

AGUAS SUBTERRÁNEAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE



Políticas y experiencias para la gestión y conservación de los acuíferos

AUTOR

Ben Solís Sosa



Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Aguas subterráneas en América Latina y el Caribe: políticas y experiencias para la gestión y conservación de los acuíferos / Ben Solis Sosa.

p. cm. — (Monografía del BID ; 1077)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Groundwater-Latin America. 2. Groundwater-Caribbean Area. 3. Aquifers-Latin America. 4. Aquifers-Caribbean Area. 5. Water supply-Latin America. 6. Water supply-Caribbean Area. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. II. Título. III. Serie.

IDB-MG-1077

Códigos JEL: H41, L95, Q01, Q15, Q21, Q25

Palabras clave: aguas subterráneas, acuífero, agotamiento, sobreexplotación, agua potable, gestión de recursos hídricos, cambio climático, adaptación, estrés hídrico, tarifas, gestión de la demanda, tragedia de los comunes, bienes públicos, seguridad hídrica, soluciones basadas en la naturaleza, infraestructura natural, Objetivos de Desarrollo Sostenible.

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Agradecimientos

El autor agradece a los colegas del BID que colaboraron con valiosos comentarios, observaciones e insumos para la elaboración de este informe: Tomás Serebrisky y Clara Pasman (INE/INE) y María Pérez-Urdiales y Giovanna Napolini (WSA/INE). Los errores u omisiones corren por exclusiva cuenta del autor.

Las opiniones expresadas en esta publicación pertenecen al autor y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo, ni de los países que representa.

Abreviaturas

ALC	América Latina y el Caribe
ANA	Autoridad Nacional del Agua (Perú)
CAN	Países del Grupo Andino
CCB	Países del Grupo Caribe
CID	Países de Centroamérica, Haití, México, Panamá y República Dominicana
CRC	Colón costarricense
CSC	Países del Cono Sur
EE. UU.	Estados Unidos de América
EPS	Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento (en Perú)
FCAS	Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
IVU	Infraestructura Verde Urbana
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés)
MAR	Gestión de Recarga Artificial de Acuíferos (por sus siglas en inglés)
MINAE	Ministerio del Ambiente y Energía (de Costa Rica)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OFWAT	Water Services Regulation Authority (Inglaterra y Gales)
PEN	Sol peruano
SAG	Sistema Acuífero Guaraní
SMGUAS	Servicio de Monitoreo y Gestión de Uso de Aguas Subterráneas
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SAYTT	Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño
SUNASS	Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Perú)
USD	Dólar estadounidense

Gráficos

-
- Gráfico 1** Extracciones de aguas subterráneas como porcentaje de la captación total de agua en empresas de ALC (diagrama de caja y bigotes)
- Gráfico 2** Extracciones de aguas subterráneas por periodos del año hidrológico en Lima Metropolitana
- Gráfico 3** Porcentaje de usuarios y de volumen extraído de aguas subterráneas por categorías (Lima)

Tablas

- Gráfico 4** Evolución de los ingresos operativos anuales de Sedapal
- Gráfico 5** Frecuencia de eventos de turbiedad extrema en Santiago de Chile
- Gráfico 6** Inversiones del Plan de Resiliencia e incremento de horas de autonomía en Santiago de Chile
-

- Tabla 1** Evolución del nivel estático promedio de los pozos de Lima Metropolitana (en metros)
- Tabla 2** Servicios ecosistémicos que proveen los acuíferos
- Tabla 3** Consecuencias de la extracción excesiva de aguas subterráneas
- Tabla 4** Clasificación de técnicas de gestión de recarga artificial de acuíferos (MAR)
- Tabla 5** Tarifa del servicio de monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas (Sedapal)
- Tabla 6** Impacto de la aprobación de las nuevas tarifas por SMGUAS en usuarios comerciales e industriales
- Tabla 7** Canon por aprovechamiento de agua para uso doméstico (previo a la reforma)
- Tabla 8** Canon por aprovechamiento de agua (posterior a la reforma)
- Tabla 9** Asignación del canon a instituciones en Costa Rica
-

Ilustraciones

- Ilustración 1** Formación de acuíferos confinados y no confinados
- Ilustración 2** Superficie freática de un pozo
- Ilustración 3** Nivel estático promedio por distrito en 2020 (en metros)
- Ilustración 4** Variación anual promedio del nivel estático entre 2011 y 2020 (en metros)
- Ilustración 5** Variación porcentual del nivel estático entre 2011 y 2020 (%)
- Ilustración 6** Continuum de almacenamiento de agua
- Ilustración 7** Avance de la intrusión salina en el acuífero entre 1944 y 2011 (Bahía de Monterrey, California, Estados Unidos)
- Ilustración 8** Efectos del cambio climático y su impacto en las aguas subterráneas
- Ilustración 9** Límites que determinan la extracción sostenible
- Ilustración 10** Mapa de hundimientos y agrietamientos en la Ciudad de México
- Ilustración 11** Ubicación de los usos del agua en el mapa de bienes públicos y privados

- Ilustración 12** Distribución geográfica de recursos de aguas subterráneas en ALC
- Ilustración 13** Extracciones de aguas subterráneas como porcentaje de la captación total de agua en empresas urbanas de ALC
- Ilustración 14** Recursos hídricos subterráneos transfronterizos
- Ilustración 15** Círculos vicioso y virtuoso en la gestión de los recursos hídricos subterráneos
- Ilustración 16** Escalera con niveles de información relacionada al uso de aguas subterráneas
- Ilustración 17** Efectos en el bienestar de políticas de gestión de la demanda
- Ilustración 18** Costo económico del uso de agua subterránea
- Ilustración 19** Máquina de tarjeta inteligente instalada en una estación de bombeo en China
- Ilustración 20** Proyecto de recarga artificial en el río Rímac (Lima, Perú)
- Ilustración 21** Distribución de tipos de MAR y escasez de agua en la región
- Ilustración 22** Esquema de funcionamiento de la domesticación subterránea de inundaciones para el riego
- Ilustración 23** Parque botánico del Río Medellín
- Ilustración 24** Áreas drenables y permeables en una propiedad
- Ilustración 25** Planta desaladora de agua de mar en Atacama, Chile
- Ilustración 26** Principios y criterios técnico-económicos aplicables al cálculo de la tarifa
- Ilustración 27** Zonas con declaración de prohibición en Chile (2018 y 2021)
-

Recuadros

- Recuadro 1** La evolución de las aguas subterráneas en Lima Metropolitana (Perú) durante los últimos 10 años
- Recuadro 2** Las aguas subterráneas como proveedoras de servicios ecosistémicos
- Recuadro 3** La sobreexplotación de los acuíferos y el hundimiento del terreno en las ciudades
- Recuadro 4** La experiencia de China con racionamientos por precio, cuotas y la innovación mediante tarjetas inteligentes
- Recuadro 5** Los cargos por drenaje pluvial pueden contribuir a la infiltración
- Recuadro 6** El rol de las aguas subterráneas en el acceso al agua en escuelas rurales de Uruguay

Contenido

1.

INTRODUCCIÓN 9

AGUAS SUBTERRÁNEAS: TEORÍA Y CONCEPTOS 11

1.1. Conceptos básicos 12

1.1.1. Aguas subterráneas y acuíferos 12

1.1.2. Superficie freática: nivel estático y nivel dinámico 13

1.1.3. Ventajas de utilizar las aguas subterráneas 18

1.1.4. Amenazas a las aguas subterráneas 21

1.1.5. Sobreexplotación y consecuencias 23

1.2. Tipos de bienes y la tragedia de los comunes 27

1.3. Modelo de extracción óptima 29

1.3.1. Ecuación de recarga del acuífero 29

1.3.2. Beneficios y costos de extracción 30

1.3.3. Solución al problema 31

2.

IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ALC 33

3.

INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PARA LA GESTIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 40

3.1. Instrumentos para la gestión de la demanda 44

3.1.1. Instrumentos de racionamiento por precio 46

3.1.2. Instrumentos de racionamiento por cantidad 48

3.1.3. Instrumentos de desplazamiento de la demanda 50

3.2. Instrumentos para la gestión de la oferta 52

3.2.1. Inversiones de recarga del acuífero 52

3.2.2. Infraestructura Verde Urbana 57

3.2.3. Otras inversiones a cargo de los operadores de agua 61

4.

CASOS DE ESTUDIO EN ALC 62

- 4.1. Perú: Tarifa por monitoreo y gestión de aguas subterráneas 63**
 - 4.2. Costa Rica: Canon de aprovechamiento del agua 70**
 - 4.3. Chile: Declaratoria de zonas de restricción y prohibición 73**
 - 4.4. Chile: Plan de resiliencia del servicio de agua potable en Santiago 74**
-

5.

CONCLUSIONES 76

REFERENCIAS 81

6.

ANEXOS 85

- Anexo 1 La evolución del nivel estático de los pozos bajo ámbito de Sedapal (Lima, Perú). 86**
- Anexo 2 Extracciones de aguas subterráneas como porcentaje de la captación total de agua en empresas de ALC 89**
- Anexo 3 Representación gráfica de los principales métodos de MAR 91**

Introducción

En el primer trimestre del año 2017, Chile y Perú fueron azotados por el fenómeno *El Niño*, que generó lluvias intensas y deslizamientos de tierra. Como consecuencia, se incrementó el nivel de turbidez de los ríos (Stip et al., 2019), lo cual obligó a las empresas de agua de Lima y Santiago a cerrar temporalmente sus plantas de tratamiento. Si bien existieron cortes en el suministro, este pudo continuar gracias a que las empresas pusieron en operación sus pozos de reserva, como parte de sus planes de emergencia. Gracias a las aguas subterráneas, se pudo asegurar el abastecimiento de millones de personas en un contexto adverso.

El agua es esencial para el desarrollo socioeconómico, pues fomenta la salud y prosperidad en las sociedades y, a su vez, es un elemento central para la producción de alimentos, energía y la gran mayoría de procesos industriales (Delgado et al., 2021). Las aguas subterráneas —que representan el 99% del agua dulce en el planeta (Shiklomanov y Rodda, 2003)— contribuyen de manera importante a satisfacer la demanda del recurso para sus distintos usos. En América Latina y el Caribe (ALC), alrededor del 30% del agua dulce extraída proviene de fuentes subterráneas; sin embargo, existen actividades que la utilizan con mayor intensidad, como la industria que abastece el 50% de su demanda con aguas subterráneas (UNESCO, 2022).

Las aguas subterráneas son centrales para el abastecimiento poblacional, pues proveen una fuente de agua tanto de manera regular como en situaciones de emergencia, contribuyendo de esta forma al cumplimiento de la primera meta (acceso universal) establecida en el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS). Su explotación, sin embargo, debe tener en cuenta que la cuarta meta de este mismo objetivo establece que los países deben aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos, asegurando la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce.

¿Qué tan importantes son las aguas subterráneas para el abastecimiento poblacional en la región? En Ciudad de México, una ciudad con más de 9 millones de habitantes, el 58% del agua distribuida proviene de fuentes subterráneas. Adicionalmente, el 100% del agua distribuida a la población de algunas ciudades de Bolivia, Colombia, Costa Rica, Chile y Perú proviene de fuentes subterráneas, según se ha podido identificar en el presente estudio. En ámbitos rurales, las aguas subterráneas pueden llegar a ser las únicas soluciones tecnológicas viables, gracias a los bajos costos de inversión, operación y mantenimiento asociados, y a que la amplia distribución geográfica de los acuíferos permite su explotación en contextos de dispersión poblacional.

Las aguas subterráneas también tienen características únicas que las convierten en un activo natural estratégico en la adaptación ante el cambio climático. Por su naturaleza,

al permitir la infiltración del agua de las lluvias en los acuíferos, convierten eventos climatológicos inestables en una fuente de abastecimiento de agua relativamente estable. Esto permite dotar a los sistemas de agua de resiliencia, pues ante eventos extremos como sequías o lluvias intensas que generan incrementos en la turbidez de los ríos (y que imposibilitan la captación de agua superficial), la continuidad del suministro de agua puede garantizarse recurriendo a la extracción de agua subterránea. Este aprovechamiento no es reciente, pues existe infraestructura construida hace más de 1400 años por culturas pre incaicas que permitían a los antiguos habitantes de los Andes peruanos lidiar con la variabilidad climática (Ochoa-Tocachi et al., 2019).

Debido a su importancia, debemos proteger el recurso hídrico subterráneo ante las amenazas a su calidad y disponibilidad futura. La contaminación de los acuíferos por diversas causas puede anular estas fuentes para el abastecimiento poblacional, mientras que la extracción excesiva puede producir resultados adversos como el hundimiento del terreno y la intrusión salina. El hundimiento del terreno puede afectar seriamente las ciudades, pues además de tener un efecto en la movilidad, ejerce presión sobre las redes de agua, generando roturas que incrementan el agua no contabilizada y pueden generar inundaciones. Finalmente, la sobreexplotación de los acuíferos también incrementa la vulnerabilidad de las ciudades ante el cambio climático, pues pone en riesgo la disponibilidad futura de la fuente y reduce la resiliencia ante eventos climáticos extremos.

El presente documento tiene la siguiente estructura: en el primer capítulo, se abordan los principales conceptos hidrológicos y económicos para entender el comportamiento de las aguas subterráneas y los incentivos alrededor de su extracción. En el segundo capítulo, se desarrolla la importancia que tienen los recursos hídricos subterráneos para la región de ALC. El tercer capítulo reseña los instrumentos de política para la gestión de aguas subterráneas, dividiéndolos en instrumentos de gestión de la demanda e instrumentos de gestión de la oferta. El cuarto capítulo reseña casos de estudio en la región; y el quinto capítulo contiene las conclusiones del documento.

Es preciso mencionar que esta monografía se centra en las aguas subterráneas urbanas y su potencial para abastecer las demandas residenciales e industriales. Debido a su importancia, el uso agrícola es mencionado en ciertas secciones, considerando las implicancias e interrelaciones que tiene con la extracción de agua para consumo humano e industrial. Sin embargo, es necesario continuar ampliando este análisis para comprender la rivalidad entre los distintos usos del recurso así como otros factores que complejizan el análisis, como el caso de las aguas subterráneas transfronterizas o la utilización de mercados de aguas (subterráneas)¹ para la asignación del recurso entre distintos usos, por mencionar algunos de ellos.

¹ Puede revisarse Sánchez y Eckstein (2017) para obtener información sobre los retos en la gestión de acuíferos transfronterizos compartidos entre México y Estados Unidos. Para el análisis de dos estudios de caso sobre mercados de aguas en Estados Unidos y Chile, puede revisarse Montginoul et al. (2016).

1.

Aguas subterráneas: teoría y conceptos

- 1.1. Conceptos básicos
- 1.2. Tipos de bienes y la tragedia de los comunes
- 1.3. Modelo de extracción óptima

1.1. Conceptos básicos

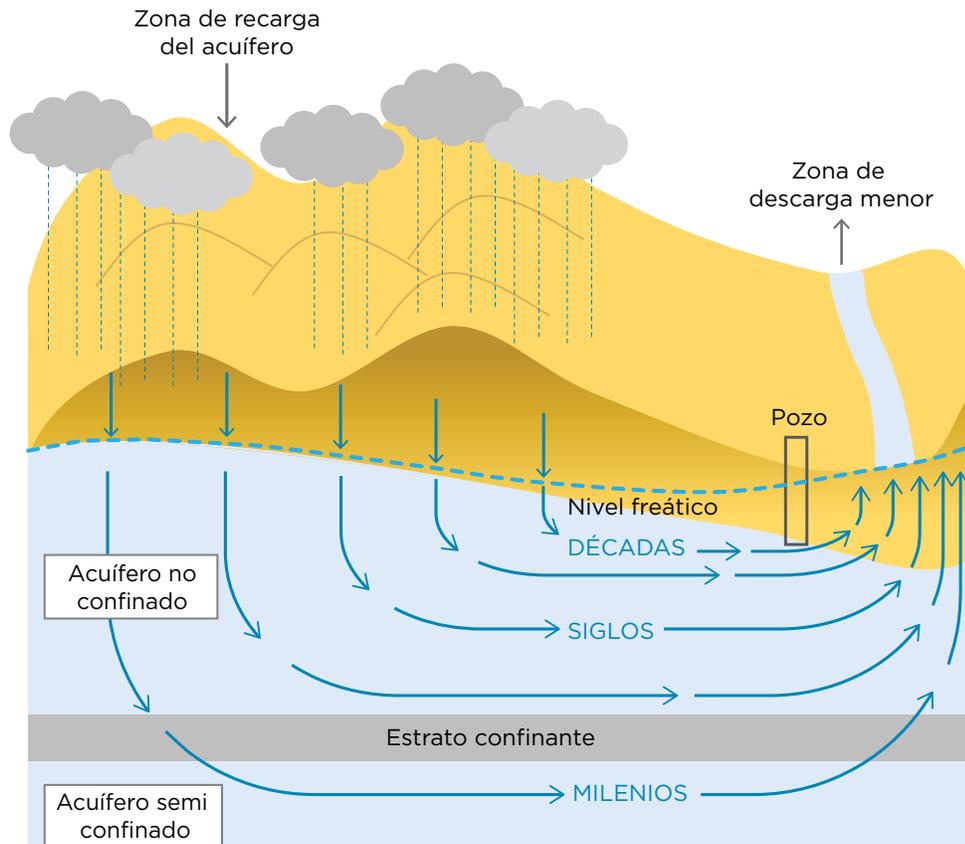
1.1.1. Aguas subterráneas y acuíferos

Las **aguas subterráneas** son la manifestación menos visible de los recursos hídricos. Así, los **acuíferos** son formaciones geológicas que almacenan grandes cantidades de agua, caracterizados por contar con zonas de recarga y descarga. La recarga de los acuíferos puede realizarse de manera directa por la infiltración en el suelo de agua producto de las lluvias y de aquellos cuerpos de agua tales como ríos o lagos. Asimismo, los acuíferos también pueden ser artificialmente recargados por la actividad humana. Por su parte, la descarga puede realizarse de manera natural (como el afloramiento de agua subterránea a través de arroyos o su contribución a ríos) o inducida por el ser humano a través de la extracción de agua subterránea mediante pozos.

Las aguas subterráneas se desplazan en el subsuelo a distintas velocidades desde zonas de recarga hasta zonas de descarga, tales como manantiales, humedales y zonas costeras, entre otros. Por tanto, los acuíferos transforman fenómenos de recarga inestables en una fuente de agua más estable (que puede formarse a lo largo de décadas, siglos o incluso milenios). Como puede verse en la **Ilustración 1**, cuando los acuíferos se encuentran bajo estratos menos permeables, las capas superiores confinan las aguas subterráneas, tratándose de **acuíferos confinados**. Por su parte, los **acuíferos no confinados** son aquellos a los cuales la actividad humana puede acceder fácilmente debido a que no tienen capas de baja permeabilidad que los constriñan.

■ ILUSTRACIÓN 1

Formación de acuíferos confinados y no confinados



Fuente: Elaboración propia, basado en Foster et al. (2010) y UNESCO (2022)

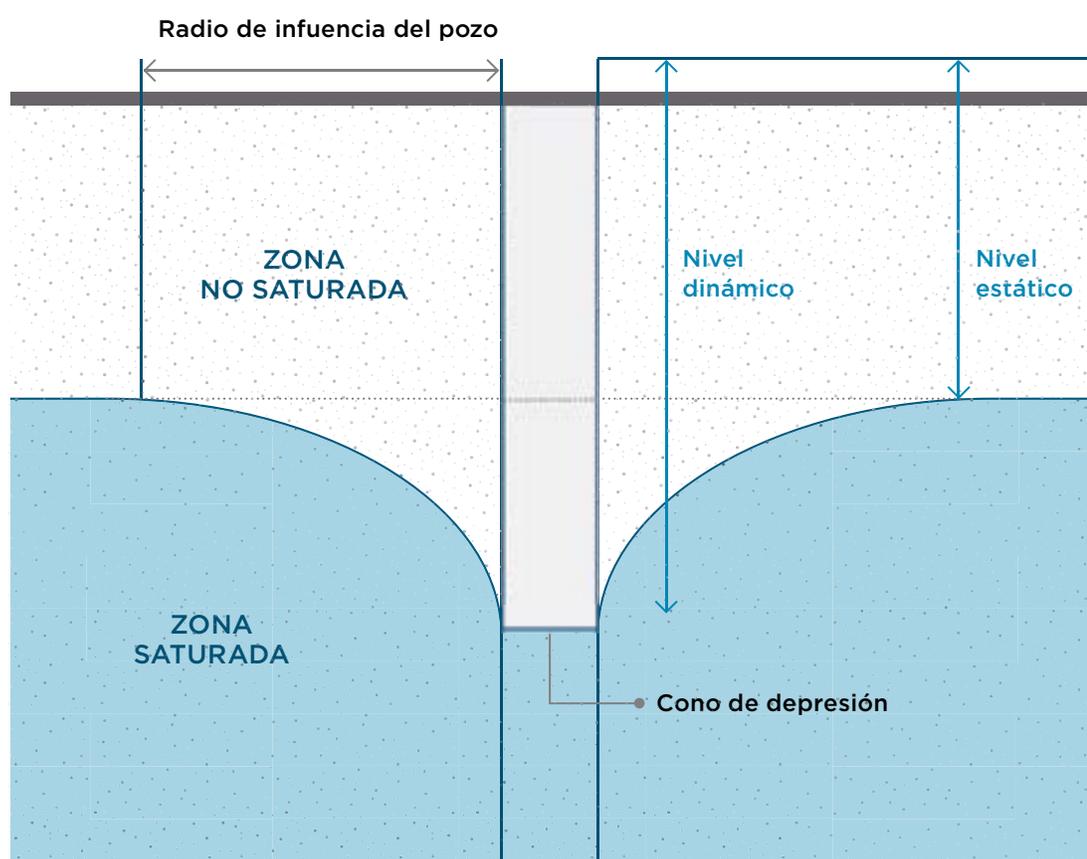
1.1.2. Superficie freática: nivel estático y nivel dinámico

El **nivel freático** (también conocido como capa freática, napa freática o tabla de agua) marca el nivel por debajo del cual el terreno se encuentra saturado (es decir, donde los poros o fisuras del suelo están llenos de agua). El **nivel estático** corresponde a la posición que, en condiciones naturales, ocupa el agua subterránea; sin embargo, cuando se instala un pozo, este corresponde a la distancia (medida en metros desde la boca del pozo) cuando el equipo de bombeo no se encuentra en funcionamiento. Por su parte, el **nivel dinámico** es la posición que ocupa el agua subterránea cuando el equipo de bombeo se encuentra en funcionamiento. A medida que el pozo inicia el bombeo de agua, se genera una caída en la carga hidráulica conocida como **cono de depresión** (ver **Ilustración 2**). Por definición, se espera una mayor variabilidad en el tiempo en el nivel dinámico; mientras que los cambios en el nivel estático

toman más tiempo y son un indicativo de la intensidad de extracción del pozo en el mediano y largo plazo. El **Recuadro 1** contiene un análisis de la evolución del nivel estático de los pozos bajo administración del operador de agua potable en Lima en el periodo 2011-2020.

■ ILUSTRACIÓN 2

Superficie freática de un pozo



RECUADRO 1

La evolución de las aguas subterráneas en Lima Metropolitana (Perú) durante los últimos 10 años

La provisión de agua potable en Lima y Callao (Perú) se encuentra a cargo de la empresa Sedapal. En 2020, el 20% del agua potable distribuida por la empresa fue producida mediante agua proveniente de un inventario de más de 400 pozos (Sedapal, 2021a). La segunda columna de la **Tabla 1** permite

advertir que existen datos para un número variable de pozos en el período analizado. Utilizamos los niveles estáticos de los pozos, debido a que estos nos permiten observar tendencias en el tiempo. Por el contrario, los niveles dinámicos suelen presentar mayor variabilidad y ser considerablemente más bajos (Kinzelbach et al., 2022). Una primera observación del promedio del nivel estático nos indica la existencia de una tendencia ligeramente creciente; es decir, la tabla de agua se ubica cada vez más lejos de la superficie (i.e. existe un retroceso progresivo del acuífero).

Sin embargo, existen diversos factores que influyen en el nivel de la napa freática tales como la cota topográfica y el patrón histórico de extracción de los pozos, lo cual hace que el nivel estático promedio varíe entre los distritos de Lima Metropolitana.

■ TABLA 1

Evolución del nivel estático promedio de los pozos de Lima Metropolitana (en metros)

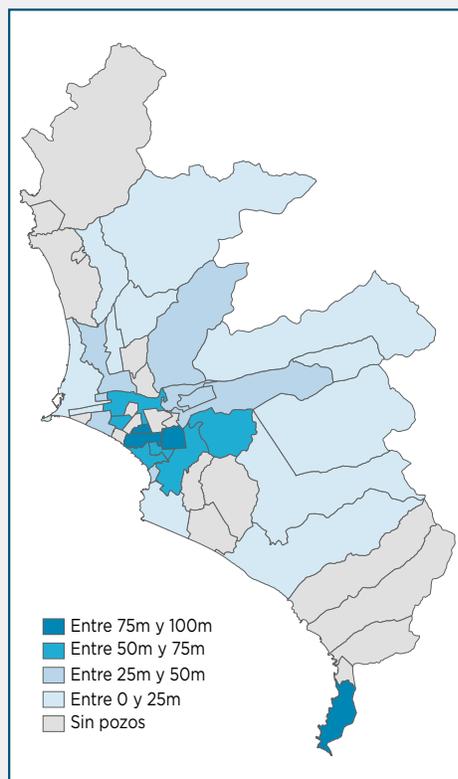
AÑO	POZOS	PROMEDIO
2011	407	25,96
2012	398	26,21
2013	412	26,15
2014	393	27,09
2015	378	26,69
2016	392	27,96
2017	390	27,99
2018	389	27,59
2019	423	28,54
2020	398	28,88

Fuente: Información enviada por Sedapal (2021b). Elaboración propia.

Para profundizar más el análisis, se realiza un análisis por distrito. La **Ilustración 3** muestra el resultado de sistematizar la información remitida por Sedapal sobre el nivel estático de sus pozos correspondiente al año 2020. Como puede verse, existe un grupo de distritos en la zona central de Lima cuyos pozos tienen en promedio un nivel estático superior a los 60 metros (Cercado de Lima, Santiago de Surco, Miraflores, Surquillo, San Isidro, San Borja y Lince). Dentro de este grupo también se encuentran los pozos ubicados en el distrito balneario de Pucusana, ubicado al sur de la región, cuyos pozos en 2020 tuvieron un nivel estático promedio de 78,9 metros.

■ ILUSTRACIÓN 3

Nivel estático promedio por distrito en 2020 (en metros)



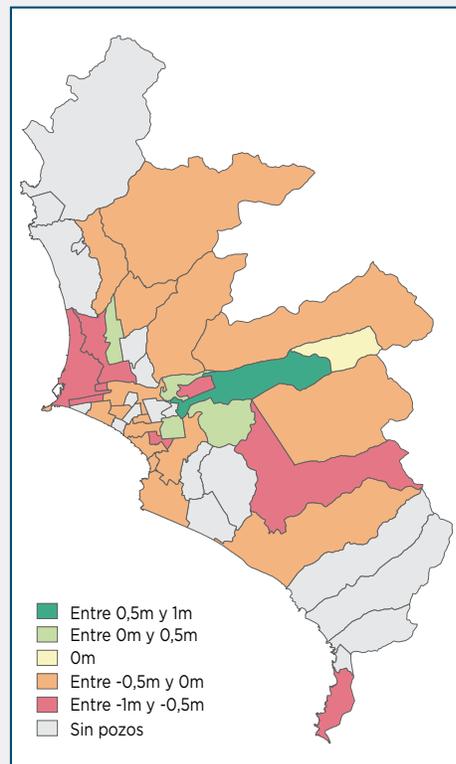
Fuente: Información enviada por Sedapal (2021b). Elaboración propia.

