

# Importancia de las aguas subterráneas y experiencias chilena y extranjera sobre su gestión

Casos de Chile, México, Europa, Asia, Estados Unidos de América, Reino Unido, Nueva Zelanda y Etiopía

## Autor

Eduardo Baeza G.  
Email: ebaeza@bcn.cl  
Tel.: (56) 32 226 3902

## Comisión

Elaborado para la Comisión  
de Recursos Hídricos.

Nº SUP: 124.394

## Resumen

El agua subterránea es la fuente más abundante de agua dulce en la superficie terrestre, alcanzando un 97% del agua dulce no congelada. Corresponde al 30,28% de la reserva global física disponible de agua. Estas son parte importante del ciclo del agua y base de la seguridad hídrica. De ahí, que su explotación y uso debe ser respetando el criterio de sustentabilidad.

Los estudios y conocimiento permanente de estas aguas en las cuencas son relevantes, desde una mirada integral que de sustento a una mejor toma de decisiones en cuanto a las estrategias y planes eficientes orientados a cuidar las aguas subterráneas.

Los nuevos enfoques y mejoras en la gestión integral, la sustentabilidad ambiental, la gobernanza, los modelos y métodos parecen ser la respuesta a la problemática del deterioro cuantitativo y cualitativo de estos recursos, que deben involucrar a todas las partes interesadas en el uso de estas aguas, lo que es coincidente en la mayoría de los continentes y países analizados en este trabajo (Europa, Asia, Estados Unidos de América, Reino Unido, Nueva Zelanda y Etiopía), salvo México que tiene una mirada más convencional, de carácter administrativo, poco integral y ajena a la hidrogeología moderna. En Chile en cambio, las aguas subterráneas no han sido abordadas suficientemente por la legislación y los gestores de recursos hídricos.

En resumen, la sólida comprensión del funcionamiento de los sistemas de aguas subterráneas y sus interacciones con numerosos factores externos interconectados es una base indispensable para una gestión informada y más eficiente.

## Introducción

---

En el presente informe se presentan antecedentes relativos a la importancia de las aguas subterráneas. Además, se realiza una descripción general de las estrategias y prácticas de la gestión de las aguas subterráneas en algunos continentes y países como Chile, México, Europa, Asia, Estados Unidos de América, Reino Unido, Nueva Zelanda y Etiopía para su protección y cuidado.

En la elaboración de este documento se recurrió a diversas fuentes contenidas en bases de datos científicas internacionales, universidades, centros de investigación y otros.

## Importancia de las aguas subterráneas

---

### Generalidades sobre las aguas subterráneas

Según el *International Groundwater Resources Assessment Centre* (IGRAC) de la UNESCO, el agua subterránea es la fuente más abundante de agua dulce en la superficie terrestre, alcanzando un 97% del agua dulce no congelada. Corresponde al 30,28% de la reserva global física disponible de agua, mientras que las aguas superficiales solo representan el 0,31% de estas reservas (lagos, lagunas, ríos, arroyos, presas, entre otros). Por otra parte, en la actualidad, según la UNESCO, al menos la mitad de la población mundial depende del agua subterránea, la cual se distribuye para: a) uso doméstico (22%), b) irrigación y ganadería (67%) y c) industria y minería (11%) (Hatch, 2018)<sup>1</sup>.

De acuerdo a Kresic (2009)<sup>2</sup>, el requisito principal desde la perspectiva de gestión y restauración de recursos es considerar el agua subterránea como parte de un sistema interconectado. La hidrogeología tradicional por lo general se ha centrado en un acuífero como unidad de estudio, tomando menos atención a las interacciones entre los acuíferos<sup>3</sup>, acuitardos<sup>4</sup> y las características del agua superficial en el área de interés. Sin embargo, las grandes extracciones de agua de un solo acuífero pueden afectar los acuíferos adyacentes y las aguas superficiales, lo que logra un cambio en el balance hídrico.

