?version=3&modificationDate=1595432885358&api=v2.

Polemio, M. y Walraevens, K. 2019. Resultados recientes de la investigación sobre los recursos de agua subterránea y la intrusión de agua salada en un entorno cambiante. *Water*, Vol. 11, No. 6, Article 1118. doi.org/10.3390/w11061118.

Post, V. E. A., Groen, J., Kooi, H., Person, M., Ge, S. y Edmunds, W. M. 2013. Offshore fresh groundwater reserves as a global phenomenon. *Nature*, Vol. 504, pp. 71–78. doi.org/10.1038/nature12858.

Powell, O. y Fensham, R. 2016. La historia y el destino de los manantiales del acuífero de arenisca de Nubia en las depresiones de los oasis del desierto occidental, Egipto. *Hydrogeology Journal*, Vol. 24, pp. 395-406. doi.org/10.1007/s10040-015-1335-1.

Prestinaci, F., Pezzotti, P. y Pantosti, A. 2015. Resistencia a los antimicrobianos: Un fenómeno global multifacético. *Pathogens and Global Health*, Vol. 109, No. 7, pp. 309-318. doi.org/10.1179/2047773215Y.0000000030.

Prinet, C., Thibeau, S., Lescanne, M. y Monne, J. 2013. Piloto de demostración de captura y almacenamiento de CO_2 de Lacq-Rousse: Lecciones aprendidas tras dos años y medio de seguimiento. *Energy Procedia,* Vol. 37, pp. 3610-3620. doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.254.

Proyecto de Gobernanza de las Aguas Subterráneas. 2016a. *Diagnóstico mundial sobre la gobernanza de las aguas subterráneas.* Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma. www.fao.org/3/i5706e/i5706e.pdf.

Prosser, I., Wolf, L. y Littleboy, A. 2011. El agua en la minería y la industria. I. Prosser (ed.), *Water: Science and Solutions for Australia*. Collingwood, Australia, CSIRO Publishing. www.publish.csiro.au/book/6557.

Puri, S. y Villholth, K. G. 2018. Gobernanza y gestión de acuíferos transfronterizos. K. G. Villholth, E. López Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema, pp. 367-388.

____. 2021. Yo digo 'acuífero' y ella dice 'aguas subterráneas'... Cancelemos todo el asunto... (con disculpas a Ella Fitzgerald y Satchmo). *Foro de Alternativas del Agua*, 15 de mayo de 2021. www.water-alternatives.org/index.php/blog/aquifer.

Qadir, M., Quillérou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R. J., Drechsel, P. y Noble, A. D. 2014. Economics of salt-induced land degradation and restoration (Economía de la degradación y restauración de la tierra inducida por la sal). *Natural Resources Forum,* Vol. 38, No. 4, pp. 282-295. doi.org/10.1111/1477-8947.12054.

Quevauviller, P., Batelaan, O. y Hunt, R. 2016. Regulación de las aguas subterráneas y planificación integrada del agua. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J-D. Rinaudo y A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Cham, Suiza, Springer International Publishing.

Qureshi, A. S. 2020. La gobernanza de las aguas subterráneas en el Pakistán: Del desarrollo colosal a la gestión descuidada. *Water*, Vol. 12, No. 11, Article 3017. doi.org/10.3390/w12113017.

R

Rajan, A., Ghosh, K. y Shah, A. 2020. Carbon footprint of India's groundwater irrigation. *Carbon Management*, Vol. 11, No. 3, pp. 265–280. doi.org/10.1080/17583004.2020.1750265.

Rajkumar, Y. y Xu, Y. 2011. Protection of borehole water quality in Sub-Saharan Africa using minimum safe distances and zonal protection. *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 13, pp. 3413–3425. doi.org/10.1007/s11269-011-9862-6.

Rathay, S. Y., Allen, D. M. y Kirste, D. 2018. Respuesta de un acuífero de lecho rocoso fracturado a la recarga de eventos de lluvia intensa. *Journal of Hydrology*, Vol. 561, pp. 1048-1062. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.042.

Ray, C. (ed.). 2020. *Sacred Waters: A Cross-Cultural Compendium of Hallowed Springs and Holy Wells*. Oxon, UK, Routledge.

Re, V. 2015. Incorporación de la dimensión social en las investigaciones hidrogeoquímicas para el desarrollo rural: El enfoque de Bir Al-Nas para la socio-hidrogeología. *Hydrogeology Journal,* Vol. 23, pp. 1293-1304. doi.org/10.1007/s10040-015-1284-8.

Re, V. y Misstear, B. 2018. Educación y desarrollo de capacidades para la gestión de los recursos hídricos subterráneos. K. G. Villholth, E. López-Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance.* Leiden, Países Bajos, CRC Press/Taylor & Francis, pp. 212-230.

Reinecke, R., Müller Schmied, H., Trautmann, T., Andersen, L. S., Burek, P., Flörke, M., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hanasaki, N., Koutroulis, A., Pokhrel, Y., Thiery, W., Wada, Y., Yusuke, S. y Döll, P. 2021. Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: A global-scale multi-model ensemble study. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 25, pp. 787–810. doi.org/10.5194/hess-25-787-2021.

Reino de Tonga. 2020. *Segunda Contribución Nacionalmente Determinada* (NDC) de Tonga. Submission under the Paris Agreement, December 2020. www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Tonga%20Second/Tonga%27s%20Second%20NDC.pdf.

Reino de Tonga/Grupo del Banco Mundial/FIDA (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola)/PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2016. *Tonga Agriculture Sector Plan* 2016-2020. www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC168836/.

República de Sudáfrica. 2010. *Estrategia de aguas subterráneas 2010*. Departamento de Asuntos Hídricos, República de Sudáfrica. www.dwa.gov.za/Groundwater/Documents/GSDocument%20FINAL%202010_MedRes.pdf.

República Popular China. 1988. *Decreto del Presidente de la República Popular China Orden Nº 61: "Ley de Aguas de la República Popular China".*

Reynolds, E. R. C. y Thompson, F. B. (eds.). 1988. *Forests, Climate, and Hydrology: Regional Impacts*. Tokyo, The United Nations University (UNU). archive.unu.edu/unupress/unupbooks/80635e/80635E00.htm.

RFO. 2015. *Reglamento de Subvenciones de Asuntos Económicos Nacionales - Cubrir los riesgos del calor geotérmico. Manual: Régimen de garantía contra el riesgo de perforación* [Reglamento de Subvenciones de Asuntos Económicos Nacionales - Cobertura de los riesgos de la geotermia. Manual: Sistema de garantía contra el riesgo de errores de perforación]. Roermond, Países Bajos, Ministerio de Economía de los Países Bajos. (En holandés). www.rvo.nl/sites/default/files/Handleiding_SEI%20RNES%20risico%20aardwarmte%2014_09_2015.pdf.

Rhodes, S. L. y Wheeler, S. E. 1996. Rural electrification and irrigatión in the U.S. High Plains. *Journal of Rural Studies*, Vol. 12, No. 3, pp. 311–317. doi.org/10.1016/0743-0167(96)00005-8.

Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S. y Rodell, M. 2015. Cuantificación del estrés de las aguas subterráneas renovables con GRACE. *Water Resources Research*, Vol. 51, No. 7, pp. 5217-5238. doi.org/10.1002/2015WR017349.

Riedel T. 2019. Cambios asociados a la temperatura en la calidad del agua subterránea. *Journal of Hydrology*, Vol. 572, pp. 206-212. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.059.

Ringrose, P. S. 2018. El centro de CAC en Noruega: Algunas percepciones de 22 años de almacenamiento en acuíferos salinos. *Energy Procedia*, Vol. 146, pp. 166-172. doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.021.

Ritchie, H. y Roser, M. 2017. *Uso y estrés del agua*. OurWorldInData.org. ourworldindata.org/water-use-stress. (Consultado en marzo de 2021).

Rivera, A. (ed.). 2014. *Canada's Groundwater Resources*. Markham, Ont., Fitzhenry & Whiteside.

____. 2015. Acuíferos transfronterizos a lo largo de la frontera entre el Canadá y los Estados Unidos: Ciencia, política y cuestiones sociales. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 4, Parte B, pp. 623-643. doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.09.006.

____. 2020. *El estado del conocimiento y la gestión compartida de los acuíferos transfronterizos a escala mundial.* Conferencia principal en la Cumbre de la Asociación Nacional de Aguas Subterráneas, 8 de diciembre de 2020.

Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoing, H. K., Landerer, F. W. y Lo, M-H. 2018. Tendencias emergentes en la disponibilidad global de agua dulce. *Nature*, Vol. 557, pp. 651-659. doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1.

Rohde, M. M., Froend, R. y Howard, J. 2017. Una síntesis global de la gestión de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas en el marco de una política sostenible de aguas subterráneas. *Groundwater*, Vol. 55, No. 3, pp. 293-301. doi.org/10.1111/gwat.12511.

Ross, A. 2016. La gobernanza de las aguas subterráneas en Australia, la Unión Europea y el oeste de los Estados Unidos. A. J. Jakeman, O. Barreteau, R. J. Hunt, J-D. Rinaudo y A. Ross (eds.), *Integrated Groundwater Management: Concept, Approaches and Challenges*. Cham, Suiza, Springer International Publishing, pp. 145-171.

RSIS (Ramsar Sites information Service). s.f. RSIS website. rsis.ramsar.org/ (Consultado el 15 de mayo de 2021).

Ruz, C., Samaniego, L. y Rangel Medina, M. 2020. Estado actual del monitoreo de agua subterránea en América Latina e introducción al programa GGMN [Current state of groundwater monitoring in Latin American and introduction to the Global Groundwater Monitoring Network]. *Revista Aqua–LAC*, Vol. 12, No. 1. (En español). www.un-igrac.org/es/resource/estado-actual-del-monitoreo-de-agua-subterranea-en-america-latina-e-introduccion-al.

SADC-GMI/IGRAC/IGS (Comunidad para el Desarrollo del África Meridional-Instituto de Gestión de Aguas Subterráneas/Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas/Instituto de Estudios de Aguas Subterráneas). 2019a. *State of Groundwater Data Collection and Data Management in SADC Member States*. sadc-gmi.org/wp-content/uploads/2020/03/State-of-GW-data-in-SADC_2019.pdf.

____. 2019b. *Marco de la SADC para la recogida y gestión de datos de aguas subterráneas*. Bloemfontein, SADC-GMI. www.un-igrac.org/resource/sadc-framework-groundwater-data-collection-and-management.

Salman, S. M. A. y Bradlow, D. 2006. *Regulatory Frameworks for Water Resources Management: A Comparative Study.* Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7054.

Santos, I. R., Chen, X., Lecher, A. L., Sawyer, A. H., Moosdorf, N., Rodellas, V., Tamborski, J., Cho, H-M., Dimova, N., Sugimoto, R., Bonaglia, S., Li, H., Hajati, M-C. y Li, L. 2021. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry. *Nature Reviews Earth & Environment*, Vol. 2, pp. 307–323. doi.org/10.1038/s43017-021-00152-0.

Scanlon, B. R., Healy, R. W. y Cook, P. G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10, pp. 18–39. doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2.

Scanlon, B. R., Levitt, D. G., Reedy, R. C., Keese, K. E., Sully, M. J. 2005. Ecological controls on water-cycle response to climate variability in deserts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 102, No. 17, pp. 6033–6038. doi.org/10.1073/ pnas.0408571102.

Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Gaye, C. B., Edmunds, W. M. y Simmers, I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, Vol. 20, No. 15, pp. 3335–3370. doi.org/10.1002/hyp.6335.

Scanlon, B. R., Faunt, C.C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., McGuire, V. L. y McMahon, P. B. 2012a. Agotamiento de las aguas subterráneas y sostenibilidad de la irrigación en las Altas Planicies y el Valle Central de Estados Unidos. *PNAS*, Vol. 109, No. 24, pp. 9320-9325. doi.org/10.1073/pnas.1200311109.

Scanlon, B. R., Longuevergne, L. y Long, D. 2012b. Estimaciones de los cambios en el almacenamiento de agua subterránea en el Valle Central de California, Estados Unidos, basadas en el satélite GRACE. *Water Resources Research,* Vol. 48, No. 4, W04520. doi.org/10.1029/2011WR011312.

Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Faunt, C. C., Pool, D. y Uhlman, K. 2016. Mejora de la resiliencia a la sequía con el uso conjunto y la recarga gestionada de acuíferos en California y Arizona. *Environmental Research Letters,* Vol. 11, No. 3, pp. 1-15. doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/035013.

Schneider, P. y Asch, F. 2020. Rice production and food security in Asian Mega deltas – A review on characteristics, vulnerabilities and agricultural adaptation options to cope with climate change. *Journal of Agronomy and Crop Sciences*, Vol. 206, No. 4, pp. 491–503. doi.org/10.1111/jac.12415.

Schoengold, K. y Zilberman, D. 2007. La economía del agua, la irrigación y el desarrollo. *Handbook of Agricultural Economics,* Vol. 3, pp. 2933-2977. doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03058-1.

Schreinemachers, P. y Tipraqsa, P. 2012. Plaguicidas agrícolas e intensificación del uso de la tierra en países de ingresos altos, medios y bajos. *Food Policy*, Vol. 37, No. 6, pp. 616-626. doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.06.003.

Schulze-Makuch, D. 2005. Datos de dispersividad longitudinal e implicaciones para el comportamiento de la escala. *Groundwater,* Vol. 43, No. 3, pp. 443-456. doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x.

Scott, C. A. 2013. Electricidad para el uso de aguas subterráneas: Restricciones y oportunidades para la respuesta adaptativa al cambio climático. *Environmental Research Letters*, Vol. 8, No. 3, Artículo 035005. doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035005.

Scott, C. A. y Sharma, B. 2010. El abastecimiento de energía y la expansión de la irrigación de aguas subterráneas en la cuenca del Indo-Ganges. *International Journal of River Basin Management*, Vol. 7, No. 2, pp. 119-124. doi.org/10.1080/15715124.2009.9635374.

Secretaría de la Convención de Ramsar. 2010. *Gestión de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales.* Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales. Cuarta edición, Vol. 11. Gland, Suiza, Secretaría de la Convención de Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/hbk4-11.pdf.

____. 2013. *El Manual de la Convención de Ramsar: Guía de la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971).* Sexta edición. Gland, Suiza, Secretaría de la Convención de Ramsar. www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-e.pdf.

____. 2018. *Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas 2018.* Gland, Suiza, Secretaría de la Convención de Ramsar. medwet.org/publications/ramsar-global-wetland-outlook-2018/.

Seddon, D., Kashaigili, J. J., Taylor, R. G., Cuthbert, M. O., Mwihumbo, C. and MacDonald, A. M. 2021. Focused groundwater recharge in a tropical dryland: Empirical evidence from central, semi-arid Tanzania. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 37, Article 100919. doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100919.

Şen, Z., Al Sefry, S., Al Ghamdi, S., Ashi, W. y Bardi, W. 2013. Planificación estratégica de los recursos hídricos subterráneos en las regiones áridas. *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 6, pp. 4363-4375. doi.org/10.1007/s12517-012-0701-8.

Shah, T. 2007. La economía de las aguas subterráneas del sur de Asia: An assessment of size, significance and socio-ecological impacts. M. Giordano y K. G. Villholth (eds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development.* Wallingford, Reino Unido, CABI. pp. 7-36. cgspace.cgiar.org/handle/10568/36474.

Shah, T. 2009. *Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia.* Nueva Delhi, Routledge.

Shah, T., Bhatt, S., Shah, R. K. y Talati, J. 2008. Gobernanza de las aguas subterráneas mediante la gestión del abastecimiento de electricidad: Assessing an innovative intervention in Gujarat, Western India. *Agricultural Water Management,* Vol. 95, No. 11, pp. 1233-1242. doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.006.

Shah, T., Burke, J., Villholth, K. G., Angelica, M., Custodio, E., Daibes, F., Hoogesteger, J., Giordano, M., Girman, J., Van der Gun, J., Kendy, E., Kijne, J., Llamas, R., Masiyandima, M., Margat, J., Marin, L., Peck, J., Rozelle, S., Sharma, B. R., Vincent, L. y Wang, J. 2007. Groundwater: Una evaluación global de la escala y la importancia. Evaluación exhaustiva de la gestión del agua en la agricultura. D. Molden (ed.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture.* Londres/Colombo, Earthscan/International Water Management Institute (IWMI). pp. 395-423.

Shah, T., Darghouth, S. y Dinar, A. 2006. *Conjunctive Use of Groundwater and Surface Water.* Agricultural and Rural Development Notes, No. 6. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/9641.