En un análisis más detallado (ver **Ilustración 4** y **5** y **Anexo 1**), podemos ver, en la mayoría de los distritos de Lima Metropolitana, un incremento en el nivel estático medido en metros (i.e. un descenso en el nivel del acuífero) durante el período 2011-2020. Dentro del grupo de distritos donde se exhiben recuperaciones en el nivel del acuífero se encuentran Ate (0,7 metros promedio por año), San Borja y Los Olivos (0,3 metros promedio por año), El Agustino (0,2 metros promedio por año) y La Molina (0,1 metros promedio por año); mientras que el distrito de Chaclacayo exhibe un nivel estático relativamente estable durante el periodo analizado.

De otro lado, Carmen de la Legua es el distrito con el mayor retroceso, en términos absolutos, en el nivel de la napa subterránea: el nivel estático aumentó en 8,1 metros en el periodo 2011-2020; es decir un promedio de 0,9 metros por año o un 35% con respecto a su nivel de 2011. También llaman la atención distritos como el Miraflores, Surquillo y Pucusana, que pertenecen al grupo de distritos cuyos niveles estáticos se encuentran por encima de los 60 metros y que han reportado retrocesos promedio en el nivel de los pozos de 0,5, 0,8 y 0,5 metros por año, respectivamente.

■ ILUSTRACIÓN 4

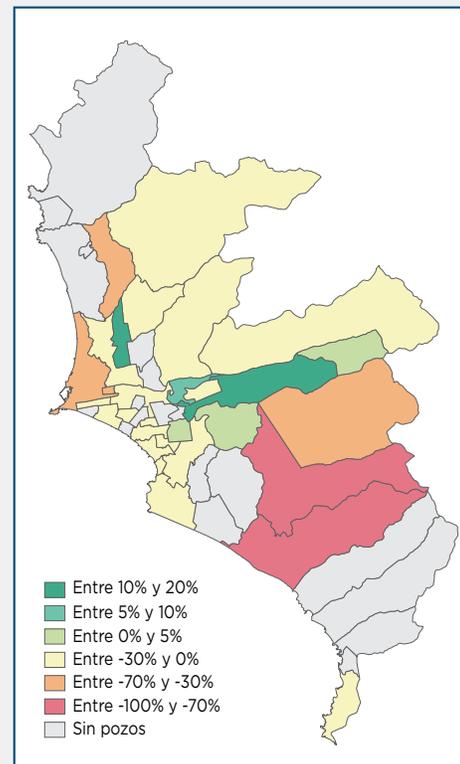
Variación anual promedio del nivel estático entre 2011 y 2020 (en metros)



Fuente: Información enviada por Sedapal (2021b). Elaboración propia.

■ ILUSTRACIÓN 5

Variación porcentual del nivel estático entre 2011 y 2020 (%)



Fuente: Información enviada por Sedapal (2021b). Elaboración propia.

1.1.3. Ventajas de utilizar las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas poseen las siguientes ventajas sobre las aguas superficiales:

- i) Menor costo de tratamiento. Si bien existe un costo asociado a la extracción, salvo excepciones, las aguas subterráneas requieren un menor tratamiento (a menudo, solo cloración), por lo cual la infraestructura de tratamiento y los insumos químicos son menores en el caso del uso de aguas subterráneas.
- ii) Distribución espacial. Cuando la prestación se encuentra a cargo de un operador, el despliegue de pozos a lo largo de la ciudad permite al operador producir agua potable en locaciones más cercanas a los usuarios, con lo cual se reducen los costos de transporte del agua potable y las pérdidas físicas de agua asociadas. De otro lado, no debemos perder de vista que las aguas subterráneas también son una opción técnica costo-efectiva para la provisión de agua en contextos rurales. En estos contextos donde la ausencia de economías de escala y densidad no permite una solución de distribución por redes, se da un fenómeno similar al de la “generación distribuida” en el servicio de electricidad. Los acuíferos son una fuente de capacidad distribuida de almacenamiento (UNESCO, 2022). En ambos casos, el usuario se convierte en productor del servicio del cual se abastece.
- iii) Estabilidad de la fuente. Las fuentes subterráneas se encuentran disponibles en todo momento del año, a diferencia de las fuentes superficiales cuya disponibilidad es estacional y depende de la época del año hidrológico (aumenta en periodos de avenida y se reduce en periodos de estiaje). Esto permite a las empresas realizar un uso conjuntivo de las fuentes; es decir, una combinación óptima y coordinada de las aguas superficiales y subterráneas, tanto intra como interanualmente. En ese sentido, el acuífero actúa como un amortiguador para superar las fluctuaciones del suministro de agua (WWAP, 2018). Esta característica también da el potencial a las aguas subterráneas de ser una reserva para garantizar la resiliencia del sistema ante eventos climáticos extremos. Estos beneficios son parte de los servicios ecosistémicos que proveen los acuíferos (ver **Recuadro 2**).

RECUADRO 2

Las aguas subterráneas como proveedoras de servicios ecosistémicos

Una buena gestión de los ecosistemas, conservándolos y asegurando su uso adecuado, es una condición necesaria para garantizar el desarrollo sostenible de los países. De acuerdo con el Millennium Ecosystem Assessment (2003),

entendemos como **servicios ecosistémicos** a todos aquellos beneficios que recibimos los seres humanos de los ecosistemas, dividiéndolos en cuatro tipos:

- **Servicios de abastecimiento:** aquella materia prima o productos obtenidos por el ser humano de los ecosistemas.
- **Servicios de regulación:** aquellos beneficios obtenidos de la regulación de procesos físicos, biológicos y químicos que tienen lugar en los ecosistemas.
- **Servicios culturales:** aquellos beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas a partir de la recreación, la contemplación y el desarrollo cognitivo, entre otros.
- **Servicios de apoyo:** aquellos servicios necesarios para la producción de otros servicios ecosistémicos (formación del suelo, nutrientes, etc.).

Las aguas subterráneas y los acuíferos donde estas se encuentran almacenadas brindan distintos servicios ecosistémicos que el ser humano aprovecha, los cuales se encuentran resumidos en la siguiente tabla.

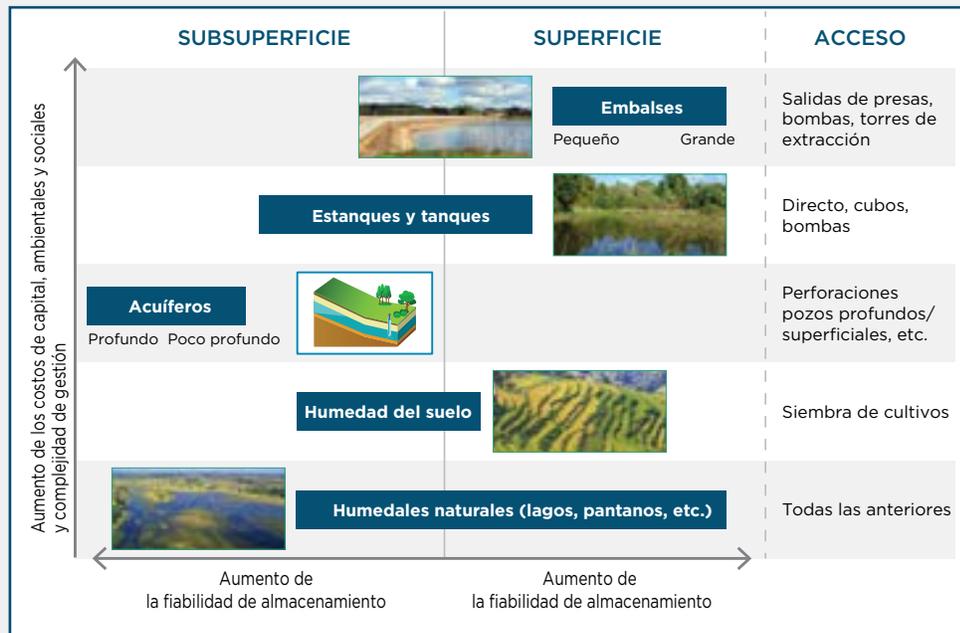
■ **TABLA 2**
Servicios ecosistémicos que proveen los acuíferos y las aguas subterráneas

TIPO DE SERVICIO	SERVICIO ECOSISTÉMICO
Abastecimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Agua para el consumo humano urbano y rural • Agua para el riego de superficies agrícolas y usos agropecuarios • Agua para la industria • Agua para generación eléctrica por geotermia
Regulación	<ul style="list-style-type: none"> • Depuración del agua • Almacenamiento (amortiguamiento) entre periodos de avenida y estiaje • Amortiguamiento ante efectos del cambio climático (autonomía de fuentes superficiales) • Mitigación de las inundaciones • Reducción de erosión
Culturales	<ul style="list-style-type: none"> • Agua mineral • Aguas termales
Apoyo	<ul style="list-style-type: none"> • Manantiales • Mantenimiento de organismos microbianos del subsuelo • Mantenimiento de plantas freatófitas • Mantenimiento de biodiversidad, incluyendo especies animales

Fuente: Elaboración propia, basado en The Nature Conservancy (2022), Griebler y Avramov (2015) y van der Gun (2019).

Al respecto, debe recordarse que los acuíferos son una de muchas opciones para proveer almacenamiento de agua. Puede hablarse más bien de un “continuum del almacenamiento de agua”; es decir, que existe un amplio espectro de opciones superficiales y sub-superficiales, que deben tenerse en cuenta al planificar el almacenamiento (ver **Ilustración 6**). Por ejemplo, en ALC, la infraestructura natural de los bofedales y páramos (ubicados en la parte central y norte de los Andes, respectivamente) tienen una gran capacidad de retención de agua debido a sus suelos altamente orgánicos (Muñoz y Crisman, 2019). La combinación óptima, incluyendo infraestructura gris e infraestructura natural, debe tener en cuenta los costos de capital, ambientales, y sociales, así como la complejidad en la gestión de cada alternativa.

■ **ILUSTRACIÓN 6**
Continuum de almacenamiento de agua



Fuente: WWAP - Unesco (2018).

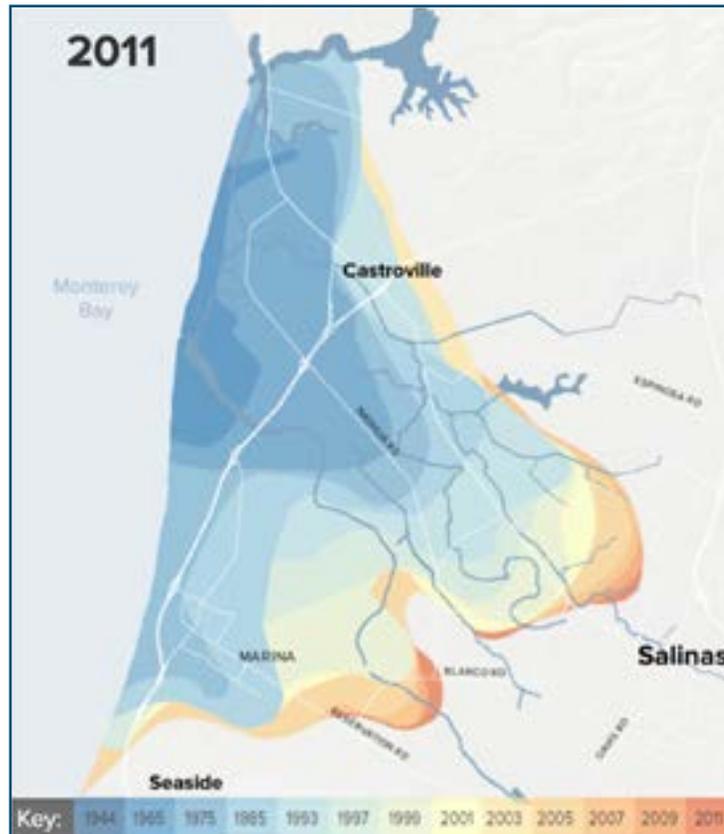
1.1.4. Amenazas a las aguas subterráneas

De acuerdo con Wijnen et al. (2012), la cantidad y calidad de las aguas subterráneas se encuentran amenazadas por el uso no sostenible del recurso producto del rápido crecimiento poblacional y económico. De acuerdo con estos autores, las amenazas pueden clasificarse en tres categorías:

- i) Reducción de la cantidad por sobreexplotación. Desde el punto de vista económico, las aguas subterráneas son un bien de propiedad común, por lo cual los agentes tienen incentivos a maximizar su beneficio privado extrayendo la mayor cantidad de agua posible (ver **sección 1.2**). En muchos países, estos incentivos se han visto reforzados por los costos relativamente bajos de extracción (ausencia de señales de precio efectivas por el aprovechamiento del recurso hídrico y tarifas eléctricas subsidiadas).
- ii) Invasión o degradación de las zonas de recarga. El desarrollo urbanístico y los cambios en los usos de suelo y en los ciclos hidrológicos pueden afectar la cantidad y calidad de agua que se infiltra en los acuíferos. La urbanización reduce la cantidad de escorrentía que se infiltra debido a que se reducen las áreas de infiltración, es decir, se impermeabiliza la superficie del suelo (Foster, 2020). Los cambios en los usos de suelo incluyen también a la expansión de tierras agrícolas, la deforestación y la destrucción de humedales, perdiéndose con estos últimos servicios ecosistémicos tales como la retención de agua, la atenuación de inundaciones y el mantenimiento en la calidad del agua (Scanlon et al., 2023).
- iii) Deterioro de la calidad de las aguas subterráneas. Las aguas subterráneas pueden contaminarse por causas naturales o antrópicas. El saneamiento in situ y, en menor medida, la filtración de alcantarillado o el derrame fortuito de desechos industriales o químicos puede contaminar las aguas subterráneas (Foster, 2020). La recuperación de los acuíferos no siempre es posible —y cuando lo es, es bastante costosa—, por lo cual debe incidirse en la prevención y control, a fin de evitar la inutilización de los pozos por efecto de la contaminación de las aguas subterráneas. La sobreexplotación de los acuíferos puede contribuir a este fenómeno a través de la contaminación por intrusión salina.

■ ILUSTRACIÓN 7

Avance de la intrusión salina en el acuífero entre 1944 y 2011 (Bahía de Monterrey, California, Estados Unidos)



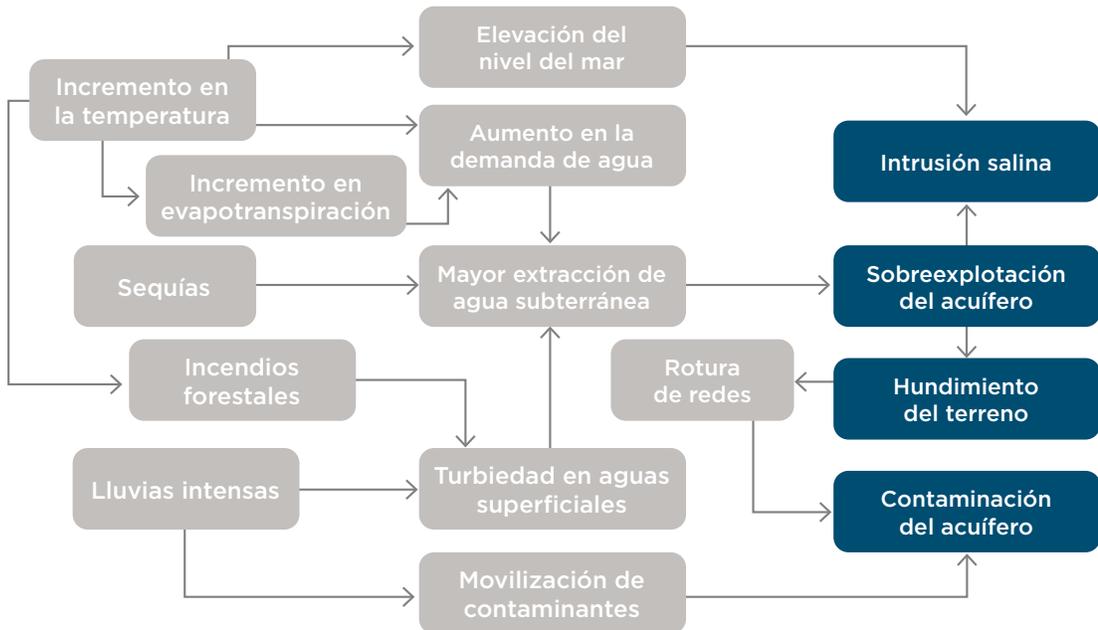
Fuente: Moran et al. (2014).

Estas amenazas se intensificarán en los próximos años, conforme los efectos del cambio climático se hagan más intensos y frecuentes. Por ejemplo, el incremento en las temperaturas incrementará la presión extractiva sobre los acuíferos, debido a que aumentará la demanda de agua para fines poblacionales y para la agricultura, en este último caso como consecuencia de un aumento en la evapotranspiración. La elevación del nivel del mar también puede afectar seriamente a los acuíferos costeros, incrementando la probabilidad de intrusión salina. Del mismo modo, las lluvias intensas pueden incrementar el nivel de turbiedad en las fuentes superficiales y arrastrar contaminantes (como pesticidas, químicos o excretas) que comprometan la calidad de los acuíferos (Caretta et al., 2022).

La **Ilustración 8** presenta los principales efectos del cambio climático y los impactos que estos tienen sobre las aguas subterráneas.

■ ILUSTRACIÓN 8

Efectos del cambio climático y su impacto en las aguas subterráneas



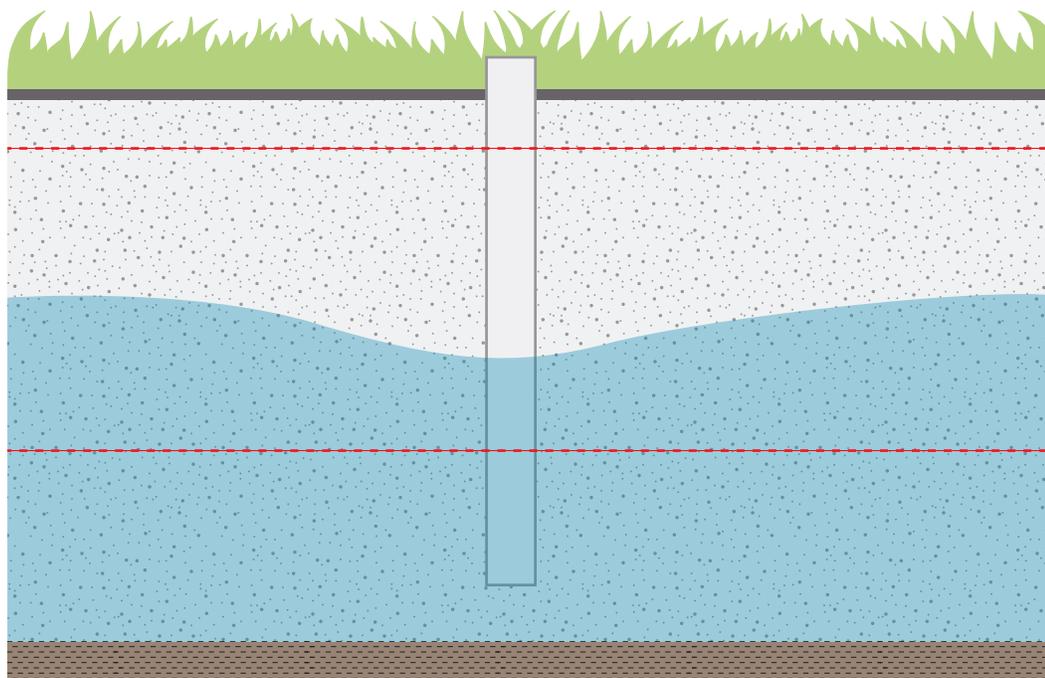
Fuente: Elaboración propia.

1.1.5. Sobreexplotación y consecuencias

El término “sobreexplotación” está directamente relacionado a la sostenibilidad de los acuíferos. Algunos consideran que el acuífero se encuentra sobreexplotado cuando los niveles de la napa freática exhiben un decrecimiento sostenido de largo plazo; lo cual indica que la extracción es consistentemente mayor que la recarga. En esta definición, es importante discutir qué consideramos como “largo plazo”, debido a que algunas veces la recarga ocurre durante grandes eventos que tienen lugar cada década, y muchas veces la extracción de agua no está distribuida de manera uniforme en el tiempo (Foster et al., 2010). En ese sentido, la explotación sostenible se entiende como aquel régimen de extracción que mantiene los niveles freáticos entre un límite superior y uno inferior (delimitados con líneas rojas en la **Ilustración 9**), y por tanto la sobreexplotación puede entenderse como aquella situación conducente a traspasar el límite inferior. La definición de este límite dependerá de distintos factores, tales como la cercanía del acuífero a la costa o criterios ecológicos (Kinzelbach et al., 2022).

■ ILUSTRACIÓN 9

Límites que determinan la extracción sostenible



Fuente: Kinzelbach et al. (2022).

La sobreexplotación del acuífero puede tener consecuencias reversibles e irreversibles, las cuales se encuentran detalladas en la **Tabla 3**.

■ TABLA 3

Consecuencias de la extracción excesiva de aguas subterráneas

REVERSIBLE	IRREVERSIBLE
<ul style="list-style-type: none"> • Incremento en los costos de bombeo • Reducción en el rendimiento del pozo • Reducción del caudal de manantiales asociados 	<ul style="list-style-type: none"> • Estrés de la vegetación freatófila (natural y agrícola) • Compactación del acuífero y reducción de la transmisividad • Intrusión de agua salina • Intrusión de agua contaminada (del acuífero o del río) • Hundimiento del terreno e impactos asociados (compactación del acuitardo)

Fuente: Foster et al. (2010). Traducción propia.

Adicionalmente debe considerarse que si se abandona el uso de agua subterránea por alguna razón (e.g. contaminación del acuífero) luego de un periodo de extracción intensa, puede ocurrir un rebote de la capa freática, causando inundaciones en predios, rutas de transporte y el colapso de redes colectoras de alcantarillado, como ocurrió en Buenos Aires en la década de 1980 (Foster, 2020). Algunas veces las autoridades toman conciencia de la importancia de la gestión de las aguas subterráneas cuando su sobreexplotación ha causado una reducción perceptible en el rendimiento de los pozos o la calidad del agua extraída. Sin embargo, es necesario que los países adopten una actitud más proactiva a fin de prevenir la explotación no sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

RECUADRO 3

La sobreexplotación de los acuíferos y el hundimiento del terreno en las ciudades

Una externalidad causada por la extracción excesiva de aguas subterráneas es la compactación del acuífero y el consiguiente hundimiento del terreno. Esto genera serios problemas en las ciudades, pues, además de generar desniveles que afectan la movilidad urbana, impacta la infraestructura de los servicios de agua y saneamiento.

El hundimiento del terreno ejerce una presión sobre las redes de distribución de agua, lo que genera agrietamientos y pérdidas físicas de agua, ocasionando un incremento en el agua no contabilizada. También puede ocasionar fisuras de las redes colectoras de alcantarillado y esto una posible contaminación del agua potable y de los propios acuíferos (Moran et al., 2014). Finalmente, las roturas de las redes de agua y alcantarillado podrían generar inundaciones en la ciudad.

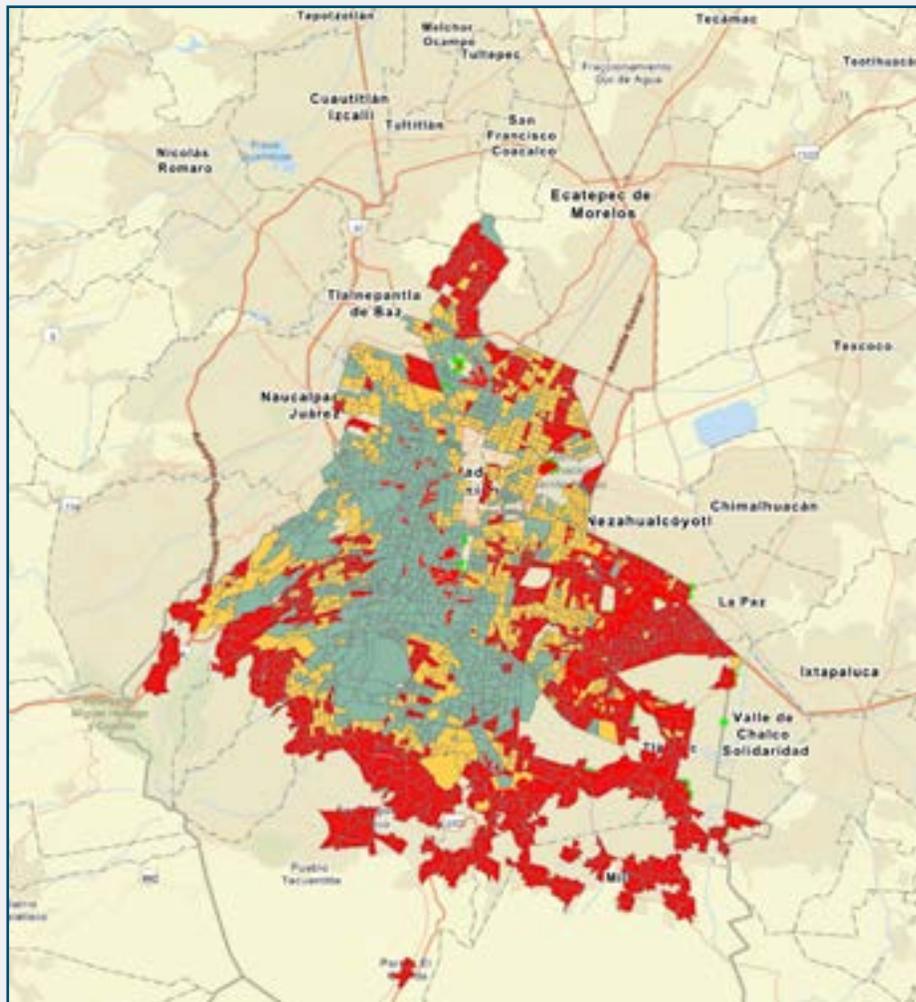
En México, las tasas de subsidencia se encuentran entre las más altas del mundo, de hasta 30 centímetros de hundimiento por año para el período 2004-2006 en Ciudad de México (Galloway y Burbey, 2011). En 2017, el Centro Nacional de Prevención de Desastres de México presentó un mapa interactivo de hundimiento y agrietamientos de la Ciudad de México, donde se reportan zonas con hundimientos de hasta 40 centímetros por año (ver **Ilustración 10**).

La Ciudad de México es usualmente mencionada como un caso crítico a nivel mundial que ilustra la relación entre extracción excesiva y subsidencia

(Kinzelbach et al., 2022; Scanlon et al., 2023). En un foro organizado por la Red del Agua UNAM y SACMEX (2013) se señaló que “la sobreexplotación del acuífero ha permitido satisfacer la demanda de agua en la ciudad, no obstante, se ha trastornado de manera significativa el equilibrio al extraer más agua de la que se infiltra, de no incrementarse la recarga, los problemas de hundimiento del suelo en el Valle de México continuarán agudizándose”. De acuerdo con Palma et al. (2022), el 63% de la demanda de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México procede de aguas subterráneas, con una sobreexplotación asociada de 25 m³/s.