### Importancia del recurso y problemas que enfrenta

Según Edwards (2010)<sup>5</sup>, la calidad de los suelos, aguas subterráneas y sedimentos se ha convertido en un importante factor que contribuye a determinar dónde ubicamos casas, escuelas, hospitales, oficinas, pozos, instalaciones industriales, plazas, entre otros, y donde los agricultores siembran cultivos y pastan ganado. Se ha reconocido que el suelo, las aguas subterráneas y los sedimentos son recursos valiosos que, una vez degradados, pueden afectar a: la calidad de vida, salud de las personas, la economía, y

---

<sup>1</sup> Hatch Kuri, G. (2018). Capítulo 7. Agua Subterránea en México, retos y pendientes para la transformación de su gestión. Disponible en: <http://bcn.cl/2ds5e> (abril de 2020).

<sup>2</sup> Kresic, N. (2009). *Groundwater resources. Sustainability, management, and restoration*. New York: McGraw-Hill (McGraw-Hill's Access Engineering). Disponible en: <http://bcn.cl/22cez> (abril de 2020).

<sup>3</sup> Acuífero es una estructura geológica subterránea que al estar totalmente saturada, es apta para el almacenaje y transmisión de agua en abundancia.

<sup>4</sup> Acuitardos: Formación geológica capaz de almacenar agua, pero cuya conductividad hidráulica es relativamente pequeña, por lo que transmite con lentitud el agua que contiene en sus poros y la cede tan lentamente que no puede por sí misma abastecer debidamente los pozos, aunque permite una recarga de acuíferos.

<sup>5</sup> Edwards, B. (2010). *Soil, groundwater and sediment quality criteria in Ontario. A history of their development from the 1970s to December 2009: technical report*. edit. for Environmental Commissioner of Ontario. Toronto Ont.: Environmental Commissioner of Ontario. Disponible en: <http://bcn.cl/22lkt> (abril de 2020).

los ecosistemas. A modo de referencia, en la década de 1970, el gobierno de Ontario (Canadá) desarrolló leyes y políticas que han reducido o eliminado las descargas de sustancias que pueden degradar estos recursos. Además, han guiado el manejo de suelos degradados, aguas subterráneas y sedimentos. El desarrollo de criterios de calidad ha tenido un papel fundamental en el progreso logrado.

El agua subterránea es un recurso indispensable en muchas partes del mundo, donde se utiliza para el consumo doméstico, el riego y la industria. Su uso creciente, y a menudo intensivo, durante el último medio siglo ha creado problemas y suscitado inquietudes debido al agotamiento potencial de los acuíferos locales, la degradación de la calidad del agua y diversos peligros geológicos, como la subsidencia<sup>6</sup> de la tierra y los sumideros (Findikakis y Sato, 2013)<sup>7</sup>.

Por otro lado, el agua subterránea es una parte esencial del ciclo del agua y un recurso crítico para una fracción de la población mundial. En un planeta donde la demanda de agua subterránea y otros recursos aumenta, las cuestiones de cantidad y calidad del agua subterránea son un foco importante en muchas regiones. Problemas relativos a la cantidad de agua subterránea incluyen la sostenibilidad decreciente del agua subterránea a largo plazo, las relaciones entre agua subterránea y función del ecosistema, etc. En cuanto a los problemas de calidad del agua se incluyen aquellos debidos a la sobreexplotación del agua subterránea y los efectos de la contaminación producto de algunas actividades económicas (industria del petróleo y el desarrollo de recursos minerales, entre otros) (Luczaj y Blaney, 2016)<sup>8</sup>.

El agua subterránea tiene la capacidad de equilibrar las oscilaciones en la precipitación y tiene el potencial de complementar los recursos hídricos de superficie cuando están cerca de los límites de la sostenibilidad del ecosistema, como por ejemplo durante periodos de sequía. Si bien las aguas subterráneas son fundamentales para mantener el suministro de agua, estos importantes recursos son vulnerables al aumento de las actividades humanas y las inciertas consecuencias del cambio climático. Las evaluaciones de los servicios de agua subterránea, los beneficios y los riesgos son importantes para los usos sostenibles del agua subterránea bajo condiciones de cambio climático. Dado lo anterior, el agua subterránea es considerada una de las vías de adaptación al cambio climático (Taniguchi y Hiyama, 2014)<sup>9</sup>.