Shah, T., Giordano, M. y Mukherji, A. 2012. Political economy of the energy-groundwater nexus in India: Exploring issues and assessing policy options. *Hydrogeology Journal*, Vol. 20, No. 5, pp. 995–1006. doi.org/10.1007/s10040-011-0816-0.

Shah, T., Rajan, A., Rai, G. P., Verma, S. y Durga, N. 2018. Las bombas solares y el nexo energía-agua subterránea del sur de Asia: Explorando las implicaciones y reimaginando su futuro. *Environmental Research Letters*, Vol. 13, No. 11, Artículo 115003. doi.org/10.1088/1748-9326/aae53f.

Shah, T., Roy, A. D., Qureshi, A. S. y Wang, J. 2003. Sostener el auge de las aguas subterráneas en Asia: An overview of issues and evidence. *Natural Resources Forum*, Vol. 27, No. 2, pp. 130-141. doi.org/10.1111/1477-8947.00048.

Shahid, S. A., Zaman, M. y Heng, L. 2018. La salinidad del suelo: Perspectivas históricas y panorama mundial del problema. M. Zaman, S. A. Shahid y L. Heng, *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques.* Cham, Suiza, Springer Open, pp. 43-53. doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2.

Shamsudduha, M. y Taylor, R. G. 2020. Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: Uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics*, Vol. 11, No. 3, pp. 755–774. doi.org/10.5194/esd-11-755-2020.

Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Jones, D., Longuevergne, L., Owor, M. y Tindimugaya, C. 2017. Cambios recientes en el almacenamiento de agua terrestre en la cuenca del Alto Nilo: Una evaluación de los productos GRACE cuadriculados comúnmente utilizados. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 9, pp. 4533-4549. doi.org/10.5194/hess-21-4533-2017.

Shamsudduha, M., Joseph, G., Haque, S. S., Khan, M. R., Zahid, A. y Ahmed, K. M. U. 2020. Riesgos múltiples de las aguas subterráneas para el abastecimiento de agua a poca profundidad: Challenges to achieving the Sustainable Development Goals in Bangladesh. *Exposure and Health*, Vol. 12, pp. 657-667. doi.org/10.1007/s12403-019-00325-9.

Shao, W., Zhou, J., Liu, J., Zhang, H., Wang, J., Xiang, C., Yang, G. y Tang, Y. 2017. Un análisis del efecto del tratamiento integral de la sobreexplotación de las aguas subterráneas en el condado de Cheng'an, provincia de Hebei, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* Vol. 14, No. 1, Article 41. doi.org/10.3390/ijerph14010041.

Sharaky, A. M., El Abd, E. S. A. y Shanab, E. F. 2018. Evaluación de las aguas subterráneas para la irrigación agrícola en el área de Toshka, Desierto Occidental, Egipto. A. M. Negm (ed.), *Conventional Water Resources and Agriculture in Egypt.* The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 74. Cham, Suiza, Springer International Publishing, pp. 347-388. doi.org/10.1007/698_2017_124.

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Singh Sidhu, G. P., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R. y Thukral, A. K. 2019. Uso mundial de plaguicidas y sus impactos en el ecosistema. *SN Applied Sciences*, Vol. 1, Artículo 1446. doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1.

Shi, X., Qin, T., Nie, H., Weng, B. y He, S. 2019. Cambios en las principales descargas fluviales mundiales dirigidas al océano. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, No. 8, Artículo 1469. doi.org/10.3390/ijerph16081469.

Shiklomanov, I. A. y Rodda, J. 2003. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century.* Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.

Sidhu, B. S., Kandlikar, M. y Ramankutty, N. 2020. Power tariffs for groundwater irrigation in India: A comparative analysis of the environmental, equity, and economic tradeoffs. *World Development*, Vol. 128, Artículo 104836. doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104836.

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P. y Portmann, F. T. 2010. Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 14, No. 10, pp. 1863–1880. doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010.

Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K. y Burke, J. 2013. *Actualización del Mapa Global Digital de Áreas de Irrigación (GMIA) a la versión 5.* Bonn, Alemania, Instituto de Ciencias de los Cultivos y Conservación de Recursos, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität. www.fao.org/3/I9261EN/i9261en.pdf.

Sindico, F., Hirata, R. y Manganelli, A. 2018. El Sistema Acuífero Guaraní: De faro de esperanza a interrogante en la gobernanza de los acuíferos transfronterizos. *Revista de Hidrología: Regional Studies*, Vol. 20, pp. 49-59. doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008.

Singh, A. 2021. Gestión de la salinización del suelo para el desarrollo sostenible: A review. *Journal of Environmental Management,* Vol. 277, Artículo 111383. doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111383.

Small, E. E. 2005. Climatic controls on diffuse groundwater recharge in semiarid environments of the southwestern United States. *Water Resources Research*, Vol. 41, W04012.

Smilovic, M., Gleeson, T. y Siebert, S. 2015. The limits of increasing food production with irrigation in India. *Food Security*, Vol. 7, pp. 835–856. doi.org/10.1007/s12571-015-0477-2.

Smith, B. L. 2003. *Public Policy and Public Participation: Engaging Citizens and Community in the Development of Public Policy.* Producido para la Subdivisión de Población y Salud Pública, Oficina Regional del Atlántico, Health Canada, Halifax. atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/3139/Smith_Public_Policy_and_Public_Participation_Engaging_Citizens_and_Community_in_the_Development_of_Public_Policy_complete.pdf?sequence=24&isAllowed=y.

Smith, M., Cross, K., Paden, M. y Laban, P. (editores). 2016. Manantial: *La gestión sostenible de las aguas subterráneas.* Gland, Suiza, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). doi.org/10.2305/UICN).CH.2016.WANI.8.en.

Smith, M. G. y Urpelainen, J. 2016. Electrificación rural y bombas de agua subterránea en la India: Evidence from the 1982-1999 period. *Resource and Energy Economics*, Vol. 45, pp. 31-45. doi.org/10.1016/j.reseneeco.2016.05.004.

Smolders, A. J. P., Lucassen, E. C. H. E. T., Bobbink, R., Roelofs, J. G. M. y Lamers, L. P. M. 2010. Cómo la lixiviación de nitratos de las tierras agrícolas provoca la eutrofización de los fosfatos en los humedales alimentados por aguas subterráneas: El puente de azufre. *Biogeochemistry,* Vol. 98, pp. 1-7. doi.org/10.1007/s10533-009-9387-8.

Snapp, S., Kebede, Y., Wollenberg, E., Dittmer, K. M., Brickman, S., Egler, C. y Shelton, S. 2021. *Agroecology and Climate Change Rapid Evidence Review: Performance of Agroecological Approaches in Low- and Middle- Income Countries.* Wageningen, Países Bajos, Programa de Investigación del CGIAR sobre Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS). hdl.handle.net/10568/113487.

Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G.-H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraër, M. y Silva, Y. 2019. Las aguas subterráneas amortiguan la disminución del derretimiento de los glaciares en una cuenca andina - pero no para siempre. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 22, pp. 13016-13026. doi.org/10.1029/2019GL084730.

Sorensen, J. P., Lapworth, D. J., Nkhuwa, D. C. W., Stuart, M. E., Gooddy, D. C., Bell, R. A., Chirwa, M., Kabika, J., Liemisa, M., Chibesa, M. y Pedley, S. 2015. Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa. *Water Research*, Vol. 72, pp. 51–63. doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.002.

SpotView. 2018. Water Efficiency in the Pulp & Paper Industry Situation and new Challenges. www.spire2030.eu/sites/default/files/users/user500/05_Water%20efficiency%20Pulp%20and%20Paper_Fourest_Andres.pdf.

Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F. y Hannappel, S. 2017. Inventario de lugares de recarga de acuíferos gestionados en Europa: Desarrollo histórico, situación actual y perspectivas. *Hydrogeology Journal*, Vol. 25, pp. 1909-1922. doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8.

Stanton, J. S. y Dennehy, K. F. 2017. *Aguas subterráneas salobres y su potencial para aumentar el abastecimiento de agua dulce.* USGS Factsheet 2017-3054. doi.org/10.3133/fs20173054.

Statistics Canada. s.f. Tabla 38-10-0070-01. *Consumo de agua en las industrias de extracción de minerales y de generación de energía termoeléctrica, por fuente, por región y por industria (x 1.000.000).* doi.org/10.25318/3810007001-eng.

Stephan, R. M. 2011. The Draft Articles on the Law of Transboundary Aquifers, The process at the UN ILC. *International Community Law Review*, Vol. 13, No. 3, pp. 223–235. doi.org/10.1163/187197311X582287.