■ ILUSTRACIÓN 10

Mapa de hundimientos y agrietamientos en la Ciudad de México



Fuente: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Geociencias/>
Revisado el 22/12/2022.

Chaussard et al. (2021) realizan un análisis para el caso de la Ciudad de México, y encuentran que las tasas de hundimiento han sido relativamente constantes desde, por lo menos, 1950 y han sido de aproximadamente 50 centímetros por año. El análisis concluye que, para este caso, la ubicación de los puntos de extracción de agua y la magnitud de agua extraída no explican de forma exclusiva las tasas de subsidencia. En cambio, encuentran una relación lineal positiva entre las tasas de subsidencia y el grosor del acuitardo superior y el acuífero. Los autores establecen que, considerando que alrededor de dos tercios del consumo de agua de la zona es extraído del acuífero, deben implementarse acciones drásticas de gestión del agua (como la reutilización de las aguas residuales tratadas para la recarga de las aguas subterráneas y el riego agrícola y urbano). De acuerdo con Palma et al. (2022), el análisis hidrológico indica que tanto el agua reciclada como la recarga artificial de acuíferos con aguas de lluvia son oportunidades en el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1.2. Tipos de bienes y la tragedia de los comunes

Los bienes en la economía pueden clasificarse según su grado de exclusión y rivalidad. La exclusión hace referencia a la capacidad de privar del consumo a cualquier interesado en el bien, ya sea a través de barreras físicas (e.g. construcción de infraestructura) o económicas (e.g. tarifas). Por su parte, la rivalidad mide el grado en el cual el consumo de un individuo reduce la oferta del bien para los demás (Zegarra, 2014).

Por ejemplo, en la **Ilustración 11** el agua potable se encuentra en el cuadrante inferior derecho (rivalidad y exclusión altas), debido a que el consumo de un metro cúbico por parte de un usuario reduce necesariamente la oferta disponible para el resto de usuarios, y su consumo requiere de una conexión y del pago de una tarifa, por lo cual se le considera un bien privado. En el extremo opuesto, encontramos a los servicios ecosistémicos, un bien público, debido a que no puede excluirse a nadie de su disfrute y puede beneficiar simultáneamente a todos los ciudadanos.

■ ILUSTRACIÓN 11

Ubicación de los usos del agua en el mapa de bienes públicos y privados



Fuente: Adaptación propia en base a Zegarra (2014). Elaboración propia.

Las aguas subterráneas son un bien de propiedad común y se encuentran en un punto medio entre estos cuadrantes, pues poseen un nivel alto de rivalidad y cierto grado de exclusión. La alta rivalidad en el consumo viene dada por el hecho de que la extracción de agua del acuífero por parte de un usuario reduce el stock disponible para otros usuarios, generando un problema de escasez: dos usuarios no pueden simultáneamente extraer el mismo metro cúbico. Esta rivalidad ocurre tanto entre usos distintos (agrícola versus poblacional, por ejemplo) como dentro de un mismo tipo de uso. De otro lado, existen algunas medidas administrativas y económicas que pueden establecerse para excluir a ciertos usuarios de la utilización del recurso (por ejemplo, establecer como requisito tramitar una licencia o solicitar un pago por las aguas extraídas).

Sin embargo, la exclusión no es perfecta pues es difícil controlar quién extrae agua subterránea y cuánto extrae. Para lo primero, las autoridades suelen requerir una licencia y cobrar un cargo o tarifa, realizando inspecciones para detectar pozos clandestinos. Para lo segundo, la instalación de medidores individuales para registrar los volúmenes extraídos suele ser poco común y a menudo las autoridades recurren a declaraciones juradas por parte de los usuarios.

En el caso de los bienes de propiedad común, Hardin (1968) alertaba que estos serán inevitablemente sobreexplotados en ausencia de medidas coercitivas, un fenómeno que el autor nombró “la tragedia de los comunes”. Al respecto, Hardin señala que si bien los individuos se preguntan únicamente cuál es la utilidad *para ellos mismos* de explotar una unidad adicional del bien común, la utilidad tiene, en realidad, dos componentes: i) el componente positivo de la utilidad, que es consecuencia del beneficio directo por explotar el bien común (en el ejemplo del autor, por incluir una

unidad de ganado a pastear en el campo) y ii) el componente negativo derivado de la sobreexplotación del bien común (sobrepastoreo, en el mismo ejemplo). Este último componente es compartido por todos aquellos individuos que explotan el bien común, por lo cual, la racionalidad de los individuos los lleva a considerar únicamente el primer componente y, por tanto, explotar tanto del bien común como les es posible. En el mediano y largo plazo, en ausencia de regulación, esto termina en la depredación del recurso, afectando a todos.

1.3. Modelo de extracción óptima

Los factores que inciden en el nivel de un acuífero pueden estudiarse a través de su formalización en un modelo matemático. Esto nos permitirá, desde el punto de vista económico y de la sostenibilidad del acuífero, proponer políticas públicas destinadas al aprovechamiento óptimo de las fuentes de agua subterránea. Esta sección presenta un modelo basado en los desarrollados por Strand (2010), Hanemann (2005) y Chaitra y Chandrakanth (2005).

El modelo corresponde a uno de optimización dinámica, debido a que el problema que enfrenta la sociedad ante el uso de aguas subterráneas es intertemporal: la elección de la extracción hoy tiene implicancias en la capacidad de extraer y por tanto en los beneficios y costos del futuro. De esta forma, el objetivo en este problema es maximizar el valor presente de los beneficios sociales netos provenientes de la extracción de agua subterránea, dado el stock existente.

1.3.1. Ecuación de recarga del acuífero

En primer lugar, vale la pena definir cómo interactúan el stock de agua subterránea y las extracciones. Así, consideramos que el stock de aguas subterráneas en determinado periodo es una función del stock de agua, la recarga y la extracción en el periodo anterior:

$$G_{t+1} = (G_t + R(E_t) - E_t)$$

$$G_{t+1} = (G_t + A + \theta E_t - E_t)$$

Donde:

- G_t : Stock de aguas subterráneas al inicio del periodo t
 E_t : Extracción de aguas subterráneas en el periodo t
 $R(E_t)$: Función de recarga del acuífero
 A : Recarga natural o artificial del acuífero
 θ : Porcentaje de las extracciones que se reinfiltran

De esta forma, la ecuación anterior formaliza que el stock de aguas subterráneas es una función de las recargas y descargas. Como parte de las descargas, consideramos únicamente las extracciones que se hacen en el periodo anterior. Mientras que, por el lado de las recargas, consideramos que un porcentaje de las extracciones se termina reinfiltrando (θ), pero también consideramos un parámetro fijo de recarga (A). Este puede recoger la recarga natural del acuífero (alimentada por otros cuerpos de agua o por la infiltración de las aguas de lluvia pero que, en definitiva, no depende de las extracciones de agua) o la recarga inducida o artificial que es producto de la acción del ser humano.

1.3.2. Beneficios y costos de extracción

La extracción de aguas subterráneas genera beneficios e implica costos. Los beneficios sociales incluyen la utilidad generada por el consumo humano, así como el valor de la producción agrícola que utiliza las aguas subterráneas como insumo². Es esperable que los beneficios sean una función creciente y cóncava del volumen de extracción de agua; es decir, que se cumpla que $B'(E_t) > 0$ y $B''(E_t) < 0$. Hanemann (2005) formaliza estas características con una función cuadrática con los siguientes parámetros:

$$B(E_t) = aE_t - b(E_t)^2$$

Con respecto al costo de extracción, definimos una función en la que este depende tanto del volumen extraído como del stock de aguas subterráneas en el periodo. El primer componente se explica tanto desde el punto de vista administrativo (pago de tasas con tarifas por metro cúbico extraído) como desde el punto de vista operativo (energía eléctrica utilizada en el bombeo). Por su parte, otro aspecto intertemporal del modelo, es que el costo de extracción depende del stock de aguas subterráneas: este se incrementa a medida que el stock de aguas subterráneas se reduce (Kinzelbach et al., 2022). Esto puede formalizarse con una función de costos

² Además del valor del agua subterránea para la agricultura y el uso doméstico e industrial, Strand (2010) señala que su valor también incluye su rol de soporte a la biodiversidad y la prevención de la intrusión salina y el hundimiento del terreno.

que incluye un costo directo de la extracción (c) y un parámetro (δ) que recoge la sensibilidad del costo de extracción ante un descenso en el stock de agua del acuífero:

$$C(E_t, G_t) = (c - \delta G_t) E_t$$

El problema de optimización, por tanto, consiste en determinar el nivel de extracción óptima que permite maximizar el valor presente del beneficio neto social, teniendo en cuenta la tasa de descuento (r), es decir:

$$\max \sum_{t=0}^{\infty} (1+r)^t [aE_t - b(E_t)^2 - (c - \delta G_t) E_t]$$

$$s. a \quad G_{t+1} = (G_t + A - (1 - \theta) E_t)$$

$$G_0 = \bar{G}_0$$

1.3.3. Solución al problema

Al realizar la solución de este problema de optimización y analizar el equilibrio estacionario, Hanemann (2005) encuentra las siguientes condiciones:

$$E^* = R(E^*) \dots (1)$$

$$\frac{\delta B(E^*)}{\delta E} = \frac{\delta C(G^*, E^*)}{\delta E} + \lambda^* \left[1 - \frac{\delta R(E^*)}{\delta E} \right] \dots (2)$$

$$\lambda^* = \frac{-\delta C(G^*, E^*)}{r} \dots (3)$$

La condición (1) nos señala que, en equilibrio estacionario, el volumen extraído de agua debe ser igual al volumen que se recarga en el acuífero por periodo. La condición (2) nos indica que el beneficio marginal de la extracción de agua debe ser igual al costo marginal más una prima adicional. Esta corresponde al valor marginal de dejar en el subsuelo una unidad adicional de agua subterránea, descontando la cantidad de agua que se recarga³. Este es un primer resultado interesante ya que revela que la solución óptima, a diferencia del escenario en que la extracción solo

³ El multiplicador de Lagrange (μ) mide el incremento en la función objetivo como resultado de un relajamiento marginal en la restricción. En este caso, se interpretaría como el aumento en el valor presente del beneficio neto social como consecuencia de contar con una unidad más de agua subterránea en el stock en el periodo t . Definimos el parámetro λ de la siguiente forma: $\lambda_t = (1+r)^t \mu_t$.

considera los costos privados, requiere que se internalice un componente adicional. En pocas palabras, una decisión óptima considera que parte del costo de extraer agua es también el costo de no poder beneficiarse de agua en el futuro. Finalmente, la condición (3) nos indica que el valor marginal de dejar en el subsuelo una unidad adicional de agua subterránea corresponde al valor presente de todos los ahorros en costos futuros que generará su no extracción⁴.

En particular, vale la pena revisar el nivel de equilibrio estacionario del stock de aguas subterráneas del acuífero:

$$G^* = \frac{\left[\frac{\delta A}{r} + c - a + 2b \frac{A}{1-\theta} \right]}{\delta}$$

Desde el punto de vista de las políticas públicas, existe un grupo de variables que tienen incidencia en el stock de aguas subterráneas y que resulta relevante discutir: la recarga del acuífero (A), el costo volumétrico de extraer agua (c), y el porcentaje de agua que se infiltra en el acuífero (θ).

Existe una relación directa entre el stock del acuífero y el volumen de agua que se recarga en cada periodo y que no depende de las extracciones (A). Si bien esto incluye en gran medida la recarga natural del acuífero (que puede potenciarse con inversiones en infraestructura natural), también existen actividades e inversiones que, de manera directa o indirecta, contribuyen a la recarga de aguas subterráneas. Algunos ejemplos incluyen los proyectos de recarga artificial, pero también los trasvases de agua que tienen el efecto indirecto de aumentar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca.

Existe una relación directa entre el stock del acuífero y el costo volumétrico de extraer aguas subterráneas (c). Dentro de este costo se encuentra el pago de tasas, tarifas o canones, así como el costo de energía eléctrica. Por tanto, el establecimiento de cargos por extracción de aguas subterráneas y la reducción de subsidios en las tarifas eléctricas son fundamentales para asegurar que la extracción sea sostenible y óptima desde el punto de vista social.

Existe una relación directa entre el stock del acuífero y el porcentaje de infiltración del agua extraída (θ). Ante ello, vale la pena recordar que los gobiernos pueden, en el ámbito público, desarrollar proyectos de infraestructura verde urbana que favorecen la infiltración de agua utilizada para el riego de parques y jardines (ver **Sección 3.2.2**) y, desde el lado privado, implementar políticas para incrementar la permeabilidad de los predios de viviendas, comercios e industrias, favoreciendo así también la infiltración de agua utilizada por los usuarios y proveniente de lluvias (ver **Recuadro 5**).

⁴ El valor presente de una perpetuidad (P) se calcula como $VP = P/r$.

2.

Importancia de las aguas subterráneas en ALC

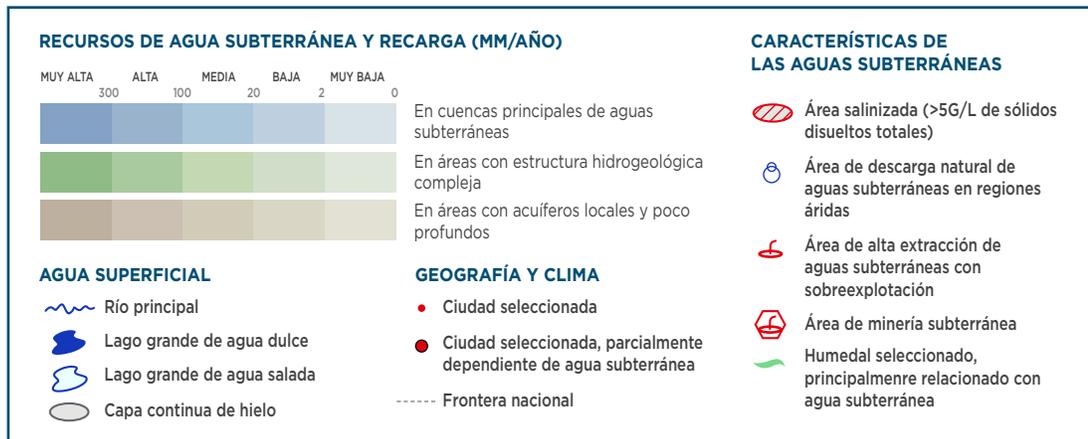
Aproximadamente el 99% del agua dulce del planeta se encuentra en fuentes subterráneas (Shiklomanov y Rodda, 2003). Esta tiene el enorme potencial de ser explotada para el consumo humano directo en ámbitos urbanos y rurales⁵. Con relación a su disponibilidad en ALC, la **Ilustración 12** presenta un mapa de *Worldwide Hydrogeologic Mapping and Assessment Program*, donde puede observarse que dicho recurso es abundante en la mayoría de zonas de la región, con excepción de algunas zonas en Argentina, Brasil y Chile. Asimismo, se observa sobreexplotación en zonas del centro y norte de México donde, además, existe una baja tasa de recarga del acuífero. Adicionalmente, debe considerarse que la distribución de los recursos hídricos no siempre se corresponde con la distribución de la población en la región: 35% de la población de ALC vive en áreas con estrés hídrico medio alto o extremadamente alto (Libra et al., 2022).

La calidad de los acuíferos es un aspecto que no debe perderse de vista. Si bien algunas zonas de la región podrían presentar una disponibilidad mediana o alta de recursos hídricos subterráneos, su explotación puede verse amenazada si se compromete su calidad. Por ejemplo, de acuerdo con Bretas et al. (2020), la poca profundidad de los acuíferos en Chile, México, el norte y centro de Brasil y el norte de Argentina los hace más susceptibles a la contaminación; mientras que segmentos importantes del Acuífero Guaraní se han salinizado a causa de la sobreexplotación y la infiltración de agua superficial. En Perú, la sobreexplotación del acuífero ha conducido a un incremento en los niveles de salinidad del recurso en Ica (Zegarra, 2018); mientras que, en Lima, algunos pozos se encuentran fuera de servicio debido a la captación de aguas altamente mineralizadas y afectadas por la intrusión marina (ANA, 2016).

⁵ Como se ha mencionado, aunque no es parte del alcance de la presente monografía, las aguas subterráneas también son utilizadas para el riego de superficies agrícolas, contribuyendo así a la producción de alimentos, por lo cual la evaluación debe considerar que existe rivalidad en su consumo por parte de distintos usos.

■ ILUSTRACIÓN 12

Distribución geográfica de recursos de aguas subterráneas en ALC



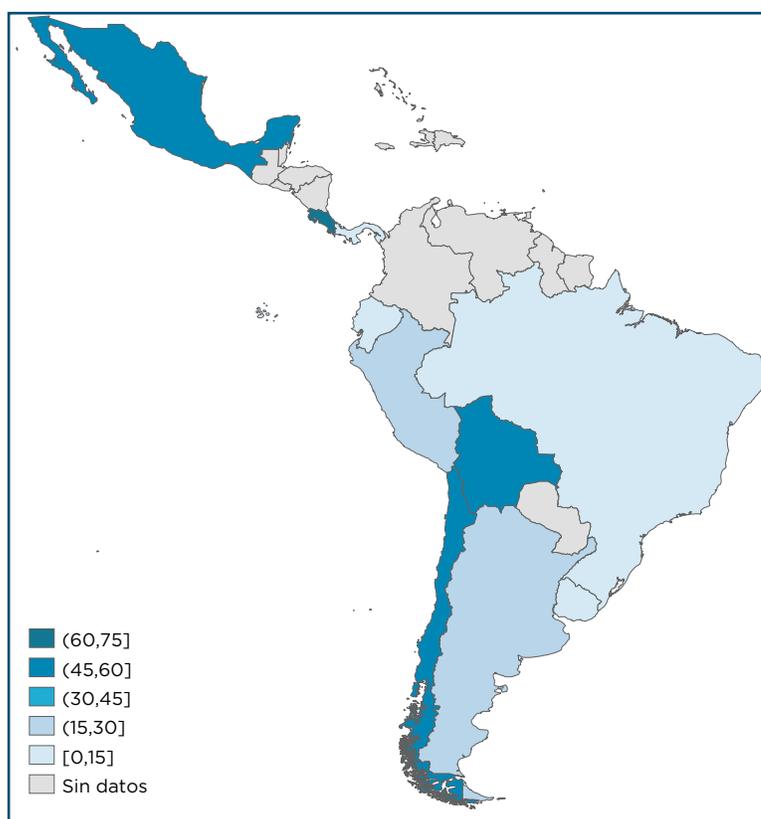
Fuente: WHYMAP (2008). Traducción propia.

En ámbitos urbanos de ALC, muchas empresas operadoras utilizan fuentes subterráneas para la producción parcial o incluso total del agua que distribuyen a sus usuarios. Para analizar la participación de las aguas subterráneas en la producción total de agua, se ha recopilado información pública de distintas empresas de la

región. No obstante, debe mencionarse que esta es limitada y, en algunos casos, corresponde únicamente a la(s) empresa(s) de mayor tamaño a nivel nacional. En los casos en los que se cuenta con información para más de una empresa, se ha calculado la participación del agua subterránea promedio ponderando los valores por el tamaño de la empresa (número de conexiones), a fin de recoger mejor la importancia de los recursos hídricos subterráneos en la producción nacional de agua potable en ámbitos urbanos. La lista de empresas proveedoras —urbanas, lo cual debe considerarse en la interpretación de los resultados— y los datos utilizados⁶ pueden encontrarse en el **Anexo 2**.

■ ILUSTRACIÓN 13

Extracciones de aguas subterráneas como porcentaje de la captación total de agua en empresas urbanas de ALC



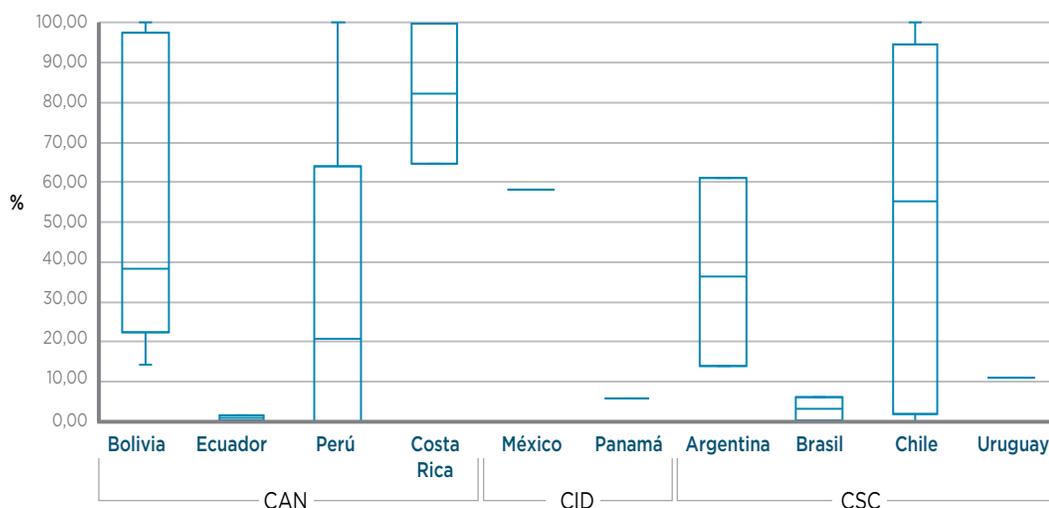
Nota: Corresponde al promedio ponderado de las empresas para las cuales se encontró datos en cada país, utilizando el número de clientes como ponderador. Fuentes: Aderasa - Sunass (2021), SACMEX (2022), SABESP (2021). Elaboración propia.

⁶ El indicador de uso de aguas subterráneas reportado por las empresas podría incluir, además de aquella extraída mediante pozos, las captaciones de afloramientos naturales del agua subterránea (e.g. manantiales).

Como puede verse en la **Ilustración 13**, el porcentaje promedio de uso de aguas subterráneas en la producción de agua potable alcanza hasta el 68,1%. Este es el caso de Costa Rica, donde las fuentes subterráneas en las empresas AyA y Empresa de Servicios Públicos de Heredia corresponden al 64,6% y 99,7% del total de captaciones de agua. Otro caso interesante es el de la Ciudad de México, que se abastece en un 58% de aguas subterráneas⁷. También vale la pena advertir que, si bien las empresas más grandes de Perú (Sedapal) y Chile (Aguas Andinas) producen con fuentes subterráneas alrededor de un quinto del agua potable que distribuyen, existen empresas en dichos países donde el 100% de la producción se realiza con fuentes subterráneas. En Bolivia, si bien la empresa más grande (EPSAS, que abastece a La Paz) utiliza 15% de agua subterránea, la siguiente empresa (SAGUAPAC, que abastece a Santa Cruz) produce agua potable exclusivamente con fuentes subterráneas. El **Gráfico 1** permite distinguir la variabilidad en la intensidad de uso de aguas subterráneas en las empresas de la región para las cuales se ha encontrado información. No se pudo obtener información específica para países del Grupo Caribe (CCB); sin embargo, se sabe que las aguas subterráneas constituyen alrededor de la mitad de las fuentes utilizadas para la producción de agua potable (UNESCO, 2022); aunque debido a su degradación, los países están optando por introducir tecnologías de desalinización de agua de manera creciente (Daus, 2019).

■ GRÁFICO 1

Extracciones de aguas subterráneas como porcentaje de la captación total de agua en empresas de ALC (diagrama de caja y bigotes)



Fuente: Aderasa - Sunass (2021), SACMEX (2022), SABESP (2021). Elaboración propia.

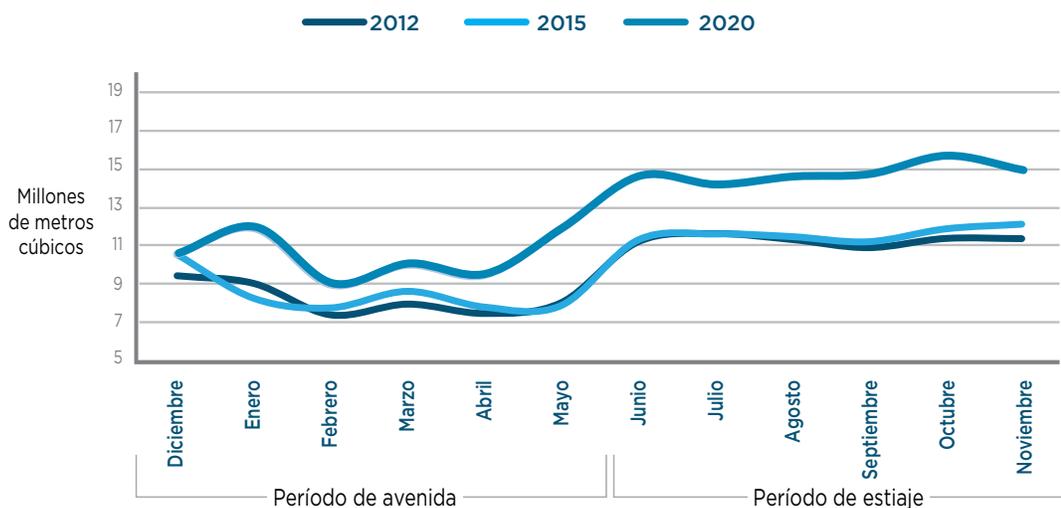
CAN: Países del Grupo Andino. CID: Países de Centroamérica, Haití, México, Panamá y República Dominicana. CSC: Países del Cono Sur.

⁷ De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2019), 38,7% del agua utilizada en todo el país proviene de fuentes subterráneas.

También debe considerarse que los porcentajes mostrados anteriormente corresponden a promedios anuales. Sin embargo, las aguas subterráneas suelen ganar más importancia en determinados meses del año. Para la producción de agua potable, las empresas proveedoras utilizan una combinación óptima de fuentes que toma en cuenta el año hidrológico. Este suele estar compuesto por un periodo de avenida y uno de estiaje. Durante el periodo de avenida se presentan precipitaciones que incrementan el caudal de los ríos (e incluso permiten almacenar agua en infraestructuras de represamiento); mientras que, en el periodo de estiaje, las precipitaciones se reducen considerablemente, originando la reducción de los caudales naturales en los ríos. En esta etapa del año hidrológico, las empresas de agua suelen utilizar con mayor intensidad las fuentes subterráneas, además de realizar la descarga del agua almacenada en infraestructura de represamiento, de ser el caso. El **Gráfico 2** muestra este patrón para Sedapal (Lima). Las extracciones de agua son menores para el periodo de avenida (diciembre – mayo), y se incrementan significativamente en el periodo de estiaje (junio – noviembre). El gráfico muestra además que el nivel de extracción en todos los meses del año hidrológico 2020 fue superior al de los años hidrológicos 2012 y 2015.

■ GRÁFICO 2

Extracciones de aguas subterráneas por periodos del año hidrológico en Lima Metropolitana



Fuente: Información enviada por Sedapal (2021b). Elaboración propia.

Finalmente, es importante mencionar que, en ámbitos rurales, las aguas subterráneas tienen un rol fundamental para lograr la meta de acceso universal a agua gestionada de forma segura estipulada por los ODS. En estos contextos, debido a la baja densidad de los centros poblados y la separación entre estos, la distribución de agua mediante redes no suele ser una solución costo-efectiva, pues no se pueden

aprovechar las economías de escala y densidad que existen en ámbitos urbanos. En este contexto, la distribución espacial de las aguas subterráneas permite optar por soluciones descentralizadas que aseguren el acceso de los hogares a una dotación de agua en condiciones seguras y a un costo asequible.