## Estado global de las aguas subterráneas

---

El monitoreo actual del estado global del agua subterránea está lejos de ser adecuado y, en comparación con las aguas superficiales. El agua subterránea se ha beneficiado solo de forma limitada con el uso de las nuevas tecnologías de teledetección, con las cuales se realiza dicho monitoreo. Esto se debería a que los modelos hidrológicos globales emplean caracterizaciones simplistas de los sistemas de agua

---

<sup>6</sup> Proceso de hundimiento vertical de una cuenca sedimentaria como consecuencia del peso de los sedimentos que se van depositando en ella de una manera progresiva.

<sup>7</sup> Findikakis, A. and Sato, K. (2013). *Groundwater Management Practices*. Hoboken: Taylor and Francis (IAHR Monographs). Disponible en: <http://bcn.cl/22ce1> (abril de 2020).

<sup>8</sup> Luczaj, J. and Blaney, D. (2016): *Groundwater Quantity and Quality*. Disponible en: <http://bcn.cl/22cf9> (abril de 2020).

<sup>9</sup> Taniguchi, M. and Hiyama, T. (eds.) (2014). *Groundwater as a key for adaptation to changing climate and society* (Global environmental studies). Disponible en: <http://bcn.cl/22ckx> (abril de 2020).

subterránea, junto con numerosas suposiciones y aproximaciones poco verificables de las características y el comportamiento del agua subterránea (Margat y van der Gun, 2013)<sup>10</sup>.

Según Grogan y Wisser (2017)<sup>11</sup>, el agotamiento de los acuíferos subterráneos en todo el mundo se ha convertido en una preocupación importante, ya que el agua subterránea es una fuente de agua de riego importante y a menudo insostenible. Al mismo tiempo, el campo de la gestión de los recursos hídricos ha visto un animado debate sobre los conceptos y métricas utilizados para evaluar la reutilización aguas abajo de la escorrentía agrícola, y la mayoría de los estudios se centran en los equilibrios de las aguas superficiales. Al juntar estas dos líneas de investigación se reconoce que el agotamiento de los acuíferos se debe a que grandes cantidades de agua subterránea ingresan a los depósitos de agua superficial y fluye a través de la escorrentía agrícola.

En la agricultura, el agua subterránea ha proporcionado beneficios al riego agrícola en países semiáridos de la OCDE, pero su uso intensivo más allá de la recarga es un problema, ya que en ciertas regiones se ha agotado este recurso y generado externalidades ambientales negativas significativas (OECD, 2015)<sup>12</sup>.

De acuerdo a Strand (2010)<sup>13</sup>, cuando una gran cantidad de agricultores explota una cuenca de agua subterránea, de manera independiente, se generan pocos incentivos para la práctica de conservación del recurso a nivel comunitario. Por otra parte, cuando los agricultores pagan menos que el costo total real de la electricidad utilizada para el bombeo de aguas subterráneas, este problema puede empeorar (menos incentivos de conservación); mientras que el problema puede aliviarse algo racionando el suministro de electricidad. Una respuesta a lo anterior, plantea un esquema óptimo para determinar el precio de la electricidad utilizada para bombear agua subterránea que incorpore el costo de la externalidad producto del bombeo de aguas subterráneas.

Algunos estudios han llamado a incrementar la eficiencia del riego como una solución a la escasez de agua. Al respecto, se determinó que con un 100% de eficiencia de riego, la demanda mundial de aguas subterráneas insostenibles se reduce en un 52%, pero no se elimina. En muchas cuencas, el aumento de la eficiencia del riego conduce a una disminución significativa de los caudales de los ríos. Estos hallazgos ilustran que las estimaciones del agotamiento del acuífero solo subestiman la importancia de las aguas subterráneas para mantener los sistemas de agua superficial y la agricultura de riego (Grogan y Wisser, 2017)<sup>14</sup>.