Steyl, G. y Dennis, I. 2010. Review of coastal-area aquifers in Africa. *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, pp. 217–225. doi.org/10.1007/s10040-009-0545-9.

Stigter, T. Y., Nunes, J. P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., Monteiro, J. P., Silva, A., Tavares, P. C. F., Shapouri, M., Cancela da Fonseca, L. y El Himer, H. 2014. Evaluación comparativa del cambio climático y sus impactos en tres acuíferos costeros del Mediterráneo. *Regional Environmental Change,* Vol. 14, pp. 41-56. doi.org/10.1007/s10113-012-0377-3.

Stuyfzand, P. J., Smidt, E., Zuurbier, K. G., Hartog, N. y Dawoud, M. A. 2017. Observaciones y predicción de la calidad recuperada del agua de mar desalada en el proyecto estratégico ASR en Liwa, Abu Dhabi. *Water*, Vol. 9, No. 3. Artículo 177. doi.org/10.3390/w9030177.

Sui, Q., Cao, X., Lu, S., Zhao, W., Qiu, Z. y Yu, G. 2015. Ocurrencia, fuentes y destino de los productos farmacéuticos y de cuidado personal en las aguas subterráneas: A review. *Emerging Contaminants*, Vol. 1, No. 1, pp. 14-24. doi.org/10.1016/j.emcon.2015.07.001.

Sultana, S., Ahmed, K. M., Mahtad-Ul-Alam, S. M., Hasan, M., Tuinhof, A., Ghosh, S. K., Rahman, M. S., Ravenscroft, P. y Zheng, Y. 2015. Almacenamiento y recuperación de acuíferos de bajo coste: Implicaciones para mejorar el acceso al agua potable de las comunidades rurales de la costa de Bangladesh. *Journal of Hydrologic Engineering,* Vol. 20, No. 3, B5014007. doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001100.

SUNASS (Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento). 2017. *Nuevo régimen especial de monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas a cargo de las EPS: Metodología, criterios técnico-económicos y procedimiento para determinar la tarifa* [New special groundwater monitoring and use management scheme under the responsibility of the sanitation services providers: Methodology, technical-economic criteria and method to determine tariffs]. Lima, SUNASS. hdl.handle.net/20.500.12543/4679. (En español).

Sutton, S. 2017. Tendencias en el abastecimiento de agua rural subsahariano y la inclusión esencial del autoabastecimiento para alcanzar las metas de los ODS de 2030. *Waterlines*, Vol. 36, No. 4, pp. 339-357. www.jstor.org/stable/26600804.

Sutton, S. y Butterworth, J. 2021. *Autoabastecimiento: Filling the Gaps in Public Water-Supply Provision*. Rugby, Reino Unido, Practical Action Publishing. doi.org/10.3362/9781780448190.

Swanson, R. K., Springer, A. E., Kreamer, D. K., Tobin, B. W. y Perry, D. M. 2021. Cuantificación del caudal base del río Colorado: Su importancia en el mantenimiento del flujo perenne en el norte de Arizona y el sur de Utah (EEUU). *Hydrogeology Journal*, Vol. 29, pp. 723-736. doi.org/10.1007/s10040-020-02260-5.

T

Talbot, C. J., Bennett, E. M., Cassell, K., Hanes, D. M., Minor, E. C., Pearl, H., Raymond, P. A., Vargas, R., Vidon, P. G., Wollheim, W. y Xenopoulos, M. A. 2018. El impacto de las inundaciones en los servicios de los ecosistemas acuáticos. *Biogeochemistry*, Vol. 141, pp. 439-461. doi.org/10.1007/s10533-018-0449-7.

Tang, F. H. M., Lenzen, M., McBratney, A. y Maggi, F. 2021. Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience*, Vol. 14, pp. 206–210. doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5.

Tang, H. P.-O. 2013. Recent development in analysis of persistent organic pollutants under the Stockholm Convention. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 45, pp. 48–66. doi.org/10.1016/j.trac.2013.01.005.

Taniguchi, M., Burnett, W. C., Cable, J. E. and Turner, J. V. 2002. Investigation of submarine groundwater discharge. *Hydrological Process,* Vol. 16, No. 11, pp. 2115–2129. doi.org/10.1002/hyp.1145.

Taniguchi, M., Uemura, T. y Jago-on, K. 2007. Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature. *Vadose Zone Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 591–596. doi.org/10.2136/vzj2006.0094.

Tarlock, A. D. y Robinson, J. 2019. *Ley de derechos y recursos hídricos*. Eagan, Minnesota, Clark Boardman Callaghan.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. y Meehl, G. A. 2012a. Una visión general de la CMIP5 y el diseño del experimento. *Bulletin of the American Meteorological Society,* Vol. 93, No. 4, pp. 485-498. doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Taylor, A., Cocklin, C. y Brown, R. 2012b. Fomentar los campeones medioambientales: Un proceso para desarrollar su capacidad de impulsar el cambio. *Journal of Environmental Management*, Vol. 98, pp. 84-97. doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.001.

Taylor, R. G., Miret-Gaspa, M., Tumwine, J., Mileham, L., Flynn, R., Howard, G. y Kulabako, R. 2009. Aumento del riesgo de enfermedades diarreicas debido al cambio climático: Evidence from communities supplied by groundwater in Uganda. R. Taylor, C. Tindimugaya, M. Owor y M. Shamsudduha (eds.), *Groundwater and Climate in Africa.* IAHS Publication No. 334. Wallingford, Reino Unido, IAHS Press, pp. 15-19.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A. M., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., Gurdak, J. J., Allen, D. M.,

Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P. J.-F., Holman, I. y Treidel, H. 2013a. Aguas subterráneas y cambio climático. *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 322-329. doi.org/10.1038/nclimate1744.

Taylor, R. G., Todd, M. C., Kongola, L., Maurice, L., Nahozya, E., Sanga, H. y MacDonald, A. M. 2013b. Evidencia de la dependencia de los recursos hídricos subterráneos de las precipitaciones extremas en África Oriental. *Nature Climate Change*, Vol. 3, pp. 374-378. doi.org/10.1038/nclimate1731.

Tekle-Haimanot, R., Melaku, Z., Kloos, H., Reimann, C., Fantaye, W., Zerihun, L. y Bjorvatn, K. 2006. The geographic distribution of fluoride in surface and groundwater in Ethiopia with an emphasis on the Rift Valley. *Science of the Total Environment*, Vol. 367, No. 1, pp. 182–190. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.003.

The Nature Conservancy. 2019. *Protección del acuífero Edwards*. Sitio web de The Nature Conservancy. www.nature.org/en-us/about-us/where-we-work/united-states/texas/stories-in-texas/edwards-aquifer-protection/.

____. s.f. Programa Bird Returns. Página web de The Nature Conservancy. www.scienceforconservation.org/science-in-action/birdreturns.

Thorslund, J. y Van Vliet, M. T. H. 2020. A global dataset of surface water and groundwater salinity measurements from 1980–2019. *Scientific Data*, Vol. 7, Article 231. doi.org/10.1038/s41597-020-0562-z.

Tincani, L., Ross, I., Uz Zaman, R., Burr, P., Mujica-Pereira, A. V., Ensink, J. y Evans, B. 2015. *Evaluación regional de la sostenibilidad operativa de los servicios de agua y saneamiento en el África Subsahariana.* Mejora de la rentabilidad y la sostenibilidad de los programas WASH (VFM-WASH). Oxford Policy Management. www.researchgate.net/publication/303621168_Regional_assessment_of_the_operational_sustainability_of_water_and_sanitation_services_in_Sub-Saharan_Africa.

Tione, M. L., Bedano, J. C. y Blarasin, M. 2016. Relaciones entre las comunidades de invertebrados y las propiedades del agua subterránea en un acuífero no confinado de la Argentina. *International Journal of Environmental Studies,* Vol. 73, No. 5, pp. 760-777. doi.org/10.1080/00207233.2016.1160650.

Torjman, S. 2005. ¿Qué es la política? Ottawa, Instituto Caledon de Política Social.

Tóth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 16, pp. 4795–4812. doi.org/10.1029/JZ068i016p04795.

Trupp, M., Ryan, S., Barranco, I., Leon, D. y Scoby-Smith, L. 2021. Developing the world's largest CO_2 Injection System - a history of the Gorgon Carbon Dioxide Injection System (16 de marzo de 2021). *Actas de la 15ª Conferencia sobre tecnologías de control de gases de efecto invernadero, 15-18 de marzo de 2021.* doi.org/10.2139/ssrn.3815492.