De otro lado, no debe perderse de vista que las aguas subterráneas se extienden más allá de las fronteras de un país, lo cual es un fenómeno común en la región y complejiza su gestión. Por ejemplo, según el Banco Mundial (2021), el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) tiene una extensión de más de 1,2 millones km², un volumen de 45.000 km³ y se extiende por los territorios de cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay; mientras que el Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño (SAYTT) constituye un reservorio transfronterizo compartido por los países de Argentina, Bolivia y Paraguay, cuya capacidad de almacenamiento y extracción aún requiere de investigación y análisis. Asimismo, en Centroamérica, existen 18 sistemas de acuíferos transfronterizos (GWP Centroamérica, 2017).

■ ILUSTRACIÓN 14

Recursos hídricos subterráneos transfronterizos



Fuente: Banco Mundial (2021).

3.

Instrumentos de política para la gestión de aguas subterráneas

- 3.1. Instrumentos para la gestión de la demanda
- 3.2. Instrumentos para la gestión de la oferta

Como se ha visto previamente, el estado de los acuíferos es el resultado de procesos de descarga y recarga, tanto naturales como ocasionados por el ser humano. Por tanto, a fin de gestionar los recursos hídricos subterráneos, es necesario adoptar medidas sobre el comportamiento de los usuarios y sobre los recursos del acuífero; es decir, la dimensión socioeconómica es tan importante como la hidrogeológica (Tuinhof et al., 2010).

De acuerdo con estos autores, cuando no existe suficiente restricción sobre la demanda de aguas subterráneas ni regulación del recurso, se genera un círculo vicioso en el que la sobreexplotación ocasiona una reducción de la disponibilidad de agua y la contaminación de los acuíferos. Esto compromete la seguridad hídrica e incrementa los costos de extracción, generando mayor insatisfacción en los usuarios (ver panel a de la **Ilustración 15**).

Esta situación puede corregirse y asegurar así la sostenibilidad de los acuíferos. Para ello, se deben combinar medidas de gestión y provisiones institucionales, introduciendo un marco para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas que permita la asignación de derechos, el incentivo al uso racional a través de instrumentos económicos y el involucramiento de los *stakeholders*, entre otros aspectos (ver panel b de la **Ilustración 15**).

■ ILUSTRACIÓN 15

Círculos vicioso y virtuoso en la gestión de los recursos hídricos subterráneos

a. Círculo vicioso en la gestión de los recursos hídricos subterráneos



b. Círculo virtuoso en la gestión de los recursos hídricos subterráneos



Fuente: Tuinhof et al. (2010). Traducción propia.

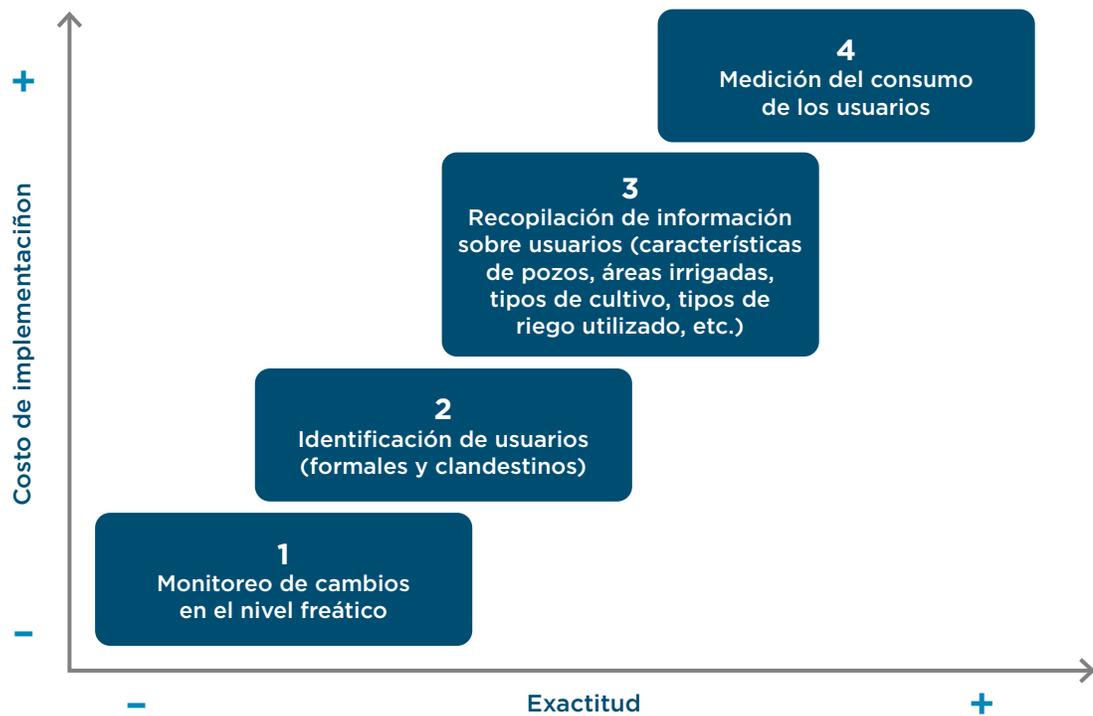
Un aspecto central para la gestión de las aguas subterráneas es contar con información que permita evaluar si las extracciones se están realizando a un ritmo sostenible. En muchos países, la información sobre usuarios, volúmenes extraídos y el nivel freático es escasa, e incluso inexistente. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), las limitaciones en la información de monitoreo de aguas subterráneas (incluyendo información de extracciones y procesos de recarga) restringen la comprensión de los impactos del cambio climático en las aguas subterráneas (Caretta et al., 2022). La información con la cual cuentan las autoridades puede organizarse en cuatro niveles (Montginoul et al., 2016), con grados de exactitud y costos de implementación crecientes (ver **Ilustración 16**).

En un primer nivel se encuentra la información que proviene del monitoreo del nivel freático. Esta información es fundamental para analizar la sostenibilidad del acuífero, pero utilizar sus variaciones en el tiempo como proxy de las extracciones no es óptimo. Puede ser de utilidad para la declaratoria de prohibiciones de extracción cuando se advierte un agotamiento en el acuífero. En un segundo nivel se encuentra la información de identificación de usuarios. Es fundamental que la autoridad sepa quienes extraen agua (de manera autorizada o clandestina), para lo cual se pueden

realizar empadronamientos o recurrir al auto reporte. En un tercer nivel, se puede relevar información sobre características de los usuarios. Esto incluye características de los pozos (potencia), el tipo de industria o, en el caso de usuarios agrarios, extensión de áreas irrigadas, tipos de cultivo, tipos de riego (por inundación, por aspersión, por goteo), entre otras. Finalmente, el cuarto nivel corresponde al nivel óptimo de información, en el cual, gracias a la instalación de medidores, la autoridad conoce el consumo de cada usuario y en cada periodo de tiempo.

■ ILUSTRACIÓN 16

Escalera con niveles de información relacionada al uso de aguas subterráneas



Fuente: Elaboración propia.

Los instrumentos de política para la gestión de las aguas subterráneas pueden clasificarse en dos: i) instrumentos para la gestión de la demanda y ii) instrumentos para la gestión de la oferta.

3.1. Instrumentos para la gestión de la demanda

Dentro del primer grupo de instrumentos consideramos aquellos que reconocen la importancia de la dimensión socioeconómica en el estado de los acuíferos, y que por tanto buscan reducir la presión extractiva a la que estos se ven sujetos. De acuerdo con Griffin (2006), las políticas que pueden implementarse desde el lado de la demanda para gestionar la escasez del agua son: i) racionamiento por precio; ii) racionamiento por cantidad y iii) políticas de desplazamiento de la demanda.

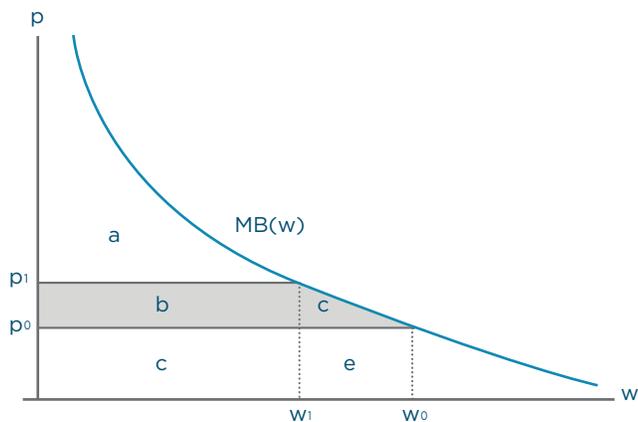
Las políticas de racionamiento por precio son aquellas que buscan introducir incentivos a la reducción en el consumo de agua mediante incrementos en los costos enfrentados por los usuarios. Las políticas de racionamiento por cantidad se implementan usualmente ante déficits de oferta, e incluyen un amplio espectro de medidas, tales como la prohibición de ciertos usos de agua o un tope máximo en el consumo mensual por usuario. También se incluyen aquí las restricciones o prohibiciones en la extracción de agua. Finalmente, las políticas de desplazamiento de la demanda buscan modificar el comportamiento de los usuarios e implican un movimiento de la curva de demanda, en lugar de un movimiento *a lo largo de* la curva de demanda. Por su naturaleza, los efectos de estas políticas suelen verse en el mediano o largo plazo, e incluyen medidas tales como el fomento de hábitos ahorradores de agua en los usuarios y la adopción de tecnologías eficientes en el uso de agua en la industria y la agricultura.

En la **Ilustración 17** se representa el efecto en el bienestar de los distintos tipos de política de gestión de la demanda, donde las áreas sombreadas corresponden a las pérdidas en el excedente del consumidor.

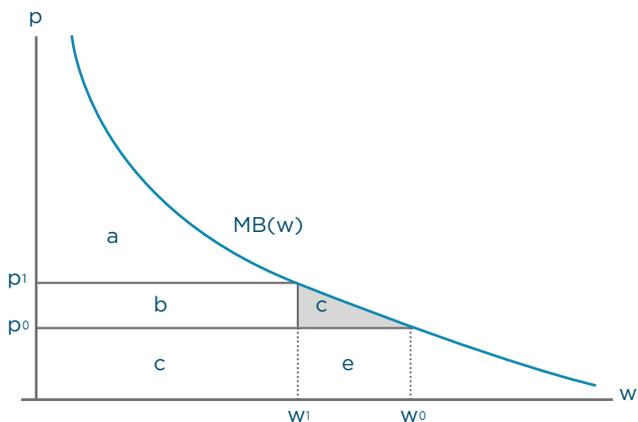
■ ILUSTRACIÓN 17

Efectos en el bienestar de políticas de gestión de la demanda

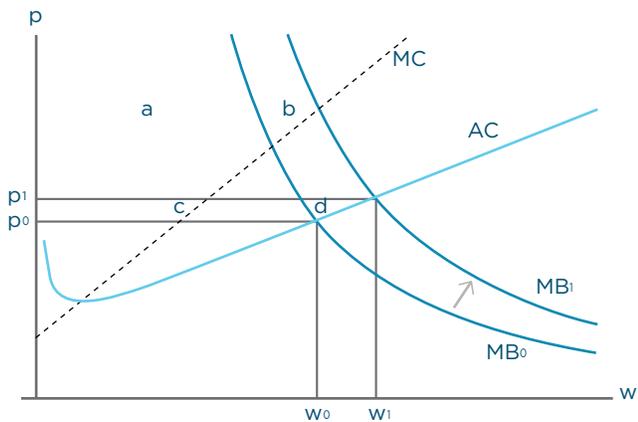
a. Efecto en el bienestar de política de racionamiento por precio



b. Efecto en el bienestar de política de racionamiento por cantidad



b. Efecto en el bienestar de política de desplazamiento de la demanda



Fuente: Griffin (2006).

3.1.1. Instrumentos de racionamiento por precio

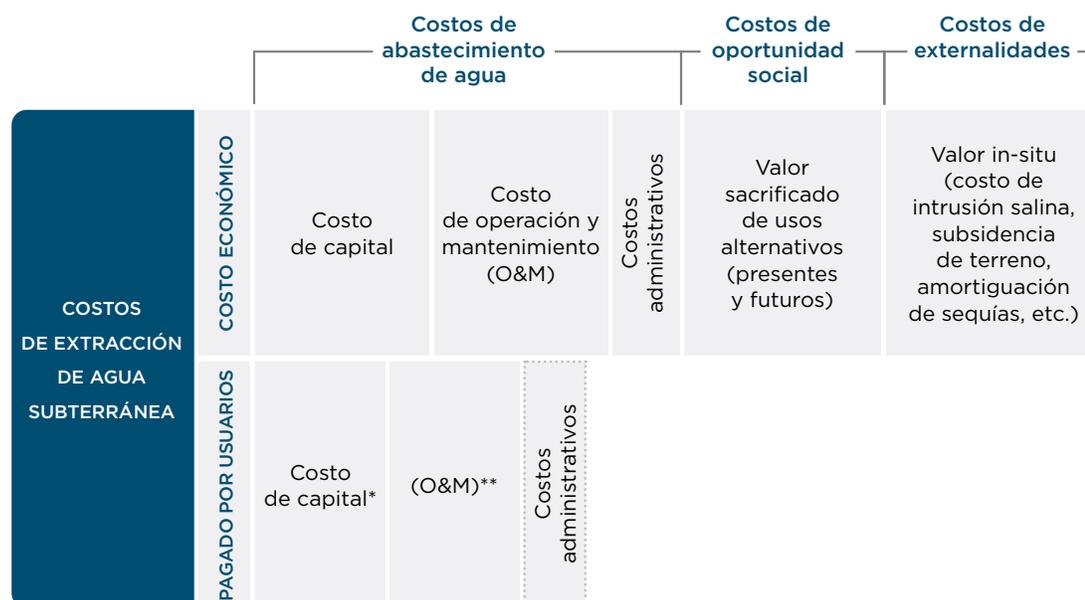
Bajo el concepto de instrumentos económicos, encontramos aquellas “medidas cuyo fin es aplicar incentivos y mecanismos de mercado a problemas relacionados con el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales” (Ortega, 2006). Estos instrumentos son diseñados y aplicados con el objetivo de adaptar las decisiones individuales a objetivos acordados de manera colectiva (Delacámara et al., 2013). El rango de instrumentos económicos es amplio⁸; sin embargo, en el contexto de las aguas subterráneas urbanas, un tipo importante de instrumento económico es el establecimiento de precios. Estos idealmente deben permitir que los agentes privados incorporen, además de los costos privados, los costos que se imponen a la sociedad en su conjunto por el consumo del recurso.

En el ámbito de las aguas subterráneas, los usuarios suelen pagar solo una fracción de los costos de capital y de operación y mantenimiento y parte de los costos administrativos. Sin embargo, esto no permite recuperar la totalidad del costo económico que incluye, además, el costo de oportunidad por los usos sacrificados en el presente y el futuro, así como las externalidades negativas que se producen por efecto de la extracción, tales como la intrusión salina o la subsidencia del terreno (ver **Ilustración 18**). De acuerdo con Burnett et al. (2015), cuando un recurso causa externalidades, su costo de oportunidad marginal tiene tres componentes: el costo marginal de extracción (c en el modelo de extracción óptima desarrollado en la **sección 1.3**), el costo marginal para el usuario (e. g. el efecto en futuros costos de extracción) y el costo marginal de la externalidad (e.g. la contaminación).

⁸ Delacámara et al. (2013) distinguen cuatro tipos de instrumentos económicos para la gestión del agua: i) mecanismos de fijación de precios (tarifas, tasas, impuestos, subvenciones); ii) intercambio de derechos o autorizaciones, iii) mecanismos de cooperación basados en la adopción voluntaria de nuevas prácticas y, iv) mecanismos basados en el riesgo.

■ ILUSTRACIÓN 18

Costo económico del uso de agua subterránea



*Algunas veces el crédito se encuentra subsidiado.

** El costo de la energía eléctrica a menudo se encuentra subsidiado.

Fuente: Kemper et al. (2010). Traducción propia.

Una ventaja adicional de la introducción de instrumentos económicos, además de su potencial para desincentivar comportamientos depredadores por parte de los agentes, es que permite recaudar recursos financieros que pueden invertirse en el desarrollo de infraestructura, el desarrollo científico y tecnológico y el mejoramiento de la gestión del recurso. No debe perderse de vista que un resultado colateral de la introducción de estos instrumentos es el perfeccionamiento administrativo, pues crea la necesidad de mantener sistemas de información actualizados sobre los usos y volúmenes de extracción por parte de los diferentes agentes (Ortega, 2006).

En el contexto de las aguas subterráneas urbanas⁹, la demanda puede gestionarse modificando el costo de extracción del recurso: ya sea directamente mediante la

⁹ De acuerdo con Kemper et al. (2010), existen dos categorías de instrumentos económicos aplicables a las aguas subterráneas. La primera incluye a aquellos que modifican el costo de extraer aguas subterráneas, mientras que la segunda corresponde a incentivos económicos positivos. Dentro de este último se encuentran modificaciones en las políticas de agricultura y comercio de alimentos y el subsidio para incentivar tecnologías eficientes de irrigación. Como se mencionó en la introducción, esta monografía se centra en las aguas subterráneas urbanas y su potencial para abastecer las demandas residenciales e industriales (es decir, excluyendo usos agrarios), por lo cual no se aborda la utilización de mercados de aguas (subterráneas) para la asignación del recurso entre distintos usos, mientras que los instrumentos de la categoría de incentivos económicos positivos serán mencionados en la sección de instrumentos de desplazamiento de la demanda. Puede consultarse Delacámara et al. (2013) para un revisión exhaustiva de los instrumentos económicos para la gestión del agua.

modificación de los cargos cobrados por su extracción, o de manera indirecta a través de las tarifas de energía eléctrica (Kemper et al., 2010).

Como se vio en el modelo teórico de extracción óptima (ver **sección 1.3**), existe una relación directa entre el stock del acuífero y el costo volumétrico de extraer aguas subterráneas. Es decir, al incrementarse el pago que el usuario debe hacer, se reducen sus incentivos a la extracción, por lo cual se contribuye a la sostenibilidad del acuífero. Idealmente estos costos deberían aplicarse a un volumen medido, en lugar de un volumen declarado por el usuario; sin embargo, los países no suelen contar con información del consumo medido de los usuarios de aguas subterráneas. Una alternativa es utilizar información del consumo de energía eléctrica para aproximar el volumen extraído por el usuario (Kemper et al., 2010).

Los costos de energía eléctrica —que en el modelo de extracción óptima forman parte del costo volumétrico de extracción— también inciden en los incentivos al uso del recurso. Por tanto, es necesario notar que muchas veces los subsidios en las tarifas eléctricas abaratan los costos de extracción. Esto contribuye a ejercer presión sobre los acuíferos, reduciendo la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo.

3.1.2. Instrumentos de racionamiento por cantidad

El racionamiento por cantidad puede implementarse de distintas formas. Una de ellas es el establecimiento de un tope máximo al consumo por usuario (cuotas). En este tipo de medidas (tanto en aguas subterráneas urbanas como en aquellas utilizadas para riego), la instalación de medidores es fundamental. Cuando estos existen, la autoridad puede conocer el consumo efectivo de los usuarios, e imponer sanciones en caso se exceda el nivel máximo autorizado. Sin embargo, en muchos países, el sistema de licencias de extracción funciona todavía sobre la base de declaraciones juradas o valores reportados por los propios usuarios. En estos casos, la autoridad no tiene forma de supervisar el cumplimiento del consumo máximo por parte de los usuarios, lo cual limita seriamente la efectividad de este tipo de esquemas. La experiencia de China brinda evidencia preliminar sobre las diferencias entre los sistemas de cuotas y precios escalonados, aunque deben tenerse en cuenta el contexto sociopolítico y el diseño de cada mecanismo en la interpretación de los resultados (ver **Recuadro 4**).

Otras medidas de racionamiento por cantidad, que son ampliamente utilizadas en aguas subterráneas urbanas, incluyen la paralización temporal de la extracción,

para permitir que el nivel del acuífero se recupere y la revocatoria de licencias de extracción o la prohibición de extracción, que es común cuando se declara en emergencia un acuífero debido a que se ha identificado un ritmo insostenible en su explotación. Para ello, las autoridades competentes analizan la situación de los distintos acuíferos y establecen zonas de veda o restricción (ver **sección. 4.3** para la experiencia reciente en Chile).

RECUADRO 4

La experiencia de China con racionamientos por precio, cuotas y la innovación mediante tarjetas inteligentes

De acuerdo con lo establecido en la Ley de Aguas en China, las autoridades locales deben regular el uso del agua subterránea en aquellas regiones con acuíferos sobreexplotados. Aarnoudse y Bluemling (2017) documentan la experiencia de dos casos: los condados de Minqin y Guazhou (provincia de Gansu), en el noroeste de China. En ambos casos, se instalaron máquinas de tarjetas inteligentes en los pozos de los agricultores a fin de controlar el volumen extraído de agua subterránea. Estas máquinas permiten a los agricultores utilizar la tarjeta magnética para encender la bomba, mientras que la información del volumen extraído es registrada por el medidor y guardada en la tarjeta y la máquina. El agricultor puede encender o apagar la bomba mientras la tarjeta cuente con crédito. Cuando éste se agota, la conexión eléctrica se interrumpe automáticamente, y el bombeo no puede reanudarse hasta que cuenta nuevamente con crédito disponible.

■ ILUSTRACIÓN 19

Máquina de tarjeta inteligente instalada en una estación de bombeo en China



Fuente: Aarnoudse y Bluemling (2017). Créditos: E. Aarnoudse.

La instalación de estas máquinas vino acompañada con un mecanismo de regulación distinto en cada condado. En Minqin, las autoridades optaron por un sistema de cuotas, en el cual se asigna a cada usuario un nivel máximo de extracción de agua; mientras que, en Guazhou, las autoridades optaron por un sistema de precios crecientes que teóricamente debe incentivar la extracción racional del recurso. Aarnoudse y Bluemling (2017) señalan que la elección del tipo de mecanismo y su diseño puede estar explicado por el contexto socio-político (el gobierno central intervino en el caso de Minqin, presionándolos para alcanzar metas de reducción de extracciones en ese condado, mientras que en el caso de Guazhou no existió esa presión).

Los autores rescatan algunas lecciones importantes. La primera es que la regulación por cuotas (no transables) en Minqin, restringió fuertemente la libertad de los agricultores y, en ese sentido, fue efectiva y permitió alcanzar la meta de menor extracción de agua subterránea. Una segunda es que los cultivos intensivos en agua son más extendidos en Guazhou que en Minqin, debido a que los agricultores perciben una menor restricción bajo el sistema de precios escalonados. En la interpretación de este último resultado, es importante considerar los detalles del diseño tarifario. Según los autores, aunque ha existido un incremento en el pago que hacen los agricultores en Guazhou, el nivel tarifario parece no ser lo suficientemente alto como para incentivar un cambio en el comportamiento. Asimismo, el sistema de precios escalonados pierde eficacia en este condado, debido a que el consumo es facturado a nivel de grupo agrícola y no de usuario individual, con lo cual se pierden los incentivos individuales a reducir el consumo de aguas subterráneas.

3.1.3. Instrumentos de desplazamiento de la demanda

Las políticas de desplazamiento de la demanda buscan modificar el comportamiento de los usuarios e implican un movimiento de la curva de demanda, en lugar de un movimiento *a lo largo de* la curva de demanda. Pueden entenderse como políticas que buscan incrementar la eficiencia en el uso del recurso (i.e. reducir el despilfarro en el caso del agua potable o producir lo mismo con menos utilización de agua en el caso de la agricultura). Son políticas cuya implementación y resultados pueden tomar tiempo, por lo cual es esperable que sus efectos se vean en el mediano y largo

plazo. Aquí se encuentran las campañas educativas y el fomento de tecnologías ahorradoras de agua en hogares, comercios e industrias. Un ejemplo es el conjunto de medidas implementadas en Australia, en el contexto de la Sequía del Milenio, donde el sector público promovió reembolsos y programas de recambio de aparatos para usuarios domésticos y pequeños negocios, así como programas educativos en colegios y campañas mediáticas incentivando el uso racional del agua (Low et al., 2015)¹⁰.

Aunque escape al alcance de este documento, es importante resaltar la importancia de establecer este tipo de medidas en agricultura. De acuerdo con el IPCC, la agricultura y el riego representan la proporción más importante del consumo de agua a nivel mundial: entre 60% y 70% de las extracciones totales (Caretta et al., 2022). Algunas medidas que los países pueden evaluar —pero que requieren un elevado nivel de coordinación— son la reubicación de cultivos de zonas semi-áridas a húmedas, o el cambio a cultivos menos intensivos en agua, particularmente en épocas de sequía, (Scanlon et al., 2023).

Otras medidas como promover la eficiencia en el riego —pasando de esquemas de riego por inundación a riego por goteo o aspersores— no solo incrementan la eficiencia, sino que pueden reducir el impacto en la calidad del agua ocasionado por la escorrentía agrícola (Scanlon et al., 2023). Sin embargo, las autoridades deben tener en cuenta que este tipo de medidas puede tener efectos colaterales, por lo cual su aplicación no es tan simple. Por ejemplo, el aumento de la eficiencia del riego puede terminar causando una expansión de las zonas de regadío y un incremento neto del consumo de agua al nivel de cuenca o de acuífero (Scanlon et al., 2023)¹¹.

¹⁰ Las medidas implementadas incluían reembolsos y programas de recambio para usuarios domésticos (duchas, lavadoras, inodoros) y pequeños negocios (tecnología ahorradora de agua). Las empresas de gran consumo debían contar con un plan de acción de manejo de agua, con metas de conservación y reporte anual. Se lanzó un programa dirigido a la educación en colegios y la campaña de conservación del agua T155, que buscaba incentivar el uso por persona de 155 litros, entre otras políticas (Low et al., 2015).

¹¹ Scanlon et al. (2023) comparan esto con la paradoja de Jevons (i.e. aumentar la eficiencia disminuye el consumo individual de un recurso, pero puede generar una expansión en el uso de la tecnología lo cual termina incrementando el consumo agregado del recurso).

3.2. Instrumentos para la gestión de la oferta¹²

Dentro de los instrumentos para la gestión de la oferta encontramos a aquellas intervenciones que inciden en el componente hidrogeológico de los acuíferos, incrementando la disponibilidad de aguas subterráneas. Algunas intervenciones recargan de manera directa los acuíferos en las partes altas y medias de la cuenca. Estas corresponden a inversiones y actividades, a mediana y gran escala, cuyo objetivo es incrementar la recarga natural del acuífero o recargarlo de manera artificial (e.g. conservando o recuperando humedales o inyectando aguas en el subsuelo). De otro lado, se encuentran aquellas intervenciones que no tienen como objetivo principal recargar los acuíferos, pero generan una externalidad positiva, contribuyendo a su recarga de manera colateral. Dentro de este último grupo encontramos a la infraestructura verde urbana y aquellas obras de trasvase o sustitución de fuentes realizadas por los operadores de agua, entre otros.