---

<sup>10</sup> Margat, J.; van der Gun, J. (2013). Groundwater around the world. A geographic synopsis. London: CRC Press. Disponible en: <http://bcn.cl/2ds0u> (abril de 2020).

<sup>11</sup> Grogan, D.; Wisser, D. et al. (2017). The use and re-use of unsustainable groundwater for irrigation. A global budget. United States. Washington D.C., Oak Ridge Tenn. Disponible en: <http://bcn.cl/22cl4> (abril de 2020).

<sup>12</sup> OECD (2015). Drying Wells, Rising Stakes. Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use. Paris: OECD Publishing (OECD Studies on Water). Disponible en: <http://bcn.cl/22ckj> (abril de 2020).

<sup>13</sup> Strand, J. (2010). The full economic cost of groundwater extraction. Washington D.C. (World Bank e-Library). Disponible en: <http://bcn.cl/22cks> (abril de 2020).

<sup>14</sup> Op. cit. Grogan, D.; Wisser, D. et al. (2017). The use and re-use of unsustainable groundwater for irrigation. A global budget. United States. Washington D.C., Oak Ridge Tenn.

En un estudio realizado en Florida, USA (Chang, 2010)<sup>15</sup>, se planteó que los manantiales son relevantes y particularmente en el río Wekiva se reveló que este conforma un sistema alimentador de manantiales asociado con una red de posiblemente 23 manantiales conectados hacia el acuífero floridano. En efecto, mantener la recarga de aguas subterráneas para el acuífero es un factor clave para la viabilidad del suministro hídrico regional. Estudios y modelos aplicados permitieron identificar las áreas de recarga y descarga hacia y desde, respectivamente, el acuífero, así como demostrar las disminuciones de las descargas de los manantiales debido a la creciente urbanización, con el inevitable aumento del uso de agua y cambios extensivos en el uso de la tierra. Lo anterior ha alterado la cantidad y también la calidad de las aguas que fluyen hacia los manantiales.

## Enfoques actuales de gestión y gobernanza de las aguas subterráneas

Los principios de la Gestión Integrada de Aguas Subterráneas deberían abarcar (Jakeman *et al.*, 2016)<sup>16</sup>:

1. una visión general de las dimensiones (hidrológicas, sociales, económicas y otras) y los requisitos de la gestión del agua subterránea;
2. la escala de las aguas subterráneas y sus vínculos con otros sectores, principalmente la energía y el cambio climático;
3. la gobernanza del agua subterránea con respecto a los principios, instrumentos e instituciones disponibles para la gestión integrada;
4. las limitaciones biofísicas y la capacidad y el papel de la ciencia hidroecológica e hidrogeológica, incluidas las preocupaciones sobre la calidad del agua;
5. las herramientas necesarias, tales como: modelos, infraestructuras de datos, sistemas de apoyo a la toma de decisiones y gestión de la incertidumbre.

El manejo del agua subterránea es una de las principales prioridades de la humanidad. Se ha convertido en un recurso en gran medida no renovable que está sobreexplotado en muchas partes del mundo. El enfoque del manejo debería estar en comprender integralmente el estado actual del recurso de agua subterránea y restablecer el equilibrio en los acuíferos en riesgo. Existen muchas dimensiones interrelacionadas para gestionar el agua subterránea de manera efectiva. Es decir, un enfoque integrado del agua subterránea involucra muchos factores más allá del acuífero mismo, como las aguas superficiales, el uso del agua, la calidad del agua y la eco-hidrología. Una gestión integrada efectiva también debe involucrar a la comunidad, en concreto a la mayoría de las partes interesadas para desarrollar y apoyar políticas y otras herramientas socioeconómicas necesarias para realizar una gestión integrada efectiva (Jakeman *et al.*, 2016)<sup>17</sup>.

Por otro lado, para promover el concepto de gestión sostenible del agua para mitigar los efectos de la urbanización sobre las aguas subterráneas se deben considerar los desafíos y oportunidades de la ciencia, la tecnología y las políticas relacionadas con este tipo de gestión. En este sentido, se hace

<sup>15</sup> Chang, N. (2010). *Effects of Urbanization on Groundwater. An Engineering Case-Based Approach for Sustainable Development*. Reston: American Society of Civil Engineers. Disponible en: <http://bcn.cl/22c3s> (abril de 2020).