Tuinhof, A., Foster, S., Van Steenbergen, F., Talbi, A. y Wishart, M. 2011. *Appropriate Groundwater Management Policy for Sub-Saharan Africa: In Face of Demographic Pressure and Climatic Variability.* Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/27363.

UBA (Umweltbundesamt, Ministerio de Medio Ambiente de Austria). Sin publicar. 2021. Comunicación personal de Andreas Scheidleder (UBA, experto en aguas subterráneas) al autor, basada en la experiencia de la EUWI+ (European Union Water Initiative Plus).

UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones). 2010. *Las TIC como facilitadoras de la gestión inteligente del agua.* Informe de Vigilancia Tecnológica del UIT-T. Ginebra, UIT. www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000100003PDFE.pdf.

UNDESA (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas). 2020. *Dinámica de la población: World Population Prospects 2019.* population.un.org/wpp/.

____. s.d. *Los 17 objetivos*. UNDESA Sustainable Development. sdgs.un.org/goals.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2001. *Gestión de Recursos de Acuíferos Transnacionales: Su importancia y su gestión sostenible. Documento marco.* UNESCO-PHI-VI, Serie sobre aguas subterráneas nº 1, 2001. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000124386?posInSet=1&queryId=0b2f0491-ddd6-4668-85dd-e43b1d249129.

____. 2007. *Sistemas acuíferos transfronterizos en las Américas: Evaluación preliminar* [Transboundary Aquifer Systems in the Americas: Preliminary Assessment]. Serie ISARM Américas, No. 1. Montevideo/Washington, DC, UNESCO/OEA. www.oas.org/dsd/waterresources/projects/ISARM/Publications/ISARMAmericasLibro1(spa).pdf. (En español).

____. 2016. *Trifinio – Estudio de las aguas subterráneas* [Trifinio – Groundwater Assessment]. Informe técnico. Proyecto GGRETA – Fase 1 2013-2015. UNESCO. ihp-wins.unesco.org/documents/309/metadata_detail. (En español).

____. s.d. *Delta del Okavango*. Sitio web de la Convención del Patrimonio Mundial de la UNESCO. whc.unesco.org/en/list/1432/.

UNESCO/OEA (United Nations Educational, Cultural and Scientific Organization/Organization of American States). 2010. *Aspectos socioeconómicos, ambientales y climáticos de los sistemas acuíferos transfronterizos de las Américas* [Socio-economic, environmental and climatic aspects of the transboundary aquifer systems of the Americas]. Serie ISARM Américas, No. 3. Montevideo/Washington, DC, UNESCO/OAS. isarm-americas.org/wp-content/uploads/2019/06/Libro-3.pdf. (En español).

UNESCO-PHI (Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO). 2000. *Decimocuarta reunión del Consejo Intergubernamental,* París, 5-10 de junio de 2000. Informe final. París, UNESCO.

____. 2009. *Atlas de Acuíferos Transfronterizos: Mapas mundiales, cooperación regional e inventarios locales.* París, UNESCO. isarm.org/sites/default/files/resources/files/2%20Atlas%20of%20TBA.pdf.

UNESCO-PHI/PNUMA (Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2016. *Acuíferos transfronterizos y sistemas de aguas subterráneas de los pequeños Estados insulares en desarrollo: Estado y tendencias. Resumen para responsables de políticas. Nairobi,* Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). www.un-igrac.org/resource/twap-summary-policy-makers-transboundary-aquifers-and-groundwater-systems-small-island.

UNHRC (Consejo de Derechos Humanos de las Naciones Unidas). 2010. *Los derechos humanos y el acceso al agua potable y al saneamiento.* Resolución adoptada por el Consejo de Derechos Humanos. A/HRC/RES/15/9. ap.ohchr.org/documents/dpage_e.aspx?si=A/HRC/RES/15/9.

____. 2021. El derecho humano a un medio ambiente seguro, limpio, saludable y sostenible. Resolución adoptada por el Consejo de Derechos Humanos. A/HRC/48/L.23. ap.ohchr.org/documents/dpage_e.aspx?si=A/HRC/48/L.23/Rev.1.

UNICEF/OMS (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia/Organización Mundial de la Salud). 2019. *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene 2000-2017.* Nueva York, UNICEF/OMS. www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019.

Ursitti, A., Giannoccaro, G., Prosperi, M., De Meo, E. y De Gennaro, B. C. 2018. La magnitud y el coste de la medición y el control de las aguas subterráneas en la agricultura. *Water*, Vol. 10, No. 3, Article 344. doi.org/10.3390/w10030344.

US EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). 1996. *Manual: Best Management Practices for Pollution Prevention in the Textile Industry.* Cincinnati, Ohio, US EPA. www.epa.gov/eg/best-management-practices-pollution-prevention-textile-industry-manual.

USGS (United States Geological Survey). s.f. *Groundwater Use in the United States.* www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/groundwater-use-united-states?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.

Van der Gun, J. 2018. Datos, información, conocimientos y diagnósticos sobre las aguas subterráneas. K. G. Villholth, E. Lopez-Gunn, K. Conti, A. Garrido y J. van der Gun (eds.), *Advances in Groundwater Governance*. Leiden, Países Bajos, CRC Press/Balkema, pp. 193-213.

____. 2019. La revolución global de las aguas subterráneas. *Enciclopedia de investigación de Oxford, ciencias ambientales.* Oxford University Press. doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.632.

____. 2020. *Gestión Conjunta del Agua. Una poderosa contribución a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.* París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375026.locale=en.

Van der Gun, J., Merla, A., Jones, M. y Burke, J. 2012. Gobernanza del espacio subterráneo y las fronteras de las aguas subterráneas. FAO/Gobernanza de las aguas subterráneas. *Thematic Papers on Groundwater*, pp. 507-573. www.fao.org/3/i6040e/i6040e.pdf.

Van Koppen, B. 1998. *More Jobs per Drop: Targeting Irrigation to Poor Women and Men.* Wageningen/Amsterdam, Países Bajos, Wageningen Agricultural University/Royal Tropical Institute.

Van Koppen, B., Parthasarathy, R. y Safiliou, C. 2002. *Poverty Dimensions of Irrigation Management Transfer in Largescale Canal Irrigation in Andhra Pradesh and Gujarat, India*. IWMI Research Report No. 61. Colombo, International Water Management Institute (IWMI).

Van Weert, F., Van der Gun, J. y Reckman, J. 2009. *Global Overview of Saline Groundwater Occurrence and Genesis*. Utrecht, Países Bajos, Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC). www.un-igrac.org/resource/global-overview-saline-groundwater-occurrence-and-genesis-report.

Velis, M., Conti, K. I. y Biermann, F. 2017. Aguas subterráneas y desarrollo humano: Sinergias y compensaciones en el contexto de los objetivos de desarrollo sostenible. *Sustainability Science*, Vol. 12, pp. 1007-1017. doi.org/10.1007/s11625-017-0490-9.

Venkanta, M. K. 2021. ¿Escasez para quién? Tracing the history of groundwater use and inequality in Gujarat, India. Water Science Policy, 27 de marzo de 2021. watersciencepolicy.com/article/scarcity-for-whom-tracing-the-history-of-groundwater-use-and-inequality-in-gujarat-india-931dd9c94fac?language=English.

Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. O. y Demollin, E. 2014. Proyecto Minewater 2.0 en Heerlen, Países Bajos: Transformación de un proyecto piloto de aguas mineras geotérmicas en una infraestructura energética sostenible híbrida a gran escala para calefacción y refrigeración. *Energy Procedia*, Vol. 46, pp. 58-67. doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158.

Verma, S. and Shah, M. 2019. *Drought-Proofing through Groundwater Recharge: Lessons from Chief Ministers' Initiatives in Four Indian States*. Washington, DC, Banco Mundial. openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33240.

Vij, S., Warner, J. y Barua, A. 2020. El poder en la diplomacia del agua. *Water International*, Vol. 45, No. 4, pp. 249-253. doi.org/10.1080/02508060.2020.1778833.

Villar, P. C. y Costa Ribeiro, W. 2011. El acuerdo sobre el Acuífero Guaraní: ¿Un nuevo paradigma para la gestión de las aguas subterráneas transfronterizas? *Water International*, Vol. 36, No. 5, pp. 646-660. doi.org/10.1080/02508060.2011.603671.