3.2.1. Inversiones de recarga del acuífero

La disponibilidad de agua en los acuíferos urbanos es producto de un complejo proceso de recarga y descarga que inicia en las partes altas de la cuenca. Por este motivo, las acciones destinadas a la conservación y restauración de los ecosistemas han empezado a generar un interés creciente. Se conoce como Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) a aquellas acciones para “proteger, gestionar de manera sostenible y restaurar ecosistemas naturales o modificados (...), proporcionando simultáneamente beneficios para el bienestar humano y la biodiversidad” (Cohen-Shacham et al., 2016). Cada vez es más reconocido que las ciudades se benefician de este tipo de intervenciones, con un gran potencial en la reducción del riesgo de inundaciones y de deslizamientos de tierra, así como en la provisión de agua (Oliver et al., 2021),

¹² La gestión de la oferta de las aguas subterráneas debe considerar también la disponibilidad de fuentes superficiales. Esta consideración conjunta en el planeamiento permite optimizar la oferta de agua y, de esta forma, determinar una combinación productiva en función de los costos y la disponibilidad temporal y geográfica de las fuentes. Esto forma parte de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), definida como el proceso que promueve el desarrollo y gestión coordinados del agua, tierras y recursos relacionados, con el objetivo de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa y sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas (GWP, 2000). En este contexto, los acuíferos tienen un rol fundamental, pues pueden utilizarse como reservas estratégicas para cubrir la demanda en momentos de sequía y escasez o incluso almacenar agua depurándola naturalmente (Arrabal y Álvarez, 2019).

cuyo costo en áreas urbanas puede reducirse (Scanlon et al., 2023)¹³. En San Antonio, Texas, EE. UU., se realizan acciones que permiten proteger las zonas de recarga de los acuíferos, financiadas por un impuesto sobre las ventas de 1/8 de centavo que fue aprobado electoralmente por sus ciudadanos (McDonald y Shemie, 2014).

Las SbN son un término amplio que comprende aquellas intervenciones que se apoyan en la naturaleza para proveer servicios y aumentar la resiliencia, incluyendo soluciones no basadas en infraestructura (como la gestión basada en los ecosistemas), y proyectos de inversión en infraestructura natural y verde (TNC, 2019). La inversión en infraestructura natural corresponde a proyectos que incorporan paisajes naturales existentes o restaurados (e.g. humedales y bosques), gestionándolos de manera estratégica para proporcionar una serie de beneficios. Por su parte, la inversión en infraestructura verde se refiere a proyectos diseñados y construidos en zonas urbanas que, combinados con infraestructura gris, crean sistemas híbridos con una mejor resiliencia a los impactos climáticos.

Existe evidencia en la región que documenta el grado de efectividad de intervenciones en las partes altas de la cuenca sobre la infiltración de agua. Estas intervenciones incluyen acciones en pajonales altoandinos (Mosquera et al., 2022), zanjas de infiltración¹⁴ (Locatelli et al., 2020) y la construcción de terrazas o andenes (Willems et al., 2021), entre otras.

En zonas medias y bajas de la cuenca, también pueden realizarse intervenciones que contribuyen a la recarga de los acuíferos. De acuerdo con WWAP - Unesco (2018), el almacenamiento subterráneo puede mejorarse a través de proyectos de recarga o inyección que, al construir infraestructura o modificar el paisaje, permiten mejorar la recarga natural del acuífero contribuyendo a aumentar la seguridad hídrica. Estas técnicas, conocidas colectivamente como Gestión de la Recarga Artificial de los Acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés), también contribuyen a reponer acuíferos agotados, mejorar la calidad del agua y mejorar la calidad del suelo, entre otros beneficios. De acuerdo con Clifton et al. (2010), la MAR es una de las oportunidades de adaptación más importantes para los países en desarrollo que tratan de reducir su vulnerabilidad al cambio climático y a la variabilidad hidrológica. En la **Tabla 3** se presentan las clasificaciones de MAR, por técnica y método específico. El **Anexo 3** incluye una representación gráfica de los principales métodos específicos de MAR.

¹³ En el caso de Nueva York, mantener la forestación en las partes altas de la cuenca (aproximadamente 75% de los terrenos) permitirá a la ciudad evitar la construcción de una planta de tratamiento que costaría entre 8 mil y 10 mil millones de dólares (Scanlon et al., 2023).

¹⁴ De acuerdo con los autores existe una brecha de conocimiento debido a que existen muy pocos estudios que permitan evaluar el efecto de este tipo de intervenciones en las tasas de infiltración de agua en los suelos. Sin embargo, se encuentra que reducen significativamente la escorrentía y las pérdidas de suelo por erosión y degradación.

■ TABLA 4

Clasificación de técnicas de gestión de recarga artificial de acuíferos (MAR)

TIPO DE TÉCNICA	TÉCNICA MAR	MÉTODO ESPECÍFICO
Técnicas que principalmente infiltran el agua	Métodos de distribución	Lagunas y estanques de infiltración
		Inundación controlada
		Zanjas, surcos y canales
		Recarga incidental por riego
	Filtración inducida	Filtración de orillas de ríos y lagos
		Filtración interdunar
	Pozos, túneles y perforaciones	Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR) / Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR)
		Pozo poco profundo / eje / fosa de infiltración
Técnicas que principalmente interceptan el agua	Modificaciones en el cauce	Estanques de percolación
		Represas subsuperficiales
		Represas de arena
		Dispersión de cauces
	Cosecha de escorrentía	Cosecha de aguas de lluvia en tejados
		Barreras, diques y zanjas

Fuente: Elaborado en base a González et al. (2015) y Bonilla et al. (2018).

■ ILUSTRACIÓN 20

Proyecto de recarga artificial en el río Rímac (Lima, Perú)



Fuente: Sunass (2021).

En un inventario de proyectos MAR en América Latina y el Caribe, Bonilla et al. (2018) identificaron 144 proyectos: en Argentina (8), Bolivia (3), Brasil (89), Chile (9), Colombia (5), Costa Rica (2), Cuba (6), México (19) y Perú (3). Estos se encuentran recogidos en la Ilustración 21, según el tipo de MAR y el nivel de escasez de agua en la región¹⁵.

¹⁵ El nivel de escasez de agua en la región presentado por los autores puede encontrarse desactualizado, considerando las fechas de las fuentes utilizadas. Para una referencia más actualizada, se sugiere revisar Libra et al. (2022).

■ ILUSTRACIÓN 21

Distribución de tipos de MAR y escasez de agua en la región

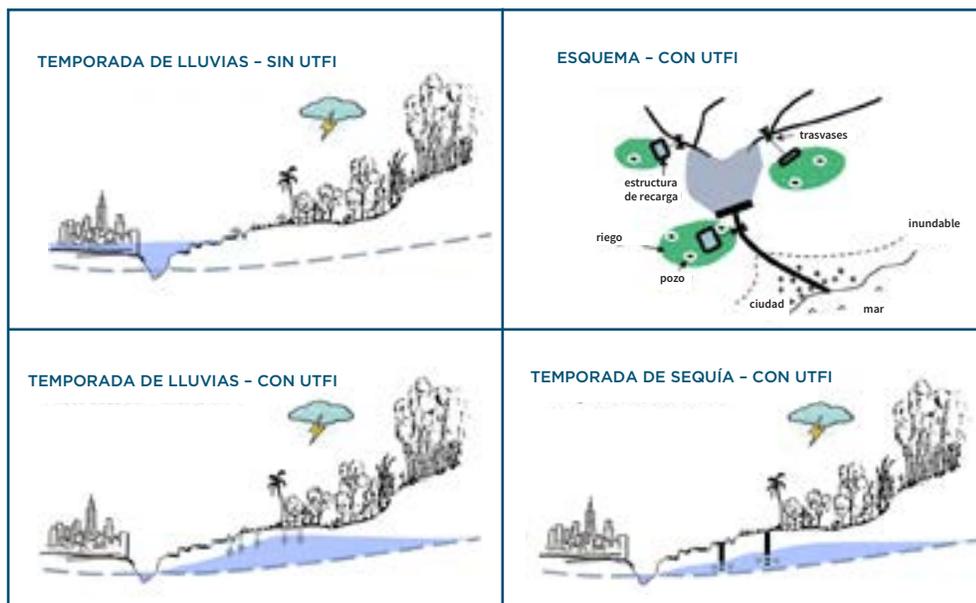


Fuente: Bonilla et al. (2018). Traducción propia.

Un tipo particular de MAR es la domesticación subterránea de inundaciones para el riego, la cual es de particular interés para países afectados por fenómenos climatológicos extremos y desastres en el contexto del cambio climático. Esta técnica permite que, a gran escala, se almacenen caudales en el periodo de lluvias, reduciendo la vulnerabilidad de la población ante inundaciones, para su posterior utilización en periodos de sequías, tanto para el consumo humano como para el riego de áreas agrícolas (ver **Ilustración 22**).

■ ILUSTRACIÓN 22

Esquema de funcionamiento de la domesticación subterránea de inundaciones para el riego



Nota: UTFI: Underground Taming of Floods for Irrigation.

Fuente: WWAP - Unesco (2018).

3.2.2. Infraestructura Verde Urbana

Los acuíferos se nutren de la infiltración de aguas de lluvia y fuentes superficiales. El diseño urbano juega un rol importante en la disponibilidad de aguas subterráneas, pues puede incrementar o disminuir la permeabilidad del suelo en las ciudades.

Ante esta realidad, debe tenerse en cuenta la contribución que hace la Infraestructura Verde Urbana (IVU) —entendida como aquella red de naturaleza, áreas semi-naturales y espacios verdes que brinda servicios ecosistémicos, que sustentan el bienestar humano y la calidad de vida (European Environment Agency, 2019). En la actualidad, existe una serie de soluciones verdes de infraestructura que, si se incorporan a la planificación urbana, pueden contribuir a la recarga de los acuíferos, entre otros servicios ecosistémicos que también proveen (para mayor detalle ver Castro Lancharro, 2021a).

- **Espacios verdes, parques, jardines y corredores verdes:** Superficies donde se plantan árboles, arbustos y herbáceas, dentro de las ciudades o en sus alrededores.

- **Jardines de lluvia, parques de inundación y biorretenedores:** Depresiones de terrenos donde se planta vegetación. En el caso de los biorretenedores, estos permiten el tratamiento natural del agua de lluvia antes de su infiltración.
- **Parterres verdes:** Canales poco profundos, anchos y con vegetación, que almacenan, transmiten y depuran el agua de lluvia de manera natural.
- **Parques de ribera de ríos urbanos:** Espacios verdes ubicados en las zonas de inundación naturales de los ríos en zonas urbanizadas que permiten la absorción del exceso de agua en caso de un desbordamiento, reduciendo el riesgo de inundaciones.

En muchos casos, estas soluciones amortiguan la velocidad de la escorrentía, lo cual favorece la recarga de los acuíferos. Adicionalmente, muchas de estas soluciones de diseño urbano se suelen combinar con pavimentos permeables o pavimentos inteligentes, que permiten el filtrado de la escorrentía (Castro Lancharro, 2021b).

■ ILUSTRACIÓN 23

Parque botánico del Río Medellín



Fuente: <https://arquine.com/obra/parque-botanico-rio-medellin/>.
Revisado el 22/12/2022.

Un fenómeno parecido puede suceder a nivel de los hogares, pues en ciudades con lluvias intensas, la infiltración de agua en el subsuelo puede verse favorecida por la adecuación de la infraestructura en predios y viviendas. El ejemplo de un sistema de cargos por drenaje pluvial y descuentos en el Reino Unido es un caso que merece ser estudiado y que puede revisarse en el **Recuadro 5**.

RECUADRO 5**Los cargos por drenaje pluvial pueden contribuir a la infiltración**

La ocurrencia de lluvias suele ser más usual en determinadas ciudades y la falta de una gestión adecuada puede ocasionar problemas en la transitabilidad de las vías e incluso inundaciones que afectan a la población. El diseño óptimo en estas ciudades debe incluir un sistema de drenaje pluvial que permita la recolección de las aguas, su conducción y, finalmente, el vertimiento o reinfiltración.

No existe un modelo único para la administración de estos sistemas. En algunos casos, el drenaje pluvial es administrado por las empresas de agua, en otros casos directamente por los municipios y en otros por áreas o entidades municipales creadas específicamente para tal fin. Del mismo modo, el fondeo puede provenir de impuestos o del establecimiento de tarifas o cargos (que incluyen cargos fijos, tarifas que dependen del consumo de agua o el tipo de usuario, entre otros).

Bajo un principio de eficiencia, tiene sentido que el servicio sea pagado por todos aquellos que lo utilizan, y que quienes más se beneficien de él paguen más por él. Por ello, en 2003, el regulador de agua y saneamiento de Inglaterra y Gales - OFWAT recomendó que el drenaje pluvial deje de cobrarse en función del valor catastral, debido a que este no era un buen indicador de la cantidad de agua de lluvia que determinado predio imponía al sistema de drenaje (OFWAT, 2022a). En su lugar, el regulador propuso que se realice un cobro en función del área del predio, ya que esta variable recoge mejor la escorrentía que posteriormente termina en las redes colectoras y, por tanto, el costo que un usuario impone en el sistema.

Sin embargo, este sistema se ha refinado más aun al introducir un sistema de descuentos (*rebates*), mediante el cual los usuarios pueden solicitar realizar un pago menor acreditando que parte o la totalidad de las aguas de lluvia que caen sobre su propiedad no terminan en las redes colectoras públicas (OFWAT, 2022b). Esto sucede, por ejemplo, por la posesión de áreas verdes que reinfiltran de manera natural la escorrentía (ver **Ilustración 24**).

3.2.3. Otras inversiones a cargo de los operadores de agua

Algunas de las inversiones que los operadores de agua ejecutan con el objetivo de incrementar la cobertura o mejorar la calidad del servicio de agua potable también pueden contribuir a incrementar la recarga o recuperación del nivel de los acuíferos.

La ejecución de trasvases de agua, por ejemplo, incrementa la disponibilidad de agua en la cuenca y, por lo tanto, la cantidad de agua que terminará infiltrándose de manera natural. Asimismo, en muchos países, a fin de reducir el estrés extractivo en los acuíferos y permitir su recuperación gradual, los operadores invierten en fuentes de captación superficial. Esto incluye a los propios trasvases, pero también a las inversiones en captación para el tratamiento de aguas de ríos y a la ejecución de plantas desaladoras de agua de mar (ver **Ilustración 25**). Este proceso de sustitución de fuentes también contribuye a la recuperación del nivel de los acuíferos.

■ ILUSTRACIÓN 25

Planta desaladora de agua de mar en Atacama, Chile



Fuente: Gobierno de Chile – Sistema de Empresas (SEP).

4.

Casos de estudio en ALC

- 4.1.** Perú: Tarifa por monitoreo y gestión de aguas subterráneas
- 4.2.** Costa Rica: Canon de aprovechamiento del agua
- 4.3.** Chile: Declaratoria de zonas de restricción y prohibición
- 4.4.** Chile: Plan de resiliencia del servicio de agua potable en Santiago

Los recursos hídricos subterráneos son de mucha relevancia para la prestación de los servicios de saneamiento en muchos países de la región. Como se vio en el capítulo 2, existen ciudades que incluso realizan la totalidad de la provisión del servicio de agua potable utilizando las aguas subterráneas como insumo. En el presente capítulo, se reseñan algunas experiencias de políticas implementadas en la región en el ámbito de las aguas subterráneas. Entre estas experiencias se encuentran la implementación de un régimen especial de aguas subterráneas en Perú, donde el organismo regulador estableció las tarifas a ser pagadas por los usuarios que extrajeran aguas del subsuelo con fines no agrarios. También se reseña el caso de Costa Rica, donde se aprobó la reforma del canon de aprovechamiento de agua, a fin de incorporar un componente de pago por servicio ambiental hídrico para financiar costos de protección, conservación y restauración de las áreas de recarga y fragilidad hídrica. El capítulo también incluye dos experiencias en Chile: la declaratoria de zonas de restricción y prohibición en acuíferos a nivel nacional, luego de un análisis elaborado por la Dirección General de Aguas de dicho país, y la puesta en marcha de un Plan de Resiliencia implementado por la empresa Aguas Andinas, que le ha permitido incrementar sus horas de autonomía ante shocks climáticos.

4.1. Perú: Tarifa por monitoreo y gestión de aguas subterráneas

El ordenamiento jurídico peruano contempla los pagos que deben realizar aquellas personas naturales o jurídicas que están habilitadas para el uso del agua. En particular, en el caso de las aguas subterráneas¹⁶, estos usuarios deben efectuar el pago por dos conceptos que tienen naturaleza distinta: i) el pago de una retribución económica por el uso del agua y ii) la tarifa por monitoreo y gestión de aguas subterráneas. En el caso de la retribución, esta es una contraprestación por el uso del agua como bien público; mientras que la tarifa responde a un servicio que reciben los usuarios que se benefician del monitoreo y gestión del recurso hídrico subterráneo (Sunass, 2017).

En 2015, el Gobierno del Perú creó el Régimen Especial de Monitoreo y Gestión de Aguas Subterráneas a cargo de las Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS)¹⁷. En este nuevo régimen, la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass) recibió la función de establecer una metodología

¹⁶ Ver Ley de Recursos Hídricos (artículos 90 y 91) y su Reglamento (artículos 170-179 y 189).

¹⁷ Mediante Decreto Legislativo N° 1185, publicado el 16 de agosto de 2015.

y posteriormente calcular la tarifa que las empresas de agua cobrarán a los usuarios que extraen agua del acuífero por el servicio de monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas (SMGUAS). Cabe mencionar que el alcance de esta norma incluyó únicamente a usuarios no agrarios que se encuentran en el ámbito de responsabilidad de una EPS. Asimismo, inicialmente resultó aplicable para las empresas de las regiones de Lima Metropolitana (Sedapal) y La Libertad (Sedalib), donde los acuíferos estaban reservados a favor de dichas empresas, en virtud de normas legales previamente aprobadas. Sin embargo, el régimen contempla que puede ser aplicable para otras EPS que obtengan posteriormente un título habilitante como operador del SMGUAS otorgado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA).

En virtud de este régimen especial, las EPS se encuentran facultadas para ejecutar inversiones cuyo objetivo sea conservar o incrementar la disponibilidad hídrica subterránea, lo cual incluye inversiones de recarga natural y artificial del acuífero. También deben realizar estudios e implementar un sistema de monitoreo que incluya la lectura de niveles freáticos, operación y mantenimiento de los sistemas de medición y monitoreo de los caudales de explotación de los pozos, entre otros (Decreto Legislativo N° 1185).

En ese contexto, resulta importante definir cuál es el servicio que prestan las EPS a los usuarios que extraen agua subterránea. El SMGUAS tiene dos componentes (Sunass, 2017):

- i) El componente de monitoreo de aguas subterráneas: Que incluye aquellas actividades e inversiones destinadas a la observación, medición y diagnóstico de la calidad y cantidad del recurso hídrico subterráneo.
- ii) El componente de gestión de uso de aguas subterráneas: Que incluye aquellas actividades e inversiones que mejoran o incrementan la disponibilidad hídrica subterránea. En algunos casos, estas son realizadas como parte de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento, pero tienen una externalidad positiva en los acuíferos (que debe ser remunerada) y, en otros casos, estas son actividades e inversiones que son llevadas a cabo explícitamente para recuperar o preservar los acuíferos.

La Sunass aprobó la metodología, principios y criterios para la determinación de la tarifa del SMGUAS (ver **Ilustración 26**). Un primer criterio considerado es el de seguridad en la prestación de los servicios de saneamiento. Esto significa que, considerando que el abastecimiento poblacional es la primera prioridad, la tarifa debe contribuir a que la EPS cuente con aguas subterráneas en cantidad y calidad suficientes. El segundo criterio es el de sostenibilidad de la puesta a disposición del recurso hídrico subterráneo, que se traduce en que las tarifas cobradas deben

permitirle a las EPS recuperar la totalidad de costos en los que incurren para prestar el SMGUAS. Es decir, se incluirán tanto aquellas actividades e inversiones destinadas a favorecer o aumentar la infiltración de agua, como aquellas que reduzcan la presión extractiva en el acuífero (tales como la explotación de fuentes alternativas de agua). El tercer criterio es el de costo de oportunidad para los usuarios de no contar con disponibilidad hídrica. Como se ha mencionado previamente, el costo económico de la extracción también incluye un valor sacrificado de usos alternativos presentes y futuros. En el caso de la normativa peruana, esta establece que el cálculo tarifario debe utilizar como límite máximo el costo en que incurrirían los usuarios si la EPS no realizara acciones e inversiones para la puesta a disposición de las aguas subterráneas. Finalmente, el criterio de disponibilidad a pagar permite que el establecimiento de la tarifa considere la valoración que el usuario tiene de la extracción de agua subterránea, la cual depende del beneficio que obtiene y de la capacidad de sustitución de este recurso por otras alternativas (Sunass, 2016).

■ ILUSTRACIÓN 26

Principios y criterios técnico-económicos aplicables al cálculo de la tarifa

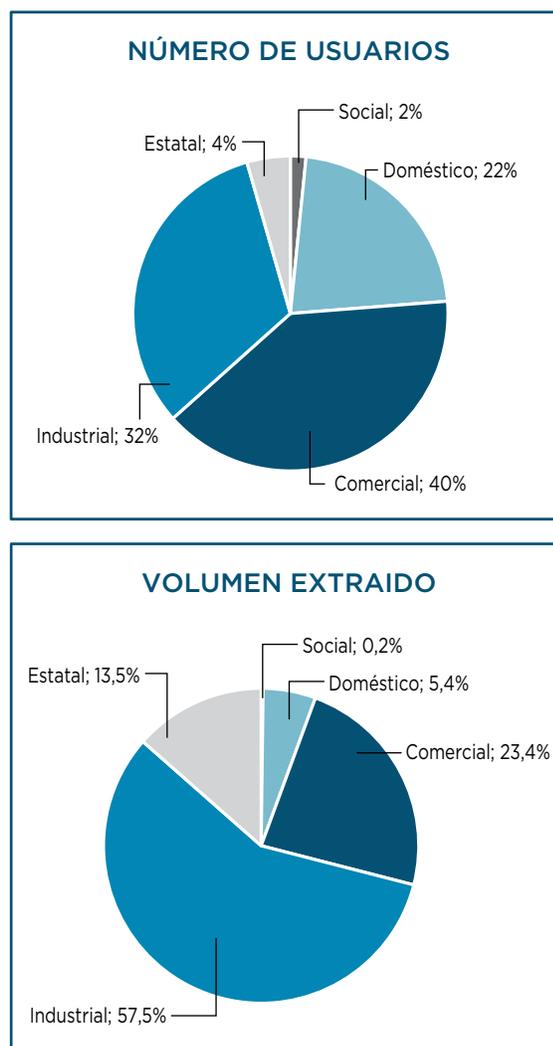
PRINCIPIOS	CRITERIOS TÉCNICO-ECONÓMICOS
<ol style="list-style-type: none"> 1. Eficiencia económica 2. Viabilidad financiera 3. Simplicidad 4. Transparencia 5. No discriminación 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Seguridad en la prestación de los servicios de saneamiento 2. Sostenibilidad de la puesta a disposición del recurso hídrico subterráneo 3. Costo de oportunidad para los usuarios de no contar con disponibilidad hídrica subterránea 4. Disposición a pagar de los usuarios

Fuente: Resolución N° 007-2016-SUNASS-CD. Elaboración propia.

En 2017, y posteriormente en 2021, la Sunass estableció las tarifas para el SMGUAS para Sedapal. A diciembre de 2020, en Lima Metropolitana, existían 1751 usuarios de fuente propia que deben pagar la tarifa respectiva, de los cuales el 40% corresponde a la categoría comercial y el 32% a la categoría industrial. Sin embargo, al analizar el volumen extraído, se observa que los usuarios industriales concentran el 57% de los más de 58 millones de metros cúbicos que, en total, se extrajeron por usuarios no agrarios (Sunass, 2021).

■ GRÁFICO 3

Porcentaje de usuarios y de volumen extraído de aguas subterráneas por categorías (Lima)



Fuente: Sunass (2021). Elaboración propia.

En el cálculo de la tarifa por el SMGUAS, en cumplimiento de los criterios técnico-económicos aprobados, la Sunass consideró tanto los costos de operación, mantenimiento y de capital de actividades relacionadas directamente con el servicio, así como –parcialmente– los costos asociados al uso conjunto, que permiten recargar indirectamente el acuífero y reducir la presión extractiva sobre este. Dentro de estas se encuentran plantas de tratamiento de agua potable, así como un trasvase y la implementación de una planta desaladora, implementados mediante contratos de asociación público-privada, entre otras. La **Tabla 5** consigna las tarifas por el SMGUAS actualmente vigentes en el ámbito de prestación de Sedapal.

■ TABLA 5

Tarifa del servicio de monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas (Sedapal)

CATEGORÍA	RANGO (m ³ /mes)	TARIFA (USD/m ³)
Social	0 a más	0,13
Doméstico	0 a 30	0,15
	30 a más	0,54
Comercial y otros	0 a 100	0,54
	100 a más	0,63
Industrial	0 a 400	0,81
	400 a más	0,95
Estatal	0 a 2000	0,54
	2000 a más	0,63

Nota: Las tarifas no incluyen impuesto al valor agregado. Tipo de cambio utilizado 1USD=3,85PEN.

Fuente: Sedapal (2022).

Un primer aspecto a analizar es el impacto de las nuevas tarifas en el monto pagado por los usuarios no agrarios de aguas subterráneas. Antes de la entrada en vigencia del Régimen Especial de Monitoreo y Gestión de Aguas Subterráneas a cargo de las EPS, Sedapal cobraba a estos usuarios el equivalente al 20% de la tarifa de agua potable y alcantarillado que aplicaba a los usuarios de red de las categorías respectivas (Sunass, 2017). En la **Tabla 6**, se presenta un cálculo del impacto en la facturación mensual para los usuarios comerciales e industriales que extraen aguas subterráneas. Como puede verse, el incremento por efecto de la entrada en vigencia de las nuevas tarifas en 2017 va desde 2,8% en promedio para los usuarios comerciales de bajo consumo (40m³ en promedio) hasta 67,9% para los usuarios industriales de alto consumo (más de 6 mil m³ al mes, en promedio). En 2022, las tarifas aprobadas registraron un incremento acumulado de 32% con respecto al nivel previamente establecido en 2017.

■ TABLA 6

Impacto de la aprobación de las nuevas tarifas por SMGUAS en usuarios comerciales e industriales

CATEGORÍA	NÚMERO DE USUARIOS	RANGO DE CONSUMO	CONSUMO PROMEDIO (m ³ , pre tarifa 2017)	FACTURACIÓN					
				PRE TARIFA 2017		POST TARIFA 2017		2022	
				USD		USD	Δ%	USD	Δ%
Comercial	465	0 a 100	40	15,80		16,25	2,8%	21,48	32,2%
	337	100 a más	2.546	1.050,12		1.200,09	14,3%	1.585,46	32,1%
Industrial	340	0 a 400	83	35,17		51,05	45,2%	67,48	32,2%
	466	400 a más	6.306	2.672,11		4.487,61	67,9%	5.930,53	32,2%

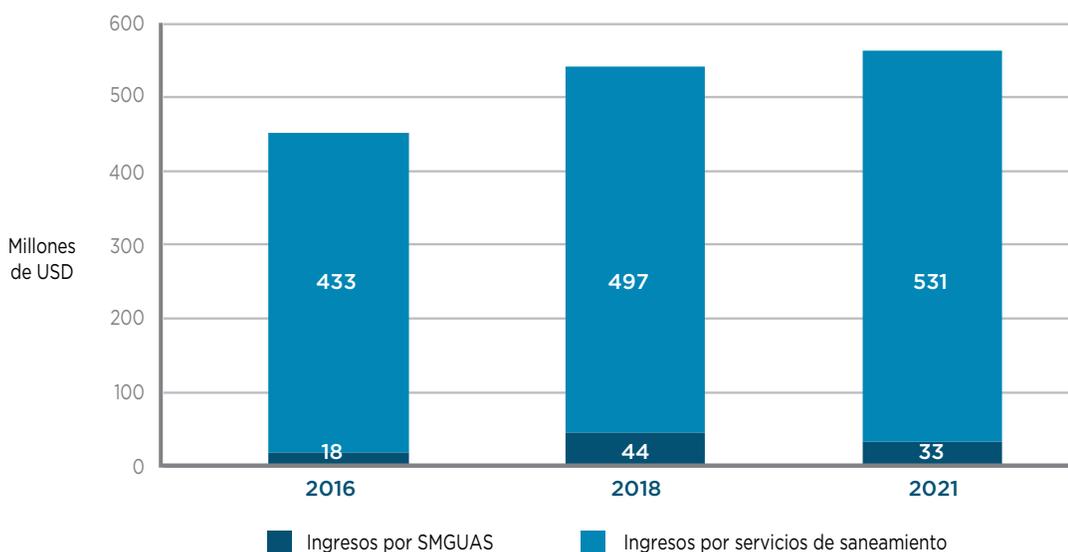
Nota: Las tarifas no incluyen impuesto al valor agregado. Tipo de cambio utilizado 1USD=3,85PEN.