<sup>16</sup> Jakeman, A.; Barreteau, O.; Hunt, R.; Rinaudo, J.; Ross, A. (2016). *Integrated Groundwater Management. Concepts, Approaches and Challenges*. Disponible en: <http://bcn.cl/22ceh> (abril de 2020).

<sup>17</sup> Op. cit Jakeman, A.; Barreteau, O.; Hunt, R.; Rinaudo, J.; Ross, A. (2016). *Integrated Groundwater Management. Concepts, Approaches and Challenges*.

necesario integrar aspectos relativos al suministro de agua (oferta y demanda), la prevención de la contaminación, el manejo de aguas pluviales con tecnologías de infiltración regionales, el tratamiento y eliminación de aguas residuales con eliminación de nutrientes y el desarrollo de tecnologías de bajo impacto, en general (Institute, Environmental and Water Resources; Committee, Urbanization Effects on Groundwater Task, 2010)<sup>18</sup>.

En cuanto a la gobernanza del agua subterránea, ésta va en aumento a nivel mundial. La buena gestión de los recursos hídricos subterráneos supone la participación activa de todos los interesados pertinentes, que van desde las instituciones gubernamentales con mandato hasta los usuarios finales de las aguas subterráneas y aquellos que valoran los ecosistemas relacionados con las aguas subterráneas. Las personas involucradas en esta materia tienen diferentes niveles de conocimiento, no obstante, una comprensión básica común de las aguas subterráneas, las oportunidades y problemas que ofrece es un requisito previo para una comunicación fructífera que conduzca a decisiones y acciones adecuadas (Margat y van der Gun, 2013)<sup>19</sup>.

Como ya se ha mencionado, el agua subterránea es un recurso esencial, que requiere un manejo efectivo para garantizar el acceso continuo a suministros de agua limpios, accesibles y abundantes. Al respecto, se han desarrollado diversos modelos sobre el flujo de las aguas subterráneas y el transporte de solutos para fines predictivos; a objeto de desarrollar los recursos hídricos subterráneos, considerando la interacción del agua superficial y subterránea, además de la intrusión de agua salada, remediando luego este recurso por medios físicos, químicos y biológicos (Institute, Environmental and Water Resources; Committee, Groundwater Management Technical, 2011)<sup>20</sup>.

## **Experiencia extranjera en materia de gestión de aguas subterráneas**

---

### **Chile:**

De acuerdo a Bravo (2015)<sup>21</sup>, las aguas subterráneas en el país no han sido consideradas adecuadamente en la legislación y de parte de gestores de recursos hídricos, aun cuando forman parte de un ciclo hidrológico único y están estrechamente interrelacionadas con las aguas superficiales. Aunque esta tendencia ha experimentado algunas variaciones en los últimos años, el tratamiento legislativo y administrativo de las aguas subterráneas sigue siendo precario. Esta situación ha dificultado el aprovechamiento y la gestión del recurso, que aunque físicamente oculto a nuestros ojos, se vuelve cada vez más visible en tiempos de sequía y escasez hídrica.

---

<sup>18</sup> Institute, Environmental and Water Resources; Committee, Urbanization Effects on Groundwater Task (2010). Effects of urbanization on groundwater. An engineering case-based approach for sustainable development. edit. por Environmental and Water Resources Institute, Groundwater Council y Groundwater Hydrology Committee. Reston Va.: American Society of Civil Engineers. Disponible en: <http://bcn.cl/22c3s> (abril de 2020).

<sup>19</sup> Op. Cit. Margat, J.; van der Gun, J. (2013). Groundwater around the world. A geographic synopsis. London: CRC Press.

<sup>20</sup> Institute, Environmental and Water Resources; Committee, Groundwater Management Technical (eds.) (2011). Groundwater quantity and quality management. En colaboración con M. M. Aral und Stewart Warren Taylor. Reston Va.: American Society of Civil Engineers. Disponible en: <http://bcn.cl/22ced> (abril de 2020).