Villholth, K. G. 2013a. Irrigación con aguas subterráneas para pequeños agricultores en el África Subsahariana: una síntesis de los conocimientos actuales para orientar los resultados sostenibles. *Water International*, Vol. 38, No. 4, pp. 369-391. doi.org/10.1080/02508060.2013.821644.

____. 2013b. Integrated groundwater use and management in vulnerable coastal zones of Asia-Pacific. C. Wetzelhuetter (ed.), *Groundwater in the Coastal Zones of Asia-Pacific*. Dordrecht, Países Bajos, Springer, pp. 317–342.

Villholth, K. G. y Ross, A. s.f. *Overview on Groundwater-Based Natural Infrastructure*. Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP). gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/overview-on-groundwater-based-natural-infrastructure/. (Consultado el 8 de junio de 2021).

Villholth, K. G., Tøttrup, C., Stendel, M., Maherry, A. y Claassen, M. 2011. SADC *Regional Groundwater Drought Vulnerability Mapping*. Informe final. Southern African Development Community (SADC). www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/SADC Regional Groundwater Drought Risk Mapping.pdf.

Vishwakarma, B. D., Bates, P., Sneeuw, N., Westaway, R. M. y Bamber, J. L. 2021. Re-assessing global water storage trends from GRACE time series. *Environmental Research Letters*, Vol. 16, No. 3, Artículo 034005. doi.org/10.1088/1748-9326/abd4a9.

Vrba, J. y Verhagen, B. (eds.). 2011. *Aguas subterráneas para situaciones de emergencia: A Methodological Guide*. UNESCO-PHI-VII, Serie sobre aguas subterráneas nº 3. París, UNESCO.

Wada, Y. 2016. Modelización del agotamiento de las aguas subterráneas a escala regional y global: Estado actual y perspectivas futuras. *Surveys in Geophysics*, Vol. 37, pp. 419-451. doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x.

Wada, Y., Lo, M-H., Yeh, P. J-F., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Wu, R-J. y Tseng, Y-H. 2016. Destino del agua bombeada del subsuelo y contribuciones al aumento del nivel del mar. *Nature Climate Change,* Vol. 6, pp. 777-780. doi.org/10.1038/NCLIMATE3001.

Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S. y Bierkens, M. F. P. 2010. Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, No. 20, L20402. doi.org/10.1029/2010GL044571.

Wahome, C. N. 2013. *Contamination Levels of Groundwater, Antimicrobial Resistance Patterns, Plasmid Profiles and Chlorination Efficacy in Ongata Rongai, Kajiado North County, Kenya*. Tesis de maestría. Nairobi, Kenyatta University. ir-library.ku.ac.ke/handle/123456789/8960.

Walker, D., Parkin, G., Schmitter, P., Gowing, J., Tilahun, S. A., Haile, A. T. y Yimam, A. Y. 2019. Insights from a multi-method recharge estimation comparison study (Perspectivas de un estudio de comparación de la estimación de la recarga con múltiples métodos). *Groundwater*, Vol. 57, No. 2, pp. 245-258. doi.org/10.1111/gwat.12801.

Walvoord, M. A. y Kurylyk, B. L. 2016. Impactos hidrológicos del deshielo del permafrost - Una revisión. *Vadose Zone Journal,* Vol. 15, No. 6, pp. 1-20. doi.org/10.2136/vzj2016.01.0010.

Wang, J., Rothausen, S. G. S. A., Conway, D., Zhang, L., Xiong, W., Holman, I. P. y Li, Y. 2012. China's water–energy nexus: Greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture. *Environmental Research Letters*, Vol. 7, No. 1, Artículo 014035. doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014035.

Watts, R., Walton, D. y Knox, D. 2021. *Blueprint: Financing a Future of Safe Water, Sanitation and Hygiene for All*. washmatters.wateraid.org/publications/blueprint-financing-a-future-of-safe-water-sanitation-and-hygiene-for-all.

Welsien, K. 2016. *Documento de información del proyecto (etapa de concepto) - Aceleración del bombeo solar de agua mediante financiación innovadora - P161757*. Washington, DC, Banco Mundial. documents.worldbank.org/curated/en/797711478099764040/Project-Information-Document-Concept-Stage-Accelerating-Solar-Water-Pumping-via-Innovative-Financing-P161757.

Wentworth, A., Pavelic, P., Kongmany, S., Sotoukee, T., Sengphaxaiyalath, K., Phomkeona, K., Deevanhxay, P., Chounlamany, V. y Manivong, V. 2021. *Environmental Risks from Pesticide Use: The Case of Commercial Banana Farming in Northern Lao PDR*. IWMI Research Report No. 177. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). doi.org/10.5337/2021.207.

Werner, A. D., Sharp, H. K., Galvis, S. C., Post, V. E. A. y Sinclair P. 2017. Hidrogeología y gestión de lentes de agua dulce en islas de atolones: Revisión de los conocimientos actuales y las necesidades de investigación. *Journal of Hydrology,* Vol. 551, pp. 819-844. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.047.

White, E. K., Peterson, T. J., Costelloe, J., Western, A. W. y Carrara, E. 2016. ¿Podemos gestionar las aguas subterráneas? Un método para determinar la comprobabilidad cuantitativa de los planes de gestión de las aguas subterráneas. *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 6, pp. 4863-4882. doi.org/10.1002/2015WR018474.

____. 2019. *Documento de debate: Clima, saneamiento y salud. Borrador de julio de 2019.* OMS. www.who.int/water_sanitation_health/sanitation-waste/sanitation/sanitation-and-climate-change20190813.pdf. OMS/UNICEF (Organización Mundial de la Salud/Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia). 2017. *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene: actualización de 2017 y líneas de base de los ODS.* Ginebra, OMS/UNICEF. data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2017-update-sdg-baselines/#.

____. 2021. *Progresos en materia de agua potable, saneamiento e higiene en los hogares, 2000-2020:* Five Years into the SDGs. Ginebra, OMS/UNICEF. data.unicef.org/resources/progress-on-household-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2000-2020/.

WHYMAP. 2008. *Recursos de agua subterránea del mundo: Grandes sistemas acuíferos*. Base de datos WHYMAP. Hannover, Alemania/París, BGR/UNESCO. ihp-wins.unesco.org/layers/geonode:world_aquifer_systems. (Consultado el 5 de agosto de 2020)

Wiese, B. U. y Nimtz, M. 2019. Balance energético de la instalación de inyección de dióxido de carbono en Ketzin, Alemania. *Applied Energy*, Vol. 239, pp. 626-634. doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.223.

WRI (Instituto de Recursos Mundiales). 2019. Sitio web del Acueducto del WRI. www.wri.org/aqueduct.

Wu, G. C., Deshmukh, R., Ndhlukula, K., Radojicic, T., Reilly-Moman, J., Phadke, A., Kammen, D. M. y Callaway, D. S. 2017. El emplazamiento estratégico y las interconexiones regionales de la red son la clave para un futuro con bajas emisiones de carbono en los países africanos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* Vol. 114, No. 15, pp. E3004-E3012. doi.org/10.1073/pnas.1611845114.

Wurtsbaugh, W. A., Miller, C., Null, S. E., DeRose, R. J., Wilcock, P., Hahnenberger, M., Howe, F. y Moore, J. 2017. Declive de los lagos salinos del mundo. *Nature Geoscience*, Vol. 10, pp. 816-821. doi.org/10.1038/NGEO3052.

WWAP (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2015: Agua para un mund sostenible.* París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000231823_eng.

____. 2019. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No deja a nadie atrás*. París, UNESCO. en.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2019.

WWAP (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. 2018. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424.

WWC (Consejo Mundial del Agua). 2018. *Diez acciones para la financiación de las infraestructuras del agua.* Informe del Consejo Mundial del Agua. Marsella, Francia, WWC. www.worldwatercouncil.org/en/publications/ten-actions-financing-water-infrastructure.

WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza). 2019. *Riesgos y oportunidades del agua dulce: Una visión general y una llamada a la acción para el sector financiero.* Berlín, WWF Alemania. wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/wwf_waterrisk_financialvalue_part4_keypiece_web.pdf.

WWQA (Alianza Mundial para la Calidad del Agua). 2021. *Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas: A Global Perspective: Importancia, métodos y posibles fuentes de datos*. Un informe de los Amigos de las Aguas Subterráneas en la WWQA, Nairobi.