Fuente: Elaboración propia con información de Sunass (2017) y Sedapal (2022).

Un segundo aspecto que revisar es el impacto de la aprobación del nuevo régimen en los ingresos operativos de Sedapal. Como puede verse, en el **Gráfico 4**, los ingresos provenientes de cargos a los usuarios de aguas subterráneas en 2018 son 2,5 veces los ingresos registrados por el mismo concepto un año antes de la entrada en vigor de las nuevas tarifas (es decir, en 2016). A pesar de este incremento significativo, como es esperable, la gran mayoría de los ingresos de Sedapal proviene de la facturación por servicios de saneamiento a usuarios conectados a la red. En 2021, los ingresos facturados por la empresa por concepto de SMGUAS representaban el 6% de los ingresos totales de la empresa.

■ GRÁFICO 4

Evolución de los ingresos operativos anuales de Sedapal



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los Estados Financieros Auditados de Sedapal. Tipo de cambio utilizado 1USD=3,85PEN.

Finalmente, la información públicamente disponible no ha permitido analizar dos aspectos sobre los que sería útil profundizar. El primero es la efectividad de las tarifas como instrumento económico de gestión. Si bien puede ser muy pronto para medir el efecto en la recuperación de los acuíferos, puede iniciarse con analizar el impacto en el consumo promedio de los usuarios de fuente propia; es decir, el impacto en la extracción de agua. Esto permitirá evaluar si la aprobación de las tarifas bajo el nuevo régimen ha introducido incentivos al uso eficiente del recurso hídrico. Un segundo aspecto pendiente de estudio es analizar el avance en la implementación de actividades y proyectos de inversión relacionados al SMGUAS. Si bien la aprobación tarifaria viene acompañada de un programa de inversiones, resulta necesario evaluar el avance en la formulación y ejecución de proyectos de inversión que en algunos casos corresponden a infraestructura natural.

El establecimiento de esta tarifa es un paso importante para contribuir a la explotación sostenible de los acuíferos en Perú. La agenda pendiente incluye el fortalecimiento institucional de los operadores en otras zonas de Perú, a fin de que pueda otorgárseles el título habilitante y estén facultadas a prestar el SMGUAS. Asimismo, el actual marco legal excluye del régimen a los usuarios agrarios; sin embargo, es necesario incluir en el análisis a dichos usuarios y sus incentivos. El problema debe abordarse con un enfoque que integre los distintos usos y combine instrumentos económicos, políticas de desplazamiento de la demanda (incentivando la eficiencia en el riego,

por ejemplo) y políticas desde la oferta (recarga de acuíferos). Un caso importante en Perú es el departamento de Ica, donde la sobreexplotación de los acuíferos pone en riesgo la economía regional (que descansa en la actividad agroindustrial). En dicha región, se concentra el 35% de las aguas subterráneas extraídas a nivel nacional (Sunass, 2017) y se observa un retroceso en el nivel de los acuíferos que puede comprometer su sostenibilidad.

4.2. Costa Rica: Canon de aprovechamiento del agua

En Costa Rica, el canon por aprovechamiento de agua era un concepto que se introdujo desde la Ley de Aguas aprobada en 1942. Décadas después de su implementación, el Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE) planteó una reforma sobre la base de un diagnóstico de los problemas que identificaron. Algunos de ellos incluyen que el valor fijado era demasiado bajo para suponer un desincentivo al despilfarro y que se había establecido el canon como pagos decrecientes por bloque, que estaban en función de un rango de caudal (litros por segundo) en lugar del consumo efectivo hecho por el usuario (Ortega, 2006). La **Tabla 7** presenta la estructura del canon para uso doméstico previo a la reforma.

■ **TABLA 7**
Canon por aprovechamiento de agua para uso doméstico (previo a la reforma)

RANGO (litros por segundo)	MONTO ANUAL (USD)
De 0 hasta 0,10	16,16
Exceso de 0,10 hasta 0,25	14,14
Exceso de 0,25 hasta 0,50	12,12
Exceso de 0,50 hasta 1	10,10
Exceso de 1 hasta 5	8,08
Exceso de 5 hasta 10	6,06
Exceso de 10 hasta 15	4,04
Exceso de 15 hasta 20	2,02
De 20 en adelante	1,01

Nota: Más USD 0,10 por litro por segundo para control y seguimiento. Tipo de cambio utilizado 1USD=495CRC (vigente a diciembre 2005 según Banco Central de Costa Rica).

Fuente: Ortega (2006).

De acuerdo con MINAE (2016), los principales problemas observados en la estructura de canon previo a la reforma eran cuatro:

- i) Otorgaba un valor mínimo al recurso.
- ii) Promovía el acaparamiento y subutilización del recurso.
- iii) Contemplaba solo costos administrativos.
- iv) Muchos de los grandes usuarios no lo pagaban.

Estos defectos reflejaban el enfoque que todavía prevalece en muchos países: el establecimiento de tasas de carácter administrativo cuyo objetivo es la recaudación mínima para financiar actividades de atención al cliente, pero que no busca introducir incentivos para garantizar el uso eficiente del recurso y su disponibilidad en cantidad, calidad y en el tiempo.

En 2006, mediante decreto 32868-MINAE, se aprobó el canon ambientalmente ajustado de aprovechamiento del agua. El aspecto central de la reforma es que el canon pasa a ser un instrumento económico para la regulación del aprovechamiento y administración del agua, permitiendo así la disponibilidad hídrica para distintos usos. El nuevo canon consta de dos partes: i) el pago por el derecho de uso de agua, y ii) el pago por servicio ambiental hídrico. La recaudación del primer componente sirve para los gastos administrativos, control, monitoreo, planificación, etc; mientras que la del segundo componente está orientada a financiar los costos de protección, conservación y restauración de las áreas de recarga y fragilidad hídrica (Ortega, 2006; MINAE, 2016).

El canon de aprovechamiento del recurso hídrico ambientalmente ajustado se aprobó con diferenciación entre aguas superficiales y subterráneas, para ocho usos distintos (consumo humano, industrial, comercial, agroindustrial, turismo, agropecuario, acuicultura, fuerza hidráulica) y utilizando el volumen extraído como unidad de medida, como puede verse en la **Tabla 8**, donde se reporta el canon aprobado luego de la reforma para uso de consumo humano.

■ **TABLA 8**

Canon por aprovechamiento de agua (posterior a la reforma)

USO	USD/M ³	
	AGUA SUPERFICIAL	AGUA SUBTERRÁNEA
Consumo humano	0,0025	0,0028

Nota: Tipo de cambio utilizado 1USD=588CRC (vigente a diciembre 2022 según Banco Central de Costa Rica).

Fuente: MINAE (2016).

Actualmente, la Dirección de Agua es la organización facultada para realizar el cobro del canon y transferirlo a las distintas instituciones para los fines listados en la **Tabla 9**.

■ **TABLA 9**

Asignación del canon a instituciones en Costa Rica

INSTITUCIÓN	PORCENTAJE	OBJETIVO
Sistema Nacional de Áreas de Conservación	25%	Realizar proyectos para la protección del recurso hídrico
Fondo Nacional de Financiamiento Forestal	25%	Realizar proyectos orientados al Pago de Servicios Ambientales
Comisión para el Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Reventazón	5%	Regular la planificación, la ejecución y el control de las actividades de conservación del agua de la cuenca alta del Río Reventazón
Dirección Nacional de Agua	45%	Realizar proyectos orientados a optimizar la gestión del recurso hídrico

Fuente: Dirección de Agua (2022). Elaboración propia.

4.3.

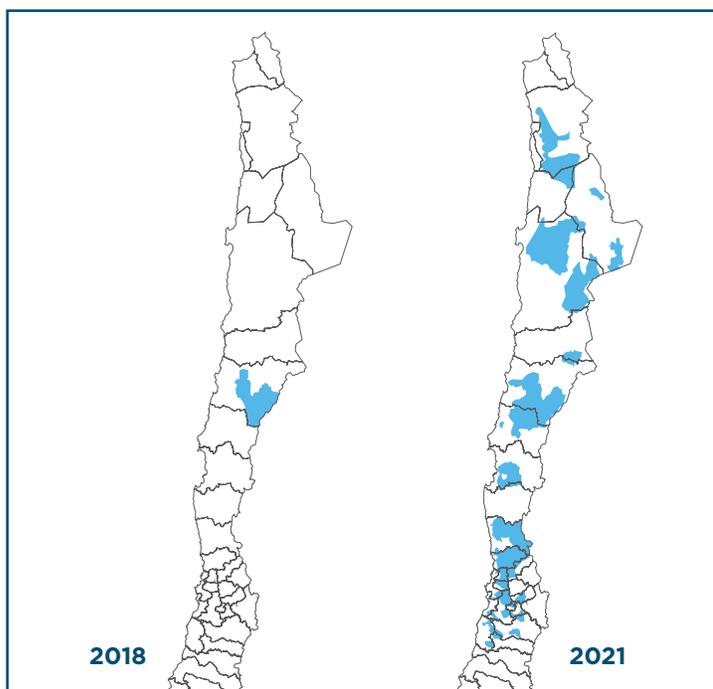
Chile: Declaratoria de zonas de restricción y prohibición

En el caso de Chile, la Dirección General de Aguas cuenta con dos instrumentos para cautelar el estado de los acuíferos. En casos de grave riesgo, se realiza la declaración de área de restricción, lo cual implica que solo pueden otorgarse derechos de aprovechamiento provisionales. En casos en los que la sostenibilidad del recurso se encuentra totalmente comprometida, se realiza la declaración de zona de prohibición, siendo imposible otorgar derechos de aprovechamiento.

Actualmente, existen 197 acuíferos con declaración de área de restricción, lo cual representa el 53% de los acuíferos en el país; mientras que las zonas de prohibición en Chile se han incrementado notablemente entre 2018 y 2021, como puede verse en la **Ilustración 27**. Esto fue consecuencia de un estudio detallado del estado de las aguas subterráneas, luego del cual los acuíferos con prohibición pasaron de 6 a 100. (Gobierno de Chile, 2021).

■ ILUSTRACIÓN 27

Zonas con declaración de prohibición en Chile (2018 y 2021)



Fuente: Gobierno de Chile (2021).

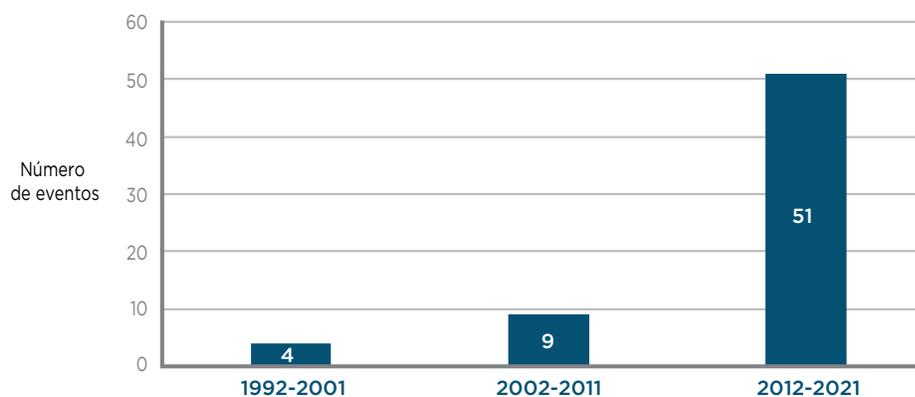
4.4.

Chile: plan de resiliencia del servicio de agua potable en Santiago

La provisión del servicio de agua potable es particularmente afectada por los efectos del cambio climático, que cada vez se vuelven más frecuentes e intensos. Uno de ellos es el incremento de lluvias que causan el desplazamiento de materiales y, en el caso de la empresa encargada de abastecer a la ciudad de Santiago de Chile, incrementan el nivel de turbiedad de los ríos Maipo y Mapocho (Aguas Andinas, 2021). Los eventos de turbiedad extrema se han incrementado considerablemente en los últimos años (ver **Gráfico 5**), lo cual limita severamente la posibilidad de tratar fuentes superficiales, por lo cual la empresa se ha propuesto elevar la autonomía del suministro de agua potable a 48 horas mediante la ejecución de un plan de resiliencia.

■ GRÁFICO 5

Frecuencia de eventos de turbiedad extrema en Santiago de Chile

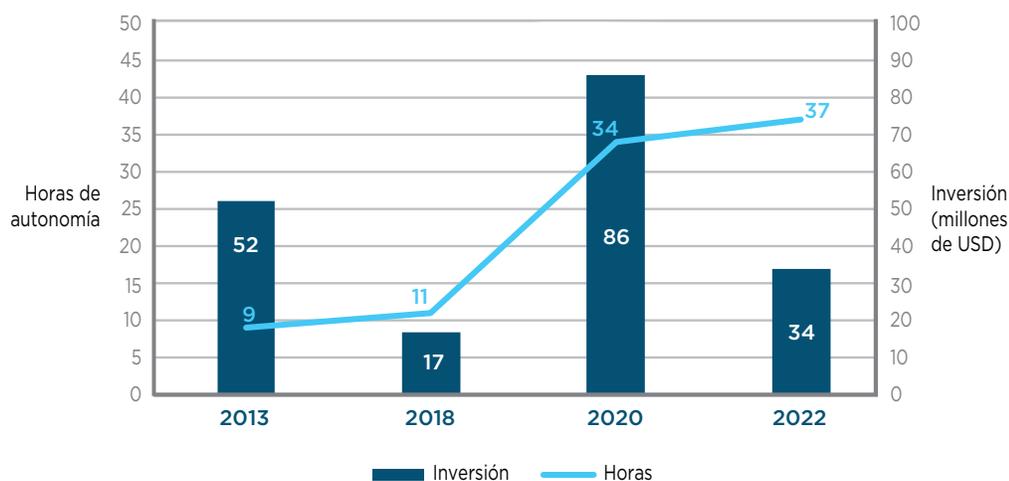


Fuente: Aguas Andinas (2021). Elaboración propia. Unidad Nefelométrica de Turbidez (UNFT) es el indicador que permite medir la turbiedad. Se considera como eventos de turbiedad a extrema a aquellos con una duración mayor a 12 horas sobre 3.000 UNT y *peaks* mayores a 5.000 UNT.

Como parte de ese plan, en una primera fase (y con una inversión de USD 52 millones) se elevó la autonomía de 4 horas en 2011 a 9 horas en 2013. Estas obras consistieron en la construcción de 7 nuevos pozos y 14 estanques de almacenamiento de agua. La segunda etapa (con una inversión de USD 17 millones) habilitó 16 pozos y construyó 9 estanques de almacenamiento de agua, permitiendo alcanzar una autonomía de 11 horas. La tercera etapa, que constituye la obra de mayor envergadura dentro del plan, permitió la entrada en operación de los Mega Estanques de Pirque (con una inversión de USD 86 millones), lográndose así una autonomía de 34 horas en 2020. Finalmente, las obras en los pozos de Cerro Negro - Lo Mena, al sur de Santiago (USD 34 millones) permitieron alcanzar las 37 horas de autonomía en 2022.

■ GRÁFICO 6

Inversiones del Plan de Resiliencia e incremento de horas de autonomía en Santiago de Chile



Fuente: Aguas Andinas (2021), Aguas Andinas (2020). Tipo de cambio utilizado: 900CLP/USD. Elaboración propia.

RECUADRO 6

El rol de las aguas subterráneas en el acceso al agua en escuelas rurales de Uruguay

El Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS) es un instrumento de la Cooperación Española, gestionado con la colaboración del Banco Interamericano de Desarrollo. Este desarrolla programas de fortalecimiento institucional, desarrollo comunitario y promoción de servicios de agua y saneamiento en 18 países de ALC, centrándose en zonas rurales y periurbanas.

En Uruguay, el FCAS ha financiado el Programa de Agua Potable y Saneamiento Rural en Escuelas, que ha permitido brindar acceso a agua y saneamiento a 325 comunidades rurales en los 18 departamentos del país (Olmedo y González, 2022). Con la instalación de los pozos respectivos, se ha logrado garantizar una educación en condiciones higiénicas a los estudiantes, incrementando la asistencia y puntualidad a clases. Además, algunos pozos utilizan sistemas de bombeo que funcionan con energía solar, constituyéndose como una solución limpia y sostenible.

5.

Conclusiones

1. Las aguas subterráneas son fundamentales para la actividad económica y el desarrollo de las personas en América Latina y el Caribe.

Las aguas subterráneas son un recurso natural que resulta fundamental para las actividades del ser humano: permiten abastecer de agua potable poblaciones en los ámbitos rural y urbano, son insumos importantes para determinadas actividades industriales y permiten el riego de superficies agrícolas, contribuyendo así a la seguridad alimentaria. Pueden llegar a representar un porcentaje importante del agua potable distribuida en megaciudades como Ciudad de México (58%), e incluso el 100% en otras ciudades de la región.

2. Las aguas subterráneas poseen ventajas para el abastecimiento poblacional.

La provisión de agua potable basada en fuentes subterráneas posee ventajas con relación a hacerlo con fuentes superficiales. La primera de ellas es el bajo costo de tratamiento. Comparada a la infraestructura y procesos requeridos para tratar agua captada de ríos o del mar, la prestación mediante pozos suele ser de un costo considerablemente menor. Una segunda ventaja es su ubicación descentralizada. Ello permite producir el agua potable en ubicaciones más cercanas a donde se encuentra la demanda, reduciendo así las pérdidas físicas en la conducción y distribución. Estas características la vuelven una opción atractiva para el cierre de brechas de acceso al agua gestionada de forma segura en contextos rurales. La tercera ventaja es que suelen ser una fuente más estable, ya que no dependen tan fuertemente de factores climatológicos como las lluvias.

3. Los acuíferos se ven amenazados por la explotación no sostenible como consecuencia del crecimiento demográfico y por la deforestación.

Como consecuencia del crecimiento demográfico y económico, los acuíferos vienen soportando una creciente presión extractiva, que se ha intensificado gracias al cambio climático. Adicionalmente, los patrones de recarga de los acuíferos se ven afectados, producto del desarrollo urbanístico y la deforestación. De esta manera, la explotación no sostenible de las aguas subterráneas trae consecuencias como la reducción del agua disponible (para la prestación actual y futura del servicio) y la contaminación del recurso hídrico (intrusión salina), lo cual puede inutilizar ciertos acuíferos, comprometiendo la seguridad hídrica.

4. La sobreexplotación de los acuíferos también tiene como consecuencia el hundimiento del terreno, lo cual puede causar serios problemas en las ciudades.

Otra externalidad causada por la extracción excesiva de aguas subterráneas es la compactación del acuífero y el hundimiento del terreno. En la Ciudad de México, se han registrado hundimientos de hasta 40 centímetros por año. Además de generar desniveles en las ciudades, la subsidencia ejerce presión sobre las redes de distribución de agua y las redes colectoras de alcantarillado. Esto conduce a un incremento en el agua no contabilizada, inundaciones y posible contaminación del agua potable y de los acuíferos.

5. En el contexto del cambio climático, las aguas subterráneas son un activo natural estratégico que actúa como reserva y garantiza la resiliencia del servicio de agua ante eventos extremos.

Las ciudades son cada vez más vulnerables a eventos climáticos extremos y desastres que se presentan con mayor frecuencia e intensidad en el contexto del cambio climático (Cavallo et al., 2020). Ante eventos que afectan las fuentes superficiales, como sequías (que reducen su disponibilidad) o deslizamientos (que incrementan el nivel de turbidez del agua o destruyen la infraestructura de captación), las aguas subterráneas actúan como una reserva natural que permite continuar prestando el servicio de agua potable. Es decir, permiten dotar de resiliencia a las ciudades al permitirles prescindir temporalmente de las fuentes superficiales, otorgando a las ciudades horas de autonomía en la prestación del servicio.

6. Las aguas subterráneas son bienes económicos de propiedad común que requieren regulación para asegurar su sostenibilidad.

En ausencia de medidas coercitivas, los agentes únicamente tomarán en cuenta el beneficio y costo privado de su consumo de aguas subterráneas, lo cual los llevará a extraerla por encima del nivel óptimo, depredando el recurso (un fenómeno llamado “la tragedia de los comunes” (Hardin, 1968)). La ausencia de regulación conduce a un círculo vicioso por el cual se reduce la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico y aumenta la insatisfacción de los usuarios de agua. Es necesario regular las aguas subterráneas, complementando distintos tipos de instrumentos. Para ello debe abordarse sistemáticamente el problema con una base sólida de capacidades institucionales, una adecuada coordinación entre entidades del Estado y un buen sistema de información (Ortega, 2006).

7. Los precios, como instrumento económico para incentivar un uso racional y sostenible de las aguas subterráneas, deben reflejar los costos económicos de la extracción.

Muchos usuarios no pagan por la totalidad de los costos económicos de la extracción de agua subterránea. En muchos casos, incluso los costos de capital y de operación y mantenimiento se encuentran subsidiados. Sin embargo, es importante recordar que los costos económicos también incluyen los costos de oportunidad (por la reducción de la disponibilidad presente y futura) y las externalidades que la extracción impone en terceros (contaminación del acuífero, hundimiento del terreno y afectación de servicios públicos). Debido a que la energía eléctrica para el bombeo es una parte importante de los costos de extracción, unas tarifas demasiado bajas pueden incentivar un nivel de extracción que no resulte sostenible. Por su parte, los cargos por extracción de agua subterránea también deben incentivar el uso racional y sostenible del recurso hídrico.

8. Las ciudades también tienen a su disposición instrumentos como la declaratoria de restricción o la prohibición de extracciones cuando la situación del acuífero lo amerita.

Es poco común que los usuarios de agua subterránea cuenten con medidores, lo cual debería mejorarse a fin de implementar políticas de precio más efectivas. Sin perjuicio de ello, las ciudades tienen a su disposición la utilización de otras medidas que permiten restringir parcial o totalmente la extracción de recursos hídricos subterráneos. Tal es el caso de Chile que incrementó los acuíferos con prohibición de extracción de 6 en 2018 a 100 en 2021.

9. La gestión integral de las aguas subterráneas debe incluir políticas de desplazamiento de la demanda en todos los usos donde sea posible.

El crecimiento poblacional, la urbanización y el crecimiento en la demanda de alimentos incrementarán la presión actual sobre los acuíferos en las siguientes décadas. Una forma de reducir esta presión es implementar políticas que busquen “desplazar la demanda”, es decir incrementar la eficiencia en el uso del recurso. En la demanda de agua urbana, esto implica promover tecnologías más eficientes en los hogares y la industria y realizar campañas de cambio de comportamiento. De otro lado, no puede ignorarse la importancia de la agricultura y el riego en el consumo de agua –entre 60% y 70% de las extracciones a nivel global– por lo cual en este sector pueden implementarse estrategias que incluyen la reubicación de cultivos, los cambios estacionales a cultivos menos intensivos en agua y la promoción de esquemas de riego eficientes, entre otros.

10. Desde el lado de la oferta, debe prestarse atención a los proyectos que recargan los acuíferos en las partes altas y medias de la cuenca, incluyendo la inversión en infraestructura natural.

El almacenamiento subterráneo es un servicio ecosistémico que proveen los acuíferos y que puede mejorarse a través de actividades y proyectos de inversión. A nivel mundial, las acciones destinadas a la conservación y restauración de los ecosistemas han empezado a generar un interés creciente, por su potencial para asegurar la disponibilidad del recurso hídrico y reducir costos en la provisión del servicio. Los países deben promover una combinación de políticas que favorecen o incrementan la recarga en las partes altas de la cuenca, proyectos de Gestión de Recarga Artificial de los Acuíferos (MAR, por sus siglas en inglés), y otros proyectos que realizan los operadores de agua que incrementan la disponibilidad de agua en la cuenca y reducen la presión extractiva sobre los acuíferos.

11. La infraestructura verde urbana también puede contribuir a incrementar la disponibilidad de aguas subterráneas.

El diseño urbano debe procurar aumentar la permeabilidad del suelo en las ciudades, pues esto no solo permite reducir el riesgo de inundaciones ante eventos extremos de lluvia, sino que contribuye a la infiltración de agua y la disponibilidad de aguas subterráneas. A nivel de hogares, el establecimiento de cargos por drenaje pluvial que descuentan por superficie permeable también puede alinear el incentivo de los hogares para reducir la presión sobre los sistemas de drenaje, favoreciendo así la infiltración.

12. Una gestión integral de las aguas subterráneas requiere una gobernanza adecuada, coordinación interinstitucional e información para la toma de decisiones.