<sup>21</sup> Bravo, D. (2015). Diagnóstico jurídico de las aguas subterráneas. Disponible en: <http://bcn.cl/2ds57> (abril de 2020).

Como una forma de abordar la precariedad en la materia, en el año 2013 fue publicado el Decreto N° 203, que presenta el Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas, donde el Ejecutivo reconoce la necesidad de reglamentar la exploración y explotación de aguas subterráneas y otorgar certeza jurídica y técnica a los usuarios en un contexto de sustentabilidad y eficacia, pero sin afectar el ejercicio de derechos constituidos sobre las mismas aguas. Además, se plantea la necesidad de profundizar ciertos conceptos técnicos y de incorporar otros nuevos para enfrentar la diversidad de aristas que se presentan en este tema (Bravo, 2015)<sup>22</sup>.

### **México:**

En México, la gestión del agua subterránea es una atribución del Poder Ejecutivo Federal y la Ley de Aguas Nacionales (LAN). Para su ordenamiento y gestión fueron creadas 653 divisiones territoriales administrativas denominadas “acuíferos” que, junto a las 731 cuencas hidrológicas, son la base de la política hídrica nacional. Esta noción de carácter administrativo es uno de los aspectos relevantes en la gestión doméstica del agua subterránea, pues la delimitación geográfica no obedece a criterios geológicos o naturales; al contrario, son de carácter convencional y estrictamente administrativos. Además, ese enfoque no se condice con la hidrogeología moderna, donde los acuíferos poseen una forma tridimensional y no sólo están caracterizados por una extensión en el plano horizontal (Hatch, 2018)<sup>23</sup>.

### **Europa:**

Con la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea se ha hecho obligatorio el logro de un buen estado ecológico de las aguas superficiales y un buen estado cuantitativo y cualitativo del agua subterránea. La DMA lo llama gestión combinada de agua superficial y subterránea, con evaluación de la influencia de la cantidad y calidad del agua subterránea sobre la ecología del agua superficial. Los impactos adversos de la extracción de aguas subterráneas sobre la disminución de flujos en los cursos de agua definen un límite para los recursos hídricos subterráneos explotables. En esta materia, en los últimos años, se han hecho esenciales los modelos cada vez más sofisticados para analizar el comportamiento de las cuencas de manera integrada (aguas superficiales, aguas subterráneas, aspectos ecológicos y económicos, impactos de intervenciones humanas, entre otros) (Henriksen, 2008)<sup>24</sup>.

### **Asia:**

Según Shrestha (2016)<sup>25</sup>, el agua subterránea contribuye al desarrollo sostenible de muchas ciudades asiáticas al proporcionar agua para usos domésticos, industriales, agrícolas y para regular los flujos de los ecosistemas. Sin embargo, las aguas subterráneas no siempre se han manejado adecuadamente, lo que a menudo ha resultado en el agotamiento y la degradación del recurso. La actualización del

---

<sup>22</sup> Op. Cit. Bravo, D. (2015). Diagnóstico jurídico de las aguas subterráneas.

<sup>23</sup> Op. Cit. Hatch Kuri, G. (2018). Capítulo 7. Agua Subterránea en México, retos y pendientes para la transformación de su gestión.

<sup>24</sup> Henriksen, H. et al. (2008). Groundwater science and policy. An international overview. En colaboración con Ph. Quevauviller. Cambridge: RSC Publishing. Disponible en: <http://bcn.cl/22bna> (abril de 2020).