X

Xiao, K-Q., Li, B., Ma, L., Bao, P., Zhou, X., Zhang, T. y Zhu, Y-G. 2016. Perfiles metagenómicos de genes de resistencia a los antibióticos en suelos de arrozales del sur de China. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 92, No. 3, fiw023. doi.org/10.1093/femsec/fiw023.

Xie, H., Ringler, C. y Hossain Mondal, A. 2021. Energía solar o diésel: Una comparación de los costes de la irrigación alimentada por aguas subterráneas en el África Subsahariana con dos soluciones energéticas. *Earth's Future,* Vol. 9, No. 4. doi.org/10.1029/2020EF001611.

Xinhua. 2020. China lanza la planificación de la protección del medio ambiente del suelo para los próximos cinco años. China Daily, 25 de mayo de 2020. www.chinadaily.com.cn/a/202005/25/WS5ecb5365a310a8b241158349.html.

Xu, T., Yan, D., Weng, B., Bi, W., Do, P., Liu, F., Wang, Y. y Ma, J. 2018. La evaluación del efecto del tratamiento integral para la sobreexplotación de las aguas subterráneas en el condado de Quzhou, China. *Water,* Vol. 10, No. 7, Article 874. doi.org/10.3390/w10070874.

Y

Yannopoulos, S. I., Lyberatos, G., Theodossiou, N., Li, W., Valipour, M., Tamburrino, A. y Angelakis, A. N. 2015. Evolución de los dispositivos de elevación de agua (bombas) a lo largo de los siglos en todo el mundo. *Water,* Vol. 7, No. 9, pp. 5031-5060. doi.org/10.3390/w7095031.

Yechieli, Y. y Wood, W. W. 2002. Procesos hidrogeológicos en sistemas salinos: Playas, sabkhas y lagos salinos. *Earth-Science Reviews*, Vol. 58, No. 3-4, pp. 343-365. doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00067-3.

Z

Zeeberg, J. 2009. *Control de inundaciones en los Países Bajos: A Strategy for Dike Reinforcement and Climate Adaptation.* Leiden, Países Bajos, Rijnland Water Control Board. doi.org/10.13140/RG.2.1.5127.9445.

Zhang, T., Barry, R. G., Knowles, K., Ling, F. y Armstrong, R. L. 2003. Distribución del suelo congelado estacional y perennemente en el hemisferio norte. L. U. Arenson, M. Phillips, S. M. Springman (eds.), *Permafrost: Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, Zurich, Switzerland.* Rotterdam, Países Bajos, A.A. Balkema, pp. 1289-1294.

Zhao, Y., Wang, L., Li, H., Zhu, Y., Wang, Q., Jiang, S., Zhai, J. y Hu, P. 2020. Evaluation of groundwater overdraft governance measures in Hengshui City, China. *Sustainability*, Vol. 12, No. 9, Article 3564. doi.org/10.3390/su12093564.

Zhou, Y., Sawyer, A. H., David, C. H. y Famiglietti, J. S. 2019. Descarga de agua subterránea fresca submarina a la costa cercana al mundo. *Geophysical Research Letters,* Vol. 46, No. 11, pp. 5855-5863. doi.org/10.1029/2019GL082749.

Abreviaturas y siglas

AIE	Agencia Internacional de la Energía
ANA	Autoridad Nacional del Agua (en el Perú)
AOD	Ayuda Oficial al Desarrollo
APP	Asociación público-privada
ATES	Almacenamiento de energía térmica en acuíferos
ASR	Almacenamiento y recuperación de acuíferos
CDI	Comisión de Derecho Internacional
CDP	antes Carbon Disclosure Project
CEPE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados
COWSO	Organizaciones Comunitarias de Agua y Abastecimiento
DBP	Subproductos de la desinfección
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
DMA	Directiva Marco del Agua
EAU	Emiratos Árabes Unidos
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
ET	Evapotranspiración
EUWI+	Iniciativa del Agua de la Unión Europea Plus
FNAM	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
GAA	Acuerdo del Acuífero Guaraní
GDE	Ecosistema dependiente de las aguas subterráneas
GGIS	Sistema Mundial de Información sobre las Aguas Subterráneas
GGRETA	Gobernanza de las aguas subterráneas en los acuíferos transfronterizos
GHSP	Bombas de calor de origen terrestre
GIRH	Gestión integrada de los recursos hídricos
GPCP	Proyecto de Climatología Global de Precipitaciones
GRACE	Experimento climático y de recuperación de la gravedad
GTR	Grupo de Trabajo Regional
GWB	Masa de agua subterránea
GWS	Almacenamiento de aguas subterráneas
HDPE	Polietileno de alta densidad
IGRAC	Centro Internacional de Evaluación de los Recursos de Aguas Subterráneas
ISARM	Iniciativa sobre la Gestión de Recursos de Acuíferos Transnacionales
LULC	Uso y cobertura del suelo
MAR	Recarga gestionada de acuíferos
MOEF	Ministerio de Medio Ambiente y Bosques (Indonesia)
NDC	Contribuciones Nacionales Determinadas
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Naciones Unidas
ONUDI	Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial
PCM	Programa Conjunto de Monitoreo
PEI	Parques Eco-industriales
PEID	Pequeños Estados insulares en desarrollo
PHI	Programa Hidrológico Intergubernamental
PSA	Pago por Servicios Ecosistémicos
RECP	Producción más limpia y eficiente de los recursos
SAAB	Sistema Acuífero Amazónico en el Brasil
SADC	Comunidad para el Desarrollo del África Meridional
SLR	Aumento del nivel del mar
SMAB	Cuenca del Acuífero Senegalo-Mauritano
SPIS	Sistemas de Irrigación con Energía Solar
TBA	Acuífero transfronterizo
TSF	Instalación de almacenamiento de relaves
TWS	Almacenamiento total de agua
UE	Unión Europea
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
WASH	Agua, Saneamiento e Higiene
WHYMAP	Programa Mundial de Cartografía y Evaluación Hidrogeológica
WWDR	Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos
ZLD	Vertido cero de líquidos

INFORME MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÌDRICOS



ISBN 978-92-3-300164-0
© UNESCO 2021
208 páginas
Precio: 55,00 euros

WWDR 2021 A color, con cuadros, figuras, mapas, tablas, notas, fotografías, referencias y lista de abreviaturas y acrónimos, incluyendo los prólogos de la Directora General de la UNESCO, Audrey Azoulay, y el Presidente de ONU-Agua y Presidente del FIDA, Gilbert F. Houngbo.



ISBN 978-92-3-300193-0
© UNESCO 2022
268 páginas
Precio: 55,00 euros

WWDR 2022 A color, con cuadros, figuras, mapas, tablas, notas, fotografías, referencias y lista de abreviaturas y acrónimos, incluyendo los prólogos de la Directora General de la UNESCO, Audrey Azoulay, y el Presidente de ONU-Agua y Presidente del FIDA, Gilbert F. Houngbo.

Para descargar el formato PDF del informe y las publicaciones asociadas, las ediciones anteriores del WWDR y el material para los medios de comunicación, visite: en.unesco.org/wwap

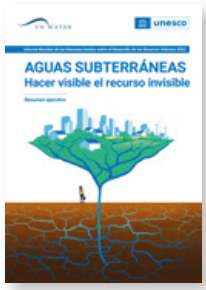
PUBLICACIONES ASOCIADAS



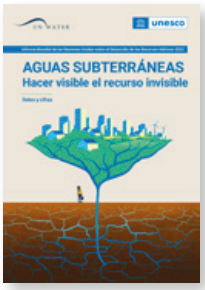
Resumen Ejecutivo del WWDR 2021
12 páginas
Disponible en alemán, árabe, chino, coreano, español, francés, inglés, hindi, italiano, portugués y ruso



Datos y cifras del WWDR 2021
12 páginas
Disponible en español, francés, inglés, italiano y portugués



Resumen Ejecutivo de WWDR 2022
12 páginas
Disponible en alemán, árabe, chino, coreano, español, francés, inglés, hindi, italiano, portugués y ruso



Datos y cifras del WWDR 2022
12 páginas
Disponible en español, francés, inglés, italiano y portugués

Para descargar estos documentos, visite: en.unesco.org/wwap

unesco
Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos

INFORMES DE LA ONU SOBRE EL AGUA

ONU-Agua coordina los esfuerzos de las entidades de las Naciones Unidas y de las organizaciones internacionales que trabajan en temas de agua y saneamiento. Con ello, ONU-Agua pretende aumentar la eficacia del apoyo prestado a los Estados Miembros en sus esfuerzos por alcanzar los acuerdos internacionales sobre agua y saneamiento. Las publicaciones de ONU-Agua se basan en la experiencia y los conocimientos de sus miembros y asociados.