Los casos revisados en este documento reseñan la importancia de la gobernanza y de la información para la aprobación y el diseño de políticas que permitan la explotación sostenible de los acuíferos. Los países deben revisar sus marcos normativos y el diseño institucional, incorporando la regulación de las aguas subterráneas y la gestión integrada de los recursos hídricos, y fomentando la coordinación entre los distintos sectores involucrados (agricultura, energía, minería, industria, etc.) y los distintos niveles de gobierno. Asimismo, en muchos países, la información sobre usuarios, volúmenes extraídos y nivel freático es escasa, e incluso inexistente. Es importante hacer uso de la innovación y los avances tecnológicos para contar con información con el mayor grado de detalle posible, lo cual permitirá diseñar políticas efectivas que garanticen el uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

Referencias

- AARNOUDSE, E. y B. BLUEMLING (2017). *Controlling groundwater through smart card machines: the case of water quotas and pricing mechanisms in Gansu Province, China*. International Water Management Institute (IWMI). 20p. (Groundwater Solutions Initiative for Policy and Practice (GRIPP) Case Profile Series 02).
- AGUAS ANDINAS (2020). *Aguas Andinas supera evento de turbiedad en río Maipo y cancela Alerta Temprana Preventiva*. Consultado el 06/06/2022 en https://www.aguasandinas.cl/web/aguasandinas/noticias/-/asset_publisher/mv8Gi69Fcube/content/aguas-andinas-mantiene-alerta-temprana-preventiva-por-turbiedad-en-rios-y-pronostico-meteorologi-1
- AGUAS ANDINAS (2021). *Reporte Integrado 2021*. Disponible en: <https://www.aguasandinasinversionistas.cl/-/media/Files/A/Aguas-IR-v2/annual-reports/es/report-integrado-aguas-andinas-2021-v1.pdf>
- ARRABAL, Miguel Ángel y Mónica ÁLVAREZ (2019). *Estudio de recursos hídricos y vulnerabilidad climática del Acuífero Patiño*. Material de Aprendizaje del Banco Interamericano de Desarrollo.
- ASOCIACION DE ENTES REGULADORES DE AGUA Y SANEAMIENTO DE LAS AMÉRICAS - ADERASA y SUPERINTENDENCIA NACIONAL DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO - SUNASS (2021). *Informe Anual 2021. Grupo Regional de Trabajo de Benchmarking*.
- AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA (2016). *Estado Situacional de los Acuíferos Rímac y Chillón*. Disponible en: <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/2080/ANA0000966.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- BANCO MUNDIAL (2021). *Argentina: Valorando el Agua. Diagnóstico de la Seguridad Hídrica*. Washington, DC.
- BONILLA, José Pablo, STEFA, Catalin, PALMA, Adriana, BERNARDO DA SILVA, Eduardo y Hugo PIVARAL (2018). *Inventory of managed aquifer recharge schemes in Latin America and the Caribbean*. Article in Sustainable Water Resources Management.
- BRETAS, Fernando, CASANOVA, Guillermo, CRISMAN, Thomas, EMBID, Antonio, MARTIN, Liber, MIRALLES, Fernando y Raúl MUÑOZ (2020). *Agua para el futuro: estrategia de seguridad hídrica para América Latina y el Caribe*. Monografía 759, Banco Interamericano de Desarrollo.
- BURNETT, K., PONGKIJVORASIN, S., ROUMASSET, J. y C.A. WADA (2015). *Incentivizing interdependent resource management: watersheds, groundwater and coastal ecology*. En DINAR, Ariel y Kurt SCHWABE (Ed.), *Handbook of Water Economics* (pp. 150-161). EE Publishing.
- CARETTA, M.A., MUKHERJI, A., ARFANUZZAMAN, M. et al. (2022) *Water*. En: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 551-712.
- CASTRO LANCHARRO, Borja (2021a). *Infraestructura Verde Urbana I: Retos, oportunidades y manual de buenas prácticas*. Nota Técnica 2185, Banco Interamericano de Desarrollo.
- CASTRO LANCHARRO, Borja (2021b). *Infraestructura Verde Urbana II: Implementación y seguimiento de soluciones*. Nota Técnica 2186, Banco Interamericano de Desarrollo.
- CAVALLO, E., POWELL, A. y T. SEREBRISKY (2020). *De estructuras a servicios: El camino a una mejor infraestructura en América Latina y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, DC.
- CHAITRA, B.S. y M.G. CHANDRAKANTH (2005). *Optimal extraction of groundwater for irrigation: synergies from surface water bodies in tropical India*. *Water Policy* 7 (2005) 597-611.
- CHAUSSARD, E., HAVAZLI, E., FATAHI, H., CABRAL-CANO, E. y D. SOLANO-ROJAS (2021). *Over a Century of Sinking in Mexico City: No Hope for Significant Elevation and Storage Capacity Recovery*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <https://doi.org/10.1029/2020JBO20648>
- CLIFTON, C., EVANS, R., HAYES, S., HIRJI, R., PUZ, G. y C. PIZARRO (2010). *Water and Climate Change: Impacts on groundwater resources and adaptation options*. *Water Working Notes*. Note N° 25, June 2010. Water Sector Board of the Sustainable Development Network of the World Bank Group.
- COHEN-SHACHAM, E., WALTERS, G. y S. MAGINNIS (2016). *Nature-Based Solutions to Address Global Societal Challenges*. Gland, Switzerland. International Union for Conservation of Nature.

- DAUS, Anthony (2019). *Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos: Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua en el Caribe Oportunidades y Desafíos*. Documento para Discusión 712 del Banco Interamericano de Desarrollo.
- DELACÁMARA, G., DWORAK, T., GÓMEZ, C.M., LAGO, M., MAZIOTIS, A., ROUILLARD, J. Y P. STROSSER (2013). *Design and development of Economic Policy Instruments in European water policy*. EPI WATER.
- DELGADO, Anna; RODRIGUEZ, Diego J.; AMADEI, Carlo A.; MAKINO, Midori (2021). *Water in Circular Economy and Resilience (WICER)*. World Bank, Washington, DC. World Bank.
- DIRECCIÓN DE AGUA (2022). *Canon de aprovechamiento de aguas*. Consultado el 17/12/2022 en <https://da.go.cr/canon-de-aprovechamiento-de-aguas/>
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2019). *Green infrastructure: better living through nature-based solutions*.
- FOSTER, Stephen (2020). *Global Policy Overview of Groundwater in Urban Development—A Tale of 10 Cities!* Water. 2020; 12(2):456. <https://doi.org/10.3390/w12020456>
- FOSTER, Stephen; TUINHOF, Albert; KEMPER, Karin; GARDUÑO, Hector y Marcella NANNI (2010). *GW-MATE Briefing Note Series. Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools. Briefing Note 2 (Characterization of Groundwater Systems: key concepts and frequent misconceptions)*. Global Water Partnership Associate Program. World Bank.
- GALLOWAY, Devin L. y Thomas J. BURBEY (2011). *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*. Hydrogeology Journal (2011) 19: 1459-1486
- GOBIERNO DE CHILE (2021). *Crisis Hídrica: un desafío de todos*. Publicación elaborada por los siguientes ministerios: Ministerio de Obras Públicas; Ministerio de Agricultura; Ministerio de Medio Ambiente; Ministerio de Energía; Ministerio de Ciencias, Tecnología, Conocimiento e Innovación; Ministerio de Educación; Ministerio Secretaría General de Gobierno; Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP - GWP (2000). *Integrated Water Resources Management*. Technical Advisory Committee (TAC) Background Papers N° 4.
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP - GWP Centroamérica (2017). *La situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada*.
- GONZÁLEZ, F., CRUICK, C., PALMA, A. y A. MENDOZA (2015). *Recarga artificial de acuíferos en México*. en H2O - Gestión del agua. Año 2. Enero - marzo 2015. Disponible en https://issuu.com/helios_comunicacion/docs/h2o_-_5
- GRIEBLER, Christian y Maria AVRAMOV (2015). *Groundwater ecosystem services: a review*. Freshwater Science 2015 34:1, 355-367.
- GRIFFIN, Ronald (2006). *Water Resource Economics: The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects*. Massachusetts Institute of Technology.
- GROUNDWATER FOUNDATION (2002). *Groundwater Overuse and Depletion*. Consultado el 02/09/2022 en: <https://groundwater.org/threats/overuse-depletion/>
- HANEMANN, Michael (2005). *Groundwater (Class Notes)*.
- HARDIN, G. (1968). *The Tragedy of the Commons*. Science. New Series, Vol. 162, No. 3859 (Dec. 13, 1968), pp. 1243-1248
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua -IMTA (2019). *Aguas subterráneas*. Consultado el 05/06/2022 en: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterraneeas>
- INOWAS (2022). *MAR Methods*. Consultado el 15/12/2022 <https://inowas.com/mar-methods/>
- INTERNATIONAL GROUNDWATER RESOURCES ASSESSMENT CENTRE - IGRAC (2007). *Artificial Recharge of Groundwater in the World*. Consultado el 14/12/2022 en: <https://www.un-igrac.org/areas-expertise/managed-aquifer-recharge-mar>
- KEMPER, Karin; FOSTER, Stephen; GARDUÑO, Hector; NANNI, Marcella y Albert TUINHOF (2010). *GW-MATE Briefing Note Series. Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools. Briefing Note 7 (Economic Instruments for Groundwater Management: using incentives to improve sustainability)*. Global Water Partnership Associate Program. World Bank.
- KINZELBACH, W., WANG, H., LI, Y., WANG, L. y N. LI (2022). *Groundwater overexploitation in the North China Plain: A path to sustainability*. Springer Water.
- LIBRA, J.M., MARINUS COLLAER, J.S., DATSHKOVSKY, D. and M. PÉREZ-URDIALES (2022). *Scarcity in the Land of Plenty*. Nota Técnica 2411, Banco Interamericano de Desarrollo.
- LOCATELLI, B., HOMBERGER, J.M., OCHOA-TOCACHI, B.F., BONNESOEUR, V., ROMÁN, F., DRENKHAN, F. y W. BUYTAERT. (2020) *Impactos de las zanjas de infiltración en el Agua y los Suelos de los Andes: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas*. Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica", Forest Trends, Lima, Perú.

- LOW, Kathleen, GRANT, Stanley B., HAMILTON, Andrew J., GAN, Kein, SAPHORES, Jean-Daniel, ARORA, Meenakshi y David L. FELDMAN (2015). *Fighting drought with innovation: Melbourne's response to the Millennium Drought in Southeast Australia*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2(4).
- MCDONALD, R.I. y D. SHEMIE (2014). *Urban Water Blueprint: Mapping Conservation Solutions to the Global Water Challenge*. The Nature Conservancy, 2014.
- MIA: MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2003). *Ecosystems and Human Well-being. A Framework for Assessment*.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGIA - MINAE (2016). *Canon de aprovechamiento de agua: 10 años invirtiendo en el recurso hídrico*.
- MONTGINOUL, M., RINAUDO, J., BROZOVIC, N., y G. DONOSO (2016). *Controlling Groundwater Exploitation Through Economic Instruments: Current Practices, Challenges and Innovative Approaches*. En JAKEMAN, A. et al. (Ed.), *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Management* (pp. 551-581). Springer Open.
- MORAN, T., CHOY, J. y C. SANCHEZ. *The Hidden Costs of Groundwater Overdraft (2014)*. En: *Understanding California's Groundwater: a series of articles exploring the use and management of California's precious resource*. Water in the West. Stanford Woods Institute for the Environment & The Bill Lane Center for the American West. Consultado el 14/03/2023 en: <https://waterinthewest.stanford.edu/groundwater/overdraft/>
- MOSQUERA, G. M., MARIN, F., STERN, M., BONNESOEUR, V., OCHOA-TOCACHI, B. y F. ROMAN-DAÑOBEYTIA (2022). *Servicios ecosistémicos hídricos de los pajonales altoandinos: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas*. Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica", Forest Trends, Lima, Perú.
- MUÑOZ, R. y T. CRISMAN (2019). *The role of Green Infrastructure in Water, Energy and Food Security in Latin America and the Caribbean*. Experiences, Opportunities and Challenges. Documento de Discusión 693, Banco Interamericano de Desarrollo.
- OCHOA-TOCACHI, Boris, BARDALES, Juan D., ANTIPIORTA, Javier, PÉREZ, Katya, ACOSTA, Luis, MAO, Feng, ZULKAFI, Zed, GIL-RÍOS, Junior, ANGULO, Oscar, GRAINGER, Sam, GAMMIE, Gena, DE BIÈVRE, Bert y Wouter BUYTAERT (2019). *Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security*. Nature sustainability. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0307-1>
- OFWAT (2022a). *Site-area based charging*. Consultado el 06/06/2022 en <https://www.ofwat.gov.uk/nonhouseholds/surface-water-drainage/site-area-based-charging/>
- OFWAT (2022b). *Surface water and highway drainage*. Consultado el 06/06/2022 en <https://www.ofwat.gov.uk/households/your-water-bill/surfacewaterdrainage/>
- OFWAT (2022c). *Reducing your surface water drainage charges* Consultado el 06/06/2022 en <https://www.ofwat.gov.uk/nonhouseholds/surface-water-drainage/reducing-your-surface-water/>
- OLIVER, E., OZMENT, S., SILVA, M., WATSON, G. y A. GRÜN WALDT (2021). *Soluciones basadas en la naturaleza en América Latina y el Caribe. Apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo*. Monografía 956, Banco Interamericano de Desarrollo.
- OLMEDO, María Augusta y Paulina GONZÁLEZ (2022). *Aguas subterráneas: el valor de lo invisible*. Publicación en el blog "Volvamos a la fuente". Consultado el 20/12/2022 en <https://blogs.iadb.org/agua/es/aguas-subterranas-el-valor-de-lo-invisible/>
- ORTEGA, L. (2006). *Los instrumentos económicos en la gestión del agua*. El caso de Costa Rica. Unidad de Energía y Recursos Renovables. Naciones Unidas - CEPAL.
- PALMA, A., PARKER, T. y R. CARMONA (2022). *Challenges and Experiences of Managed Aquifer Recharge in the Mexico City Metropolitan Area* in GroundWater 2022 Sep; 60(5): 675-684.
- RED DEL AGUA UNAM y SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO - SACMEX (2013). *Foro. La crisis del agua en la Ciudad de México: retos y soluciones*.
- SABESP (2021). *Sustainability Report*. Consultado el 06/06/2022 en https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_sustentabilidade/Sabesp_Relatorio_Sustentabilidade_2021_eng.pdf
- SACMEX (2022). *El 58% del agua que abastece a la Ciudad de México es subterránea*. Consultado el 07/11/2022 en https://twitter.com/SacmexCDMX/status/1506354973302755328?s=20&t=3_T39QlkBTWkXG2uHE-76Q
- SÁNCHEZ, Francisco (2022). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*. Consultado el 01/02/2022 en: https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf
- SÁNCHEZ, R. y G. ECKSTEIN (2017). *Aquifers Shared Between Mexico and the United States: Management Perspectives and Their Transboundary Nature*. Groundwater Vol. 55, No. 4 (pages 495-505)

- SCANLON, B.R., FAKHREDDINE, S., RATEB, A. et al. (2023) *Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future*. Nature Reviews Earth & Environment 4, 87-101.
- SEDAPAL (2021a). *Memoria Anual 2020*.
- SEDAPAL (2021b). Bases de datos remitidas mediante Carta N° 328-2021-ESG y Carta N° 340-2021-ESG como respuesta a solicitudes de acceso a la información pública.
- SEDAPAL (2022). *Estructura tarifaria vigente*. Consultada el 15/12/2022 en: <https://www.sedapal.com.pe/storage/objects/2-web-estructura-tarifaria-monitoreo-y-gestion-rgg-n-356-2022-gg-del-01082022-publica-da-02082022-2022082502221.pdf>
- SHIKLOMANOV, I. A. y J. RODDA (2003). *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambridge University Press.
- STIP, C., MAO, Z., BONZANIGO, L., BROWDER, G. y J. TRACY (2019). *Water Infrastructure Resilience - Examples of Dams, Wastewater Treatment Plants, and Water Supply and Sanitation Systems*. Sector note for LIFELINES: The Resilient Infrastructure Opportunity, World Bank, Washington, DC.
- STRAND, Jon (2010). *The Full Economic Cost of Groundwater Extraction*. The World Bank. Development Research Group. Environment and Energy Team. Washington D.C.
- SUNASS (2016). *Exposición de motivos de la Resolución de Consejo Directivo N° 007-2016-SUNASS-CD*. Consultado el 24/01/2023 en: <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/motivos-2016-003.pdf>
- SUNASS (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*. Lima, Perú.
- SUNASS (2021). *Estudio Tarifario de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL S.A.) 2022 - 2027*.
- THE NATURE CONSERVANCY (2022). *Groundwater: Our Most Valuable Hidden Resource*. Consultado el 13/01/2023 en <https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-insights/perspectives/groundwater-most-valuable-resource/>
- THE NATURE CONSERVANCY (2019). *Strategies for operationalizing nature-based solutions in the private sector*.
- TUINHOF, Albert; DUMARS, Charles; FOSTER, Stephen; KEMPER, Karin; GARDUÑO, Hector y Marcella NANNI (2010). *GW-MATE Briefing Note Series. Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools. Briefing Note 1 (Groundwater Resource Management: an introduction to its scope and practice)*. Global Water Partnership Associate Program. World Bank.
- UNESCO (2022). *GROUNDWATER: Making the invisible visible*. The United Nations World Water Development Report 2022.
- VAN DER GUN, Jac (2019). *The Global Groundwater Revolution*. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. Consultado el 01/06/2022 en <https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-632>
- WIJNEN, Marcus, AUGÉARD, Benedicte, HILLER, Bradley, WARD, Christopher y Patrick HUNTJENS (2012). *Managing the invisible: Understanding and Improving Groundwater Governance*. World Bank. Water Papers 71742. June 2012.
- WILLEMS, B., LEYVA-MOLINA, W.M., TABOADA-HERMOZA, R., BONNESOEUR, V., ROMÁN, F., OCHOA-TOCACHI, B.F., BUYTAERT, W. y D. WALSH (2021). *Impactos de andenes y terrazas en el agua y los suelos: ¿Qué sabemos? Resumen de políticas*. Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica", Forest Trends. Lima, Perú.
- WORLDWIDE HYDROGEOLOGIC MAPPING AND ASSESSMENT Program - WHYMAP (2008). *Groundwater Resources of the World*. Disponible en https://www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/Gwr/whymap_ed2008_25m.pdf?blob=publicationFile&v=5
- WWAP - UNESCO (PROGRAMA MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS 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*. Paris, UNESCO.
- ZEGARRA, Eduardo (2014). *Economía del agua: conceptos y aplicaciones para una mejor gestión*. Grupo de Análisis para el Desarrollo (GRADE), Lima - Perú.
- ZEGARRA, Eduardo (2018). *La gestión del agua desde el punto de vista del Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en el Perú: estudio de caso del valle de Ica*. Documentos de Proyectos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL.

6. ■

Anexos

Anexo 1.

La evolución del nivel estático de los pozos bajo ámbito de Sedapal (Lima, Perú).

Para el análisis de la evolución del nivel de los pozos operados por Sedapal, se utilizó una base de datos entregada por la empresa (Sedapal 2021b). Esta cuenta con información del nivel estático y nivel dinámico mensual para cada uno de los pozos, así como información de horas de bombeo y el distrito de ubicación.

Se optó por analizar el nivel estático promedio de los pozos a nivel de distrito, debido a que —a diferencia del nivel dinámico— este indicador es menos sensible a cambios temporales como el nivel de extracción mensual. Por definición, se espera que los cambios en el nivel estático de un pozo reflejen cambios de mediano o largo plazo, producto de las dinámicas de descarga y recarga del acuífero.

El siguiente cuadro presenta el nivel estático promedio de los pozos a nivel de distrito para cada año del periodo 2011-2020. Las últimas columnas presentan el cambio del nivel estático en metros, en porcentaje y el cambio en metros de manera anualizada.

Vale la pena reiterar que el nivel estático de los pozos en un distrito depende de factores tales como la cota topográfica y el patrón histórico de extracción de los pozos. Por este motivo, si bien el nivel en términos absolutos podría indicarnos algo sobre el nivel de explotación del recurso, el objetivo del presente ejercicio no es realizar comparaciones entre distritos sino analizar la evolución del nivel estático de los pozos en cada distrito a lo largo de la última década; es decir, analizar los cambios en el nivel estático en cada distrito.

■ ANEXO 1.

Evolución del nivel estático promedio de los pozos operados por Sedapal (2011 - 2020)

DISTRITO	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
ATE	38,3	35,5	33,2	32,6	29,9	31,4	30,6	31,0	33,3	32,4
BARRANCO	46,5	46,0	46,2	45,9	46,8	47,1	47,5	46,2	45,2	49,4
BELLAVISTA	19,2	19,7	20,5	20,4	23,1	24,6	24,7	21,9	24,5	23,8
CARMEN DE LA LEGUA	24,0	22,8	25,1	26,0	27,3	29,9	30,8	31,1	31,0	32,1
CALLAO	13,1	14,2	14,3	15,4	15,3	17,2	17,8	17,6	16,3	18,4
CARABAYLLO	15,0	15,3	15,9	16,3	15,4	19,6	15,8	15,6	16,2	17,4
CHACLACAYO	8,2	7,0	7,0	8,0	8,4	8,4	8,7	7,7	7,9	7,9
CHORRILLOS	24,4	23,3	22,0	21,8	22,1	23,2	23,7	24,2	24,7	25,6
CIENEGUILLA	7,6	8,9	8,7	9,2	8,8	9,8	9,9	10,3	11,5	10,9
COMAS	12,0	13,0	13,3	14,1	12,9	13,3	15,7	13,7	13,8	14,4
EL AGUSTINO	31,3	30,4	24,8	25,9	26,8	27,3	24,4	25,1	28,5	29,4
LA MOLINA	59,0	57,7	57,7	57,0	56,6	56,4	58,1	58,7	62,6	58,2
LA PUNTA	3,6	3,0	4,2	2,3	2,6	4,2	3,1	3,5	3,7	5,2
LIMA	57,0	56,3	56,7	57,2	56,7	58,7	57,4	55,9	59,2	61,0
LINCE	84,6	84,1	84,5	82,2	S.l.	83,8	86,0	86,0	87,1	86,8
LOS OLIVOS	14,2	13,8	14,6	17,3	17,4	17,9	18,9	16,2	16,8	11,7
LURIGANCHO - CHOSICA	11,9	12,4	12,5	13,3	13,2	14,7	14,9	14,9	16,1	14,7
LURIN	5,6	5,0	5,6	6,2	8,3	8,1	9,7	9,0	9,4	9,9
MIRAFLORES	64,2	62,5	62,1	62,0	61,9	63,1	65,4	65,0	66,6	68,3
PACHACAMAC	5,5	6,1	6,7	7,2	7,1	8,8	10,1	9,9	11,4	10,9
PUCUSANA	74,0	74,8	75,5	75,6	77,6	76,2	77,4	76,6	76,5	78,9
PUEBLO LIBRE	53,6	53,4	54,0	53,2	53,6	55,4	54,9	55,0	55,8	56,1
PUENTE PIEDRA	7,2	8,5	8,8	10,1	10,0	10,0	11,7	11,1	11,6	11,6
SAN MARTIN DE PORRES	22,3	25,9	23,5	24,6	24,6	27,7	22,6	25,9	25,4	29,0
SAN BORJA	84,9	83,3	83,5	82,5	85,5	82,2	83,7	82,6	83,6	82,2
SAN ISIDRO	74,4	73,5	73,7	74,6	75,2	72,8	76,1	75,0	75,4	77,1
SAN MIGUEL	36,3	36,3	36,8	36,7	36,7	38,3	38,8	38,5	38,3	39,9
SANTA ANITA	42,1	42,4	42,4	43,9	46,3	46,0	46,9	46,4	47,7	48,2
SAN JUAN DE LURIGANCHO	31,8	27,1	31,6	32,0	30,3	31,0	29,8	29,4	33,6	34,4
SURCO	61,1	61,8	59,6	61,9	62,8	61,8	63,4	63,4	64,6	64,1
SURQUILLO	68,3	69,2	68,9	71,7	71,3	73,1	73,4	73,1	74,8	75,1

(continuación)

DISTRITO	CAMBIO 2011-20 (METROS)	CAMBIO 2011-20 (%)	CAMBIO ANUAL (METROS/AÑO)
ATE	6,0	-16%	▲ 0,7
BARRANCO	-2,9	6%	▼ -0,3
BELLAVISTA	-4,7	24%	▼ -0,5
CARMEN DE LA LEGUA	-8,1	34%	▼ -0,9
CALLAO	-5,4	41%	▼ -0,6
CARABAYLLO	-2,4	16%	▼ -0,3
CHACLACAYO	0,3	-4%	■ 0,0
CHORRILLOS	-1,1	5%	▼ -0,1
CIENEGUILLA	-3,3	44%	▼ -0,4
COMAS	-2,4	20%	▼ -0,3
EL AGUSTINO	2,0	-6%	▲ 0,2
LA MOLINA	0,8	-1%	▲ 0,1
LA PUNTA	-1,6	44%	▼ -0,2
LIMA	-4,1	7%	▼ -0,5
LINCE	-2,3	3%	▼ -0,3
LOS OLIVOS	2,5	-17%	▲ 0,3
LURIGANCHO - CHOSICA	-2,8	24%	▼ -0,3
LURIN	-4,3	76%	▼ -0,5
MIRAFLORES	-4,1	6%	▼ -0,5
PACHACAMAC	-5,4	98%	▼ -0,6
PUCUSANA	-4,8	7%	▼ -0,5
PUEBLO LIBRE	-2,5	5%	▼ -0,3
PUENTE PIEDRA	-4,4	61%	▼ -0,5
SAN MARTIN DE PORRES	-6,7	30%	▼ -0,7
SAN BORJA	2,6	-3%	▲ 0,3
SAN ISIDRO	-2,7	4%	▼ -0,3
SAN MIGUEL	-3,6	10%	▼ -0,4
SANTA ANITA	-6,1	15%	▼ -0,7
SAN JUAN DE LURIGANCHO	-2,6	8%	▼ -0,3
SURCO	-3,0	5%	▼ -0,3
SURQUILLO	-6,8	10%	▼ -0,8

Fuente: Información enviada por Sedapal (2021b). Elaboración propia.

Anexo 2.

Extracciones de aguas subterráneas como porcentaje de la captación total de agua en empresas de ALC

PAÍS	EMPRESA	PORCENTAJE DE CAPTACIÓN (%)	CONEXIONES
Argentina	Agua y Saneamientos Argentinos	13,96	2.253.952
Argentina	Agua y Saneamiento Mendoza	36,28	347.306
Argentina	Compañía Salteña de Agua y Saneamiento	61,09	318.866
Bolivia	EPSAS	14,36	429.794
Bolivia	SAGUAPAC	100,00	248.476
Bolivia	SELA	95,35	82.404
Bolivia	SEMAPA (Cochabamba)	30,07	76.466
Bolivia	COSAALT	38,40	41.212
Brasil	SABESP	6,00	9.840.000
Brasil	Aguas de Juturnaiba	0,14	83.368
Chile	Aguas Andinas	19,46	1.238.598
Chile	ESSBIO	52,00	737.943
Chile	ESVAL	55,34	440.142
Chile	Nuevo Sur	94,54	258.574
Chile	Empresa de Servicios Sanitarios de los Lagos	68,14	233.561
Chile	Aguas Araucanía	72,17	215.902
Chile	Aguas del Valle	67,17	194.067
Chile	SMAPA	100,00	179.409
Chile	Aguas de Antofagasta	1,95	123.830
Chile	Aguas del Altiplano	100,00	113.115
Chile	Aguas Chañar	100,00	92.718
Chile	Aguas Cordillera	13,47	57.522
Chile	Aguas Magallanes	0,00	51.917
Chile	Aguas Décima	0,00	43.127
Chile	Aguas Patagonia de Aysén	0,00	28.344
Costa Rica	AyA	64,58	667.752
Costa Rica	Empresa de Servicios Públicos de Heredia	99,74	73.162
Ecuador	EPMAPS	1,50	650.007
Ecuador	Interagua (Guayaquil)	0,27	558.472
México	SACMEX	58,00	2.000.000
Panamá	IDAAN	5,90	672.159
Perú	Sedapal	18,98	1.586.330
Perú	SEDAPAR	12,80	323.264
Perú	SEDALIB	47,96	186.596
Perú	EPS Tacna	33,38	97.063

(continuación)

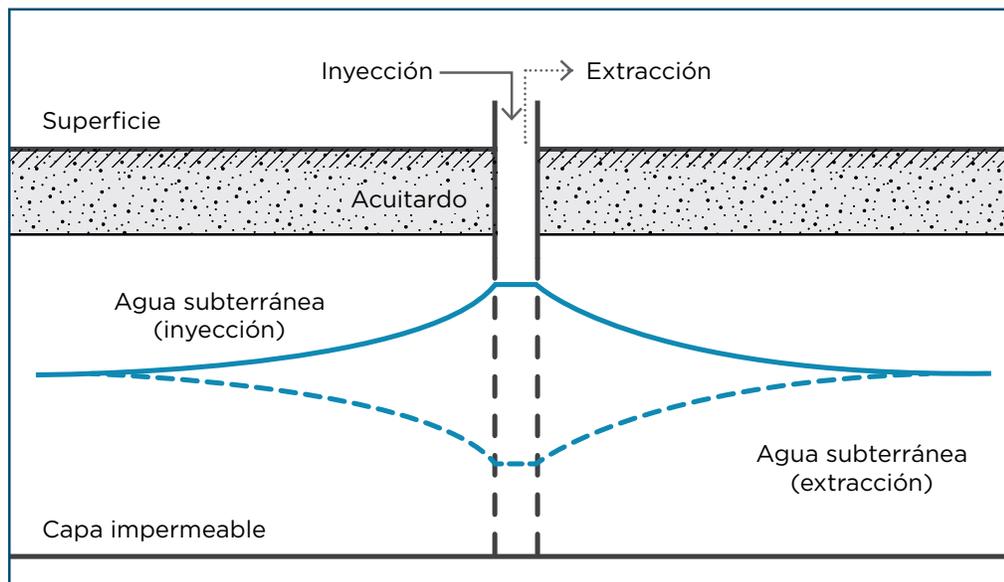
PAÍS	EMPRESA	PORCENTAJE DE CAPTACIÓN (%)	CONEXIONES
Perú	Sedaloreto	0,00	95.358
Perú	Sedacusco	60,14	94.036
Perú	Sedachimbote	64,84	92.278
Perú	Sedaayacucho	0,00	62.858
Perú	Sedajuliaca	0,00	58.986
Perú	Emapica	100,00	58.148
Perú	Semapach	86,46	52.101
Perú	Emapa San Martín	0,00	50.416
Perú	Agua Tumbes	34,18	47.522
Perú	Sedacaj	0,00	46.314
Perú	Seda Huánuco	24,53	44.920
Perú	Emsapuno	2,43	43.798
Perú	Emapa Cañete	73,91	39.364
Perú	EPS Chavín	0,00	32.183
Perú	Emapacop	29,83	31.722
Perú	Aguas de Lima Norte	100,00	31.505
Perú	EPS Ilo	0,00	27.214
Perú	EPS Selva Central	9,18	26.902
Perú	Emapisco	100,00	25.707
Perú	EPS Moquegua	25,55	23.310
Perú	EPS Barranca	44,99	19.344
Perú	EMAPAT	0,00	19.289
Perú	Emapa Huaral	61,84	18.716
Perú	Empssapal	0,00	17.377
Perú	Emusap Abancay	100,00	17.087
Perú	Moyobamba	0,00	15.055
Perú	Emapa Pasco	0,00	12.967
Perú	Emapa Huancavelica	0,00	10.917
Perú	Emapavig	97,42	9.300
Perú	Epssmu	22,55	8.753
Perú	Emaq	0,00	8.369
Perú	Emusap Amazonas	0,00	8.333
Perú	Aguas del Altiplano	0,00	7.407
Perú	EPS Rioja	0,00	7.288
Perú	Emsap Chanka	100,00	5.637
Perú	Emapab	0,00	5.580
Perú	Emapa Y	0,00	5.480
Perú	Emsapa Calca	100,00	4.560
Perú	Emsapa Yauli	100,00	3.537
Uruguay	OSE	10,82	1.171.730

Fuente: Aderasa - Sunass (2021), SACMEX (2022), SABESP (2021). Elaboración propia.