<sup>25</sup> Shrestha, S. et al. (2016). Groundwater environment in Asian Cities. Concepts, methods and case studies. En colaboración con Sangam Shrestha, Vishnu Prasad Pandey, Binaya Raj Shivajoti und Shashidhar Thatikonda. Oxford: Butterworth-Heinemann. Disponible en: <http://bcn.cl/22cdq> (abril de 2020).

conocimiento científico sobre el medio ambiente del agua subterránea en varias ciudades asiáticas (Bangkok, Beijing, Bishkek, Delhi, Dili, Ho Chi Minh, entre otras) ha sido fundamental, ya que ha permitido obtener detalles sobre los acuíferos subterráneos, la hidrogeología, el estado del agua subterránea, los impactos sobre el agua subterránea y las respuestas (tecnología, políticas, institucionales, etc.) implementadas en las ciudades del estudio. Los antecedentes señalados permiten comprender las similitudes y diferencias sobre el estado del desarrollo y uso del agua subterránea en cada ciudad. Lo anterior es una referencia para formular planes de mitigación de problemas relacionados con las aguas subterráneas e implementar estrategias de desarrollo sostenible en el futuro.

### **Estados Unidos de América:**

Job (2010)<sup>26</sup> señala que desde el oeste de los Estados Unidos hasta el subcontinente indio, los problemas del agua siempre han sido de índole económico. Las aguas subterráneas varían considerablemente en profundidad, calidad, accesibilidad y disponibilidad. Se ha propuesto la evaluación económica y el análisis costo/beneficio para el uso actual y futuro, protección, remediación y conservación de las aguas subterráneas. En ese contexto, se deben considerar en este enfoque la demanda de agua subterránea, las variables ecosistémicas para la extracción del recurso, la aplicación de políticas y decisiones sobre aguas subterráneas y la sustentabilidad del agua subterránea. También incluir factores micro y macroeconómicos, consideraciones transfronterizas, cambio climático y la aceptación social.

En el acuífero Sparta de Louisiana (Estados Unidos de América) se ha aplicado el modelo de gestión conjuntiva desarrollado por el MILFP (Método de programación fraccional lineal entera mixta) propuesto por Mani y Tsai (2016)<sup>27</sup> a objeto de maximizar la relación entre el uso de agua subterránea y el uso de agua de un yacimiento. También, se adoptó el promedio Bayesiano<sup>28</sup> para cuantificar la incertidumbre de escorrentías futuras y de afluencia de yacimientos debido a las proyecciones climáticas futuras inciertas. Finalmente, los resultados del modelo de manejo conjuntivo indicaron que el futuro reservorio de agua, incluso con un nivel de probabilidad acumulado de entrada baja, del 2,5%, podría contrarrestar la reducción de bombeo de agua subterránea para satisfacer las demandas y mejorar el acuífero Sparta, de lo contrario se debe restringir el uso de agua subterránea.

En la subcuenca Sierra Vista (Arizona), Gungle (2017)<sup>29</sup> demostró mediante monitoreos de 20 años que el uso sostenible del agua subterránea requería asegurar, como mínimo, una tasa estable de descarga de agua subterránea y, por lo tanto, el flujo base en el río San Pedro. Muchos de los indicadores utilizados se relacionan con efectos a largo o corto plazo en el flujo de base y proporcionan un medio para evaluar la descarga de aguas subterráneas y el flujo base en el río San Pedro. Los monitoreos incluyeron indicadores de subestaciones, indicadores del sistema ribereño, indicadores del Río San

<sup>26</sup> Job, C. (2010). *Groundwater economics*. Boca Raton: CRC Press. Disponible en: <http://bcn.cl/22cei> (abril de 2020).

<sup>27</sup> Mani, A.; Tsai, F. *et al.* (2016). *Conjunctive management of surface and groundwater resources under projected future climate change scenarios*. Oak Ridge National Laboratory; United States. Washington D.C., Oak Ridge Tenn. Disponible en: <http://bcn.cl/22ckf> (abril de 2020).

<sup>28</sup> Se refiere al enfoque bayesiano, es decir que se basa en la interpretación subjetiva de la probabilidad de ocurrencia de un evento.

<sup>29</sup> Gungle, B. (2017). *Hydrological conditions and evaluation of sustainable groundwater use in the Sierra Vista subwatershed, upper San Pedro basin, southeastern Arizona. United States*; Nature Conservancy (U.S.); Geological Survey (U.S.) (Scientific investigations report). Disponible en: <http://bcn.cl/22ce4> (abril de 2020).