Actualización de los progresos del ODS 6 en 2021 - resumen

Este informe resumido proporciona una actualización ejecutiva sobre el progreso hacia todas las metas del ODS 6 e identifica las áreas prioritarias para la aceleración. El informe, elaborado por la Iniciativa de Seguimiento Integrado de ONU-Agua para el ODS 6, presenta nuevos datos nacionales, regionales y mundiales sobre todos los indicadores globales del ODS 6.

Actualización de los progresos del ODS 6 en 2021 - 8 informes, por indicador global del ODS 6

Esta serie de informes proporciona una actualización y un análisis en profundidad de los avances hacia las diferentes metas del ODS 6 e identifica áreas prioritarias para la aceleración: Progreso en agua potable, saneamiento e higiene (OMS y UNICEF); Progreso en el tratamiento de aguas residuales (OMS y ONU-Hábitat); Progreso en la calidad del agua ambiental (PNUMA); Progreso en la eficiencia del uso del agua (FAO); Progreso en el nivel de estrés hídrico (FAO); Progreso en la gestión integrada de los recursos hídricos (PNUMA); Progreso en la cooperación hídrica transfronteriza (CEPE y UNESCO); Progreso en los ecosistemas relacionados con el agua (PNUMA). Los informes, elaborados por los organismos custodios responsables, presentan nuevos datos nacionales, regionales y mundiales sobre los indicadores globales del ODS 6.

Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* es el principal informe de ONU-Agua sobre cuestiones de agua y saneamiento, que se centra en un tema diferente cada año. El informe es publicado por la UNESCO, en nombre de ONU-Agua, y su producción es coordinada por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. El informe ofrece una visión de las principales tendencias relativas a la situación, el uso y la gestión del agua dulce y el saneamiento, basada en el trabajo realizado por los miembros y socios de ONU-Agua. Lanzado junto con el Día Mundial del Agua, el informe proporciona a los responsables de la toma de decisiones conocimientos y herramientas para formular y aplicar políticas sostenibles en materia de agua. También ofrece las mejores prácticas y análisis en profundidad para estimular ideas y acciones para una mejor gestión en el sector del agua y más allá.

Análisis y Evaluación Global del Saneamiento y el Agua Potable (GLAAS) de ONU-Agua

El GLAAS es producido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en nombre de ONU-Agua. Proporciona una actualización mundial de los marcos políticos, los acuerdos institucionales, la base de recursos humanos y los arroyos de financiación internacionales y nacionales en apoyo del agua y el saneamiento. Es una aportación sustantiva a las actividades de Saneamiento y Agua para Todos (SWA), así como a los informes de progreso sobre el ODS 6 (véase más arriba).

Los informes de progreso del Programa de Monitoreo Conjunto OMS/UNICEF para el Abastecimiento de Agua, Saneamiento e Higiene (PCM)

El PCM está afiliado a ONU-Agua y es responsable del seguimiento mundial de los avances hacia las metas del ODS 6 sobre el acceso universal al agua potable segura y asequible y a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos. Cada dos años, el PCM publica estimaciones e informes de progreso actualizados sobre el agua, el saneamiento y la higiene en los hogares, las escuelas y los centros de salud.

Informes políticos y analíticos

Los resúmenes de política de ONU-Agua proporcionan una orientación política breve e informativa sobre las cuestiones más apremiantes relacionadas con el agua dulce que se basan en la experiencia combinada del sistema de las Naciones Unidas. Los resúmenes analíticos ofrecen un análisis de las cuestiones emergentes y pueden servir de base para nuevas investigaciones, debates y futuras orientaciones políticas.

PUBLICACIONES PREVISTAS POR ONU-AGUA

- Informe de política de ONU-Agua sobre el género y el agua
- Actualización del informe de política de ONU-Agua sobre la cooperación en materia de aguas transfronterizas
- Informe analítico de ONU-Agua sobre la eficiencia del agua
- Estudios de casos de aceleración por países

EL DÍA MUNDIAL DEL AGUA Y EL INFORME MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Las Naciones Unidas designan días, semanas, años y decenios específicos como ocasiones para señalar acontecimientos o temas particulares con el fin de promover, mediante la concienciación y la acción, los objetivos de la Organización.



Las celebraciones internacionales son ocasiones para educar al público en general sobre temas de interés, para movilizar la voluntad política y los recursos para abordar los problemas mundiales, y para celebrar y reforzar los logros de la humanidad.

La mayoría de las celebraciones han sido establecidas por resoluciones de la Asamblea General de las Naciones Unidas. El Día Mundial del Agua (22 de marzo) se remonta a la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992, en la que se recomendó una celebración internacional del agua.

La Asamblea General de las Naciones Unidas respondió designando el 22 de marzo de 1993 como el primer Día Mundial del Agua. Desde entonces se celebra anualmente y es uno de los días internacionales más populares junto con el Día Internacional de la Mujer (8 de marzo), el Día Internacional de la Paz (21 de septiembre) y el Día de los Derechos Humanos (10 de diciembre).

Cada año, ONU-Agua —el mecanismo de coordinación de las Naciones Unidas en materia de agua y saneamiento— establece un tema para el Día Mundial del Agua que corresponde a un desafío actual o futuro relacionado con el agua. Este tema también define el tema del Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos que se presenta en el Día Mundial del Agua. La publicación es la informe insignia de ONU-Agua y proporciona a los responsables de la toma de decisiones herramientas para formular y aplicar políticas sostenibles en materia de agua. El informe también ofrece una visión de las principales tendencias, incluyendo el estado, el uso y la gestión del agua dulce y el saneamiento, sobre la base del trabajo de los miembros y socios de ONU-Agua.

El informe es publicado por la UNESCO, en nombre de ONU-Agua, y su elaboración está coordinada por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO.

Las aguas subterráneas, que representan la mayor parte del agua dulce en estado líquido de la Tierra, tienen el potencial de proporcionar a las sociedades enormes beneficios y oportunidades sociales, económicas y medioambientales. Las aguas subterráneas son fundamentales para la lucha contra la pobreza, la seguridad alimentaria e hídrica, la creación de empleos dignos, el desarrollo socioeconómico y la resistencia de las sociedades y las economías al cambio climático.

Sin embargo, este recurso natural es a menudo poco conocido y, por consiguiente, se subestima, se gestiona mal e incluso se sobreexplota. A pesar de su abundancia general, las aguas subterráneas siguen siendo vulnerables a la sobreexplotación y a la contaminación, que pueden tener efectos devastadores sobre el recurso y su disponibilidad. En el contexto de la creciente escasez de agua en muchas partes del mundo, el enorme potencial de las aguas subterráneas y la necesidad de gestionarlas de forma sostenible ya no pueden seguir siendo ignorados.

La edición 2022 del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*, titulada "Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible", describe los retos y las oportunidades asociados al desarrollo, a la gestión y a la gobernanza de las aguas subterráneas en todo el mundo. El informe aborda las cuestiones relacionadas con las aguas subterráneas desde la perspectiva de los tres principales sectores de uso del agua (agricultura, asentamientos humanos e industria), así como sus interacciones con los ecosistemas y su relación con el cambio climático. Además, destaca diferentes perspectivas regionales y presenta una serie de opciones de respuesta relativas a los datos y a la información, la política y la planificación, la gestión y la gobernanza, así como la financiación.

El *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* es el principal informe de ONU-Agua sobre cuestiones de agua y saneamiento, que se centra en un tema diferente cada año. El informe es publicado por la UNESCO, en nombre de ONU-Agua, y su producción es coordinada por el Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos. El informe ofrece una visión de las principales tendencias relativas a la situación, al uso y a la gestión del agua dulce y del saneamiento, basada en el trabajo realizado por los miembros y socios de ONU-Agua. Lanzado en concomitancia con el Día Mundial del Agua, el informe proporciona a las personas responsables de la toma de decisiones conocimientos y herramientas para formular y aplicar políticas sostenibles en materia de agua. También ofrece las mejores prácticas y análisis en profundidad para estimular ideas y acciones para una mejor gestión del sector del agua y de otros sectores relacionados.

Esta publicación es financiada por el Gobierno de Italia y la Regione Umbria.

Regione Umbria

La versión en español del *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* (WWDR) 2022 ha sido posible gracias a la ayuda de la ANEAS.