Anexo 3.

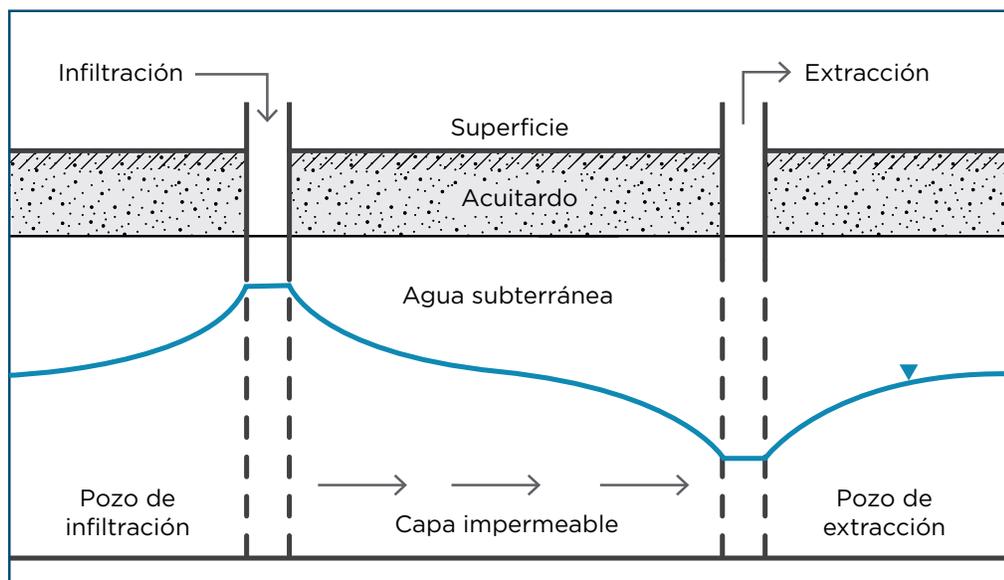
Representación gráfica de los principales métodos de MAR

Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR)

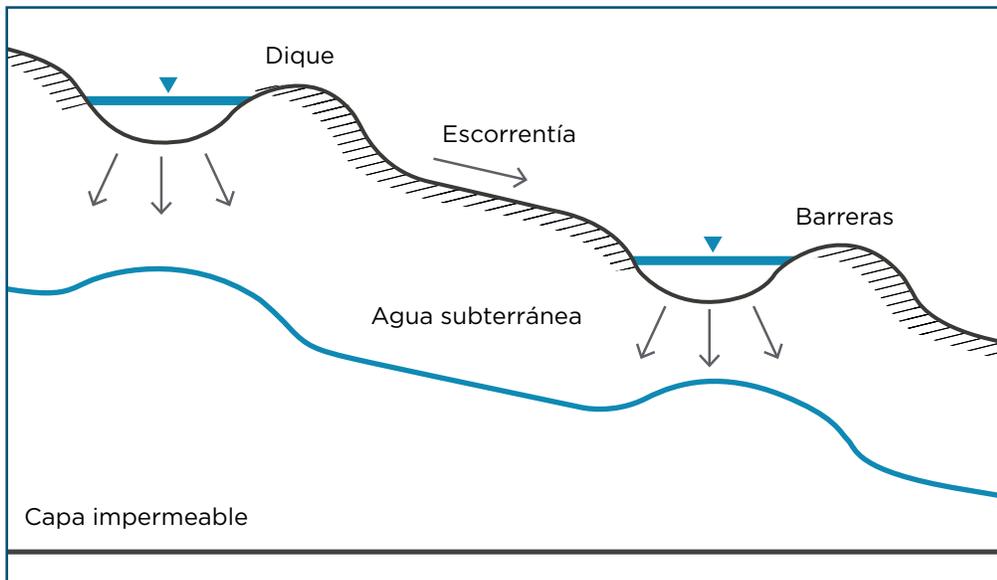


Fuente: INOWAS (2022)

Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR)

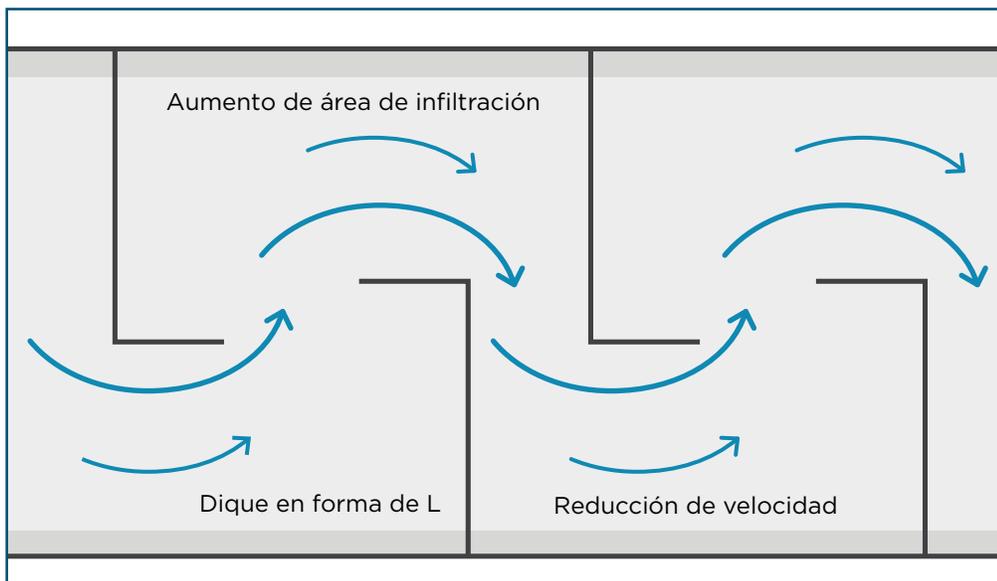


Barreras y diques



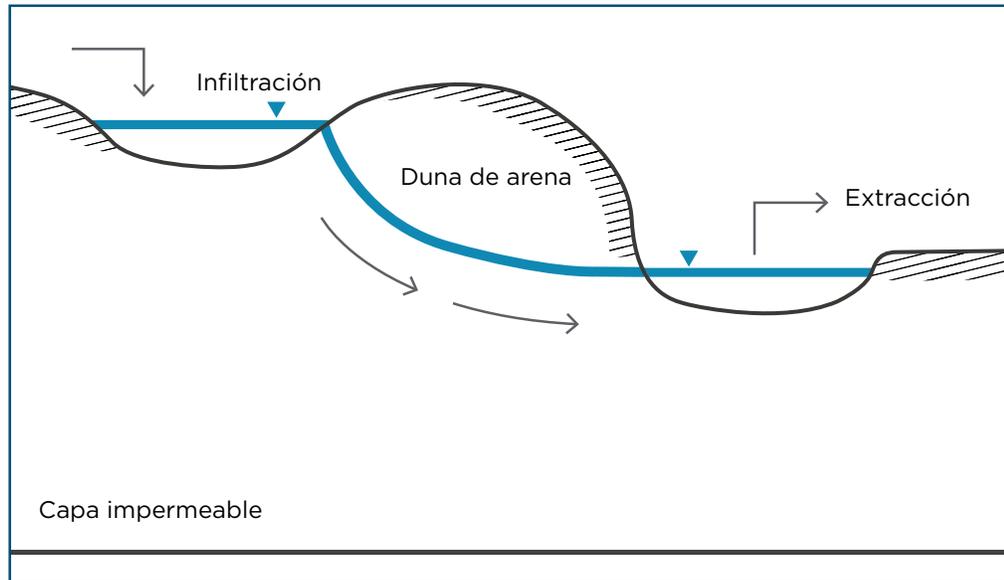
Fuente: INOWAS (2022)

Dispersión de cauces



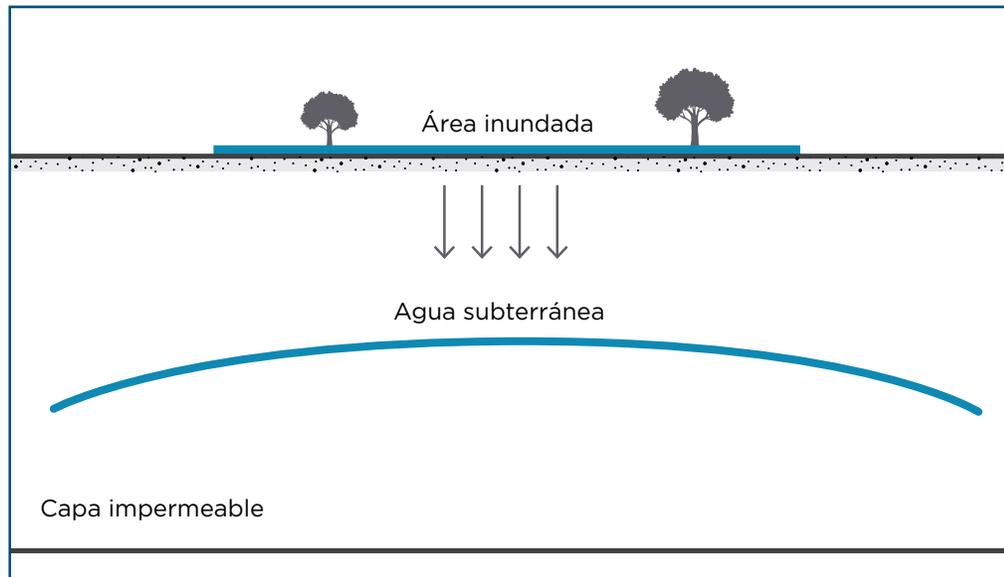
Fuente: INOWAS (2022)

Filtración interdunar



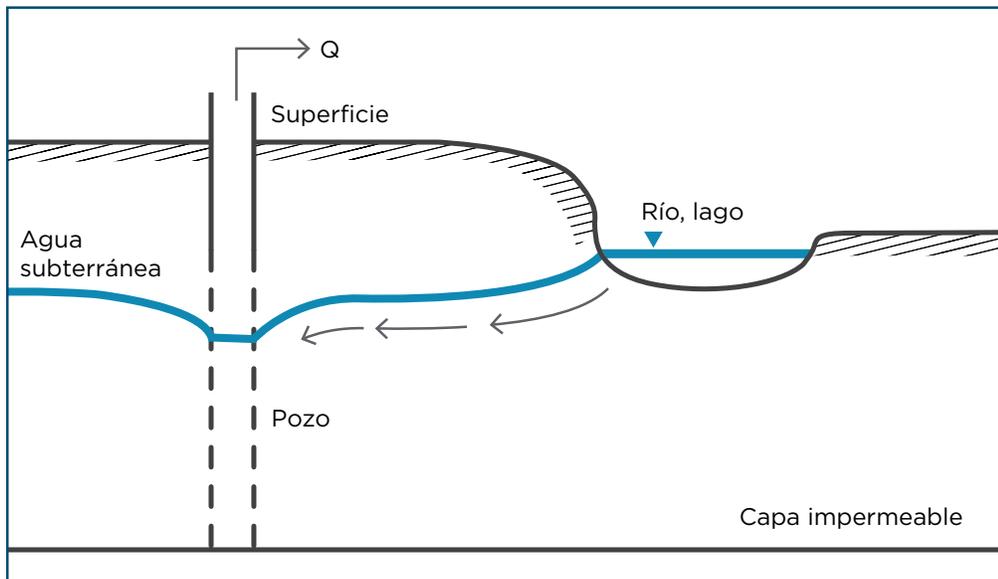
Fuente: INOWAS (2022)

Inundación controlada



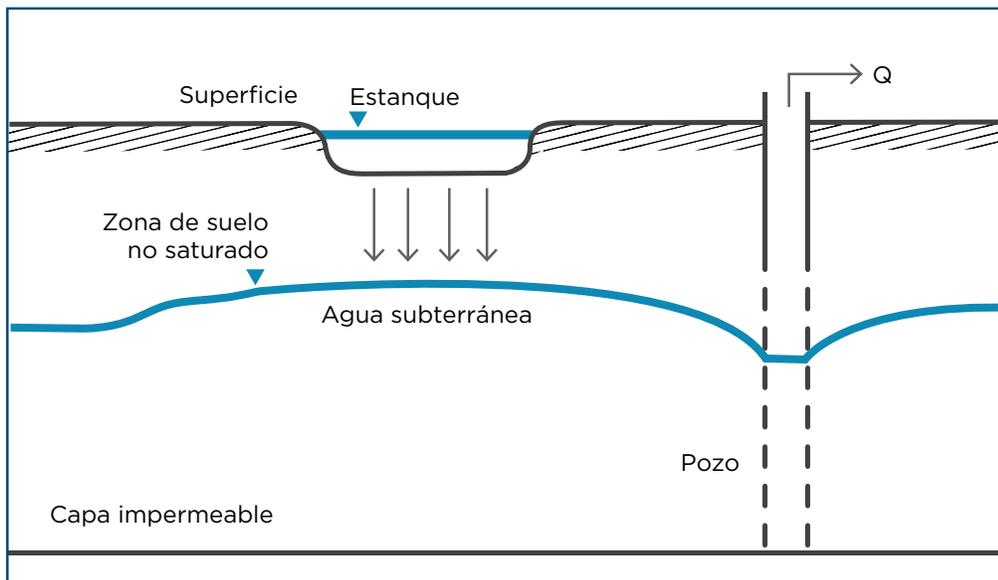
Fuente: INOWAS (2022)

Filtración inducida



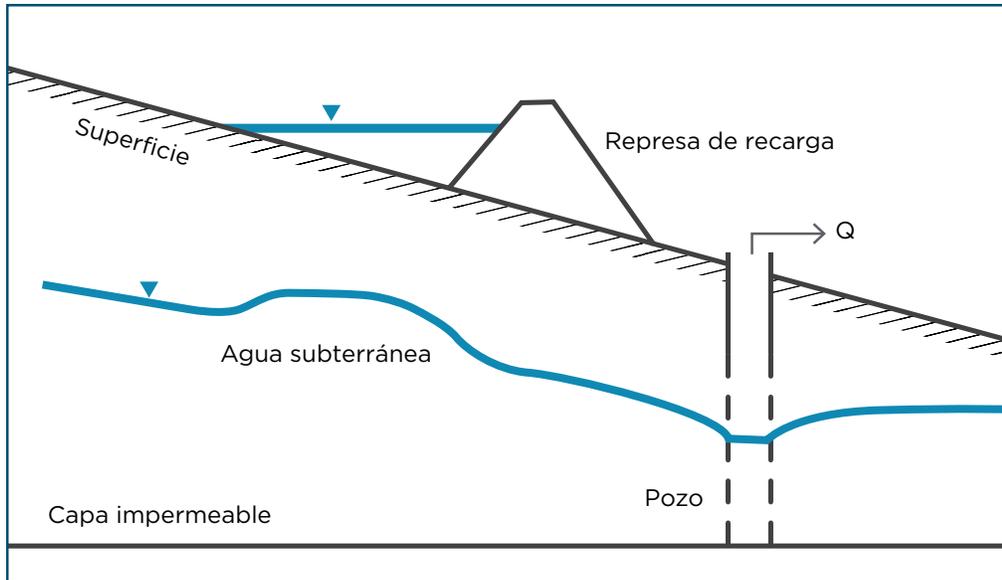
Fuente: INOWAS (2022)

Estanques de infiltración



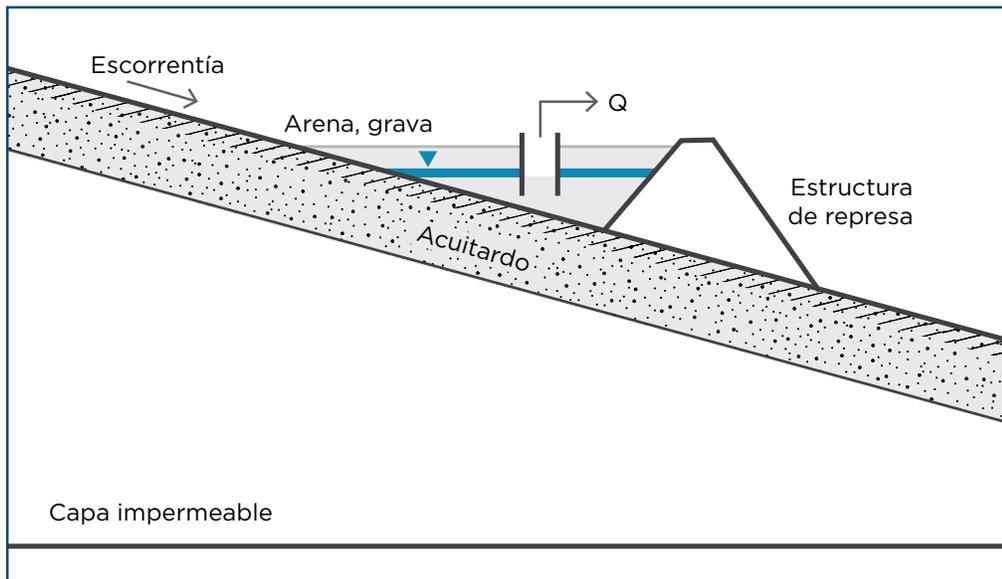
Fuente: INOWAS (2022)

Estanques de percolación



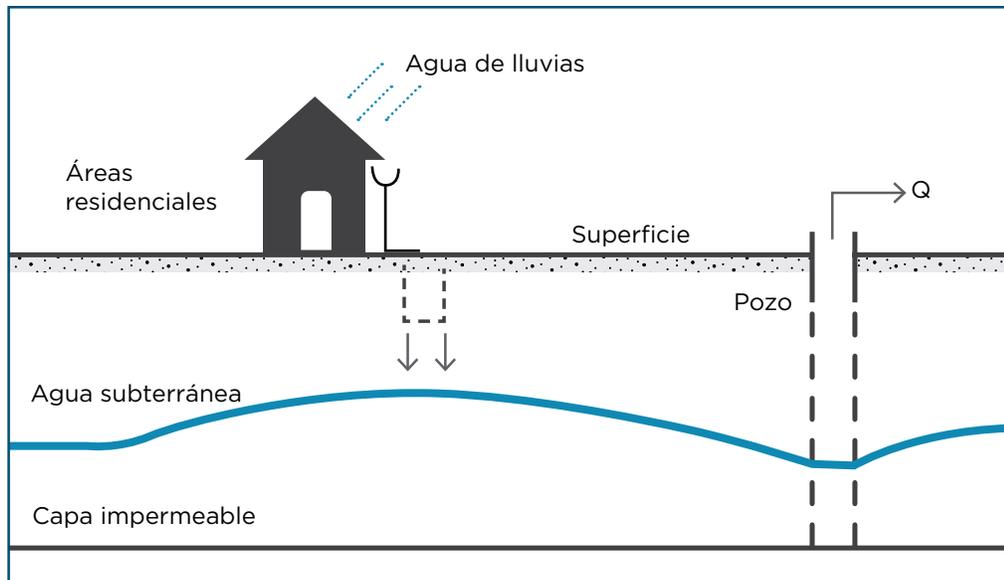
Fuente: INOWAS (2022)

Represas de arena



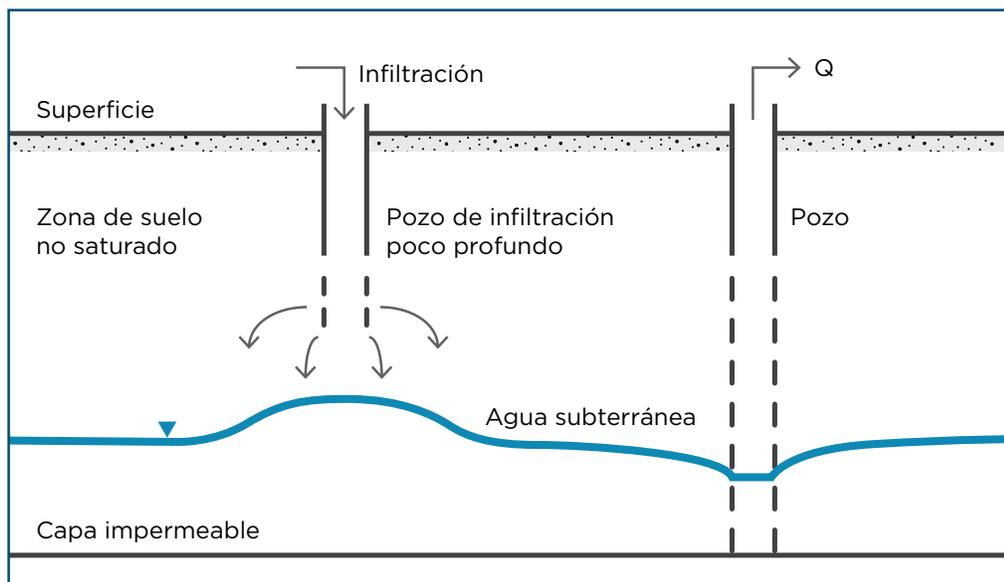
Fuente: INOWAS (2022)

Cosecha de aguas de lluvia en tejados



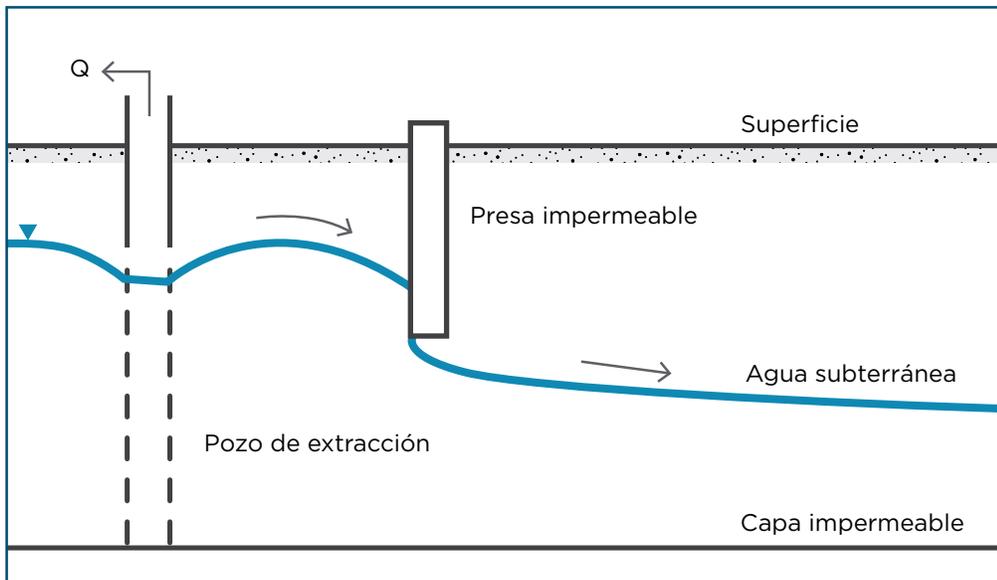
Fuente: INOWAS (2022)

Pozo poco profundo / eje / fosa de infiltración



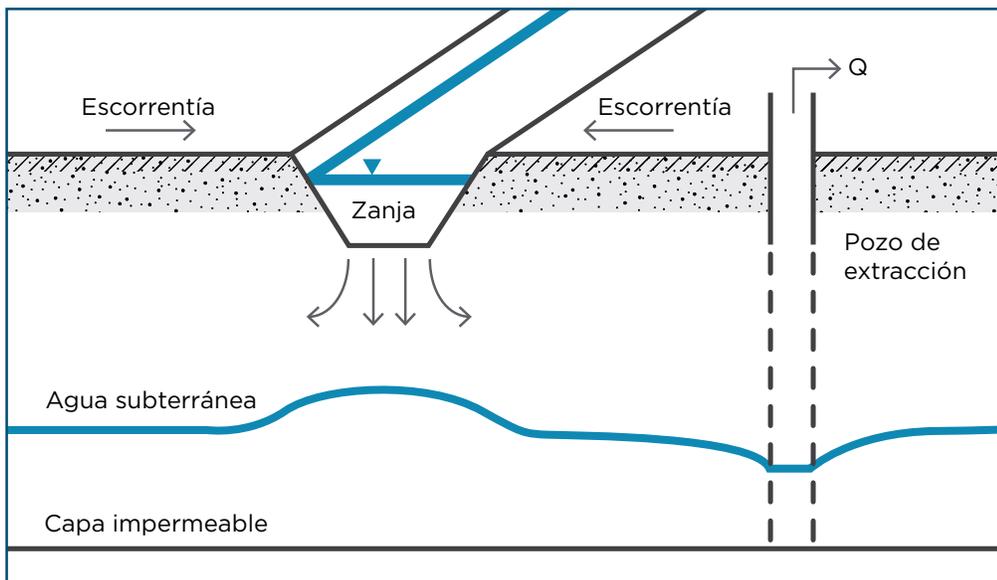
Fuente: INOWAS (2022)

Represas subsuperficiales



Fuente: INOWAS (2022)

Zanjas



Fuente: INOWAS (2022)