Pedro e indicadores de resortes. Lo anterior permitió definir las acciones de manejo de aguas subterráneas, incluida la retirada voluntaria del bombeo de riego en la subcuenca. Entre 2002 y 2012, por ejemplo, dio como resultado una reducción en el uso humano neto del recurso hídrico y un aumento de la población de la subcuenca.

Por otra parte, la deposición de determinadas fracciones de finos (partículas finas) en el entorno de los pozos de inyección y en las balsas de infiltración, ambas instalaciones de recarga artificial de acuíferos, afecta las propiedades hidrogeológicas del medio, tales como la permeabilidad. La utilización de métodos analíticos y numéricos ha permitido cuantificar los efectos que los procesos de colmatación sobre las formaciones permeables y corregirlas (Ortiz e Iglesias, 2012)<sup>30</sup>.

### **Reino Unido:**

El Reino Unido es un país con más de 150 años de explotación generalizada de sus principales acuíferos para el suministro público de agua. Las demandas crecientes, una mayor conciencia de las presiones ambientales y una legislación con mayores exigencias han generado la necesidad de crear modelos cuantitativos para predecir los impactos del uso de las aguas subterráneas. Lo anterior culminó en un programa único nacional dirigido por el regulador en Inglaterra y Gales para desarrollar modelos conceptuales y numéricos de los principales acuíferos de roca madre. La recolección de documentos entregó un contraste entre los enfoques basados en la práctica y la investigación para evaluar y predecir los impactos antropogénicos y las presiones ambientales sobre las aguas subterráneas. Con esto se han proporcionado muchos conocimientos sobre cómo el uso regular de los modelos de aguas subterráneas puede abordar los desafíos ambientales del futuro (Geological Society, 2012)<sup>31</sup>.

### **Nueva Zelanda:**

Bekesi y Hodges (2006)<sup>32</sup> señalaron que en Otago, Nueva Zelanda, las aguas superficiales (ríos, arroyos y humedales) son Ecosistemas Dependientes de Aguas Subterráneas (EDAS) de importancia. El bombeo de pozos en la región puede agotar el agua en los EDAS. La mayor parte de los recursos hídricos superficiales en la región ya estaban asignados y se requería reconocer el fuerte vínculo hidráulico entre el agua superficial y el agua subterránea, además de la implementación de una política de manejo hídrico. Para abordar el problema, se desarrolló un método simplificado que aporta una relación numérica entre el ritmo de bombeo en el pozo y la distancia entre el pozo y el cuerpo de agua superficial, más allá de la cual el agotamiento no se considera significativo. Una zona de amortiguamiento basada en la distancia mínima se coloca alrededor de los EDAS y los derechos de explotación de aguas subterráneas, dentro de la zona de amortiguamiento, lo que está sujeto a reglas estrictas. En concreto, los candidatos que deseen extraer agua de los pozos emplazados en la zona de

---

<sup>30</sup> Ortiz, G. e Iglesias, A. (2012). Investigación y cuantificación de los procesos de colmatación en las operaciones de recarga artificial de acuíferos mediante balsas de infiltración y pozos de inyección. Madrid. Disponible en: <http://bcn.cl/22ckl> (abril de 2020).

<sup>31</sup> Geological Society (2012). *Groundwater resources modelling. A case study from the UK*. En colaboración con M. G. Shepley. London: Geological Society (Geological Society special publication). Disponible en: <http://bcn.cl/22cdn> (abril de 2020).

<sup>32</sup> Bekesi, G. and Hodges, S. (2006). *The protection of groundwater dependent ecosystems in Otago, New Zealand*. En: *Hydrogeology Journal* 14 (8), pág. 1696–1701. DOI: 10.1007/s10040-006-0062-z. Disponible en: <http://bcn.cl/22cdx> (abril de 2020).

amortiguamiento necesitarán elaborar el estudio de impacto ambiental de la actividad propuesta en el EDAS.

### **Etiopía:**

En Etiopía el conocimiento predominante de los recursos de aguas subterráneas se basó por mucho tiempo en el marco geológico y estratigráfico, pero gracias a la investigación geo-científica sustancial desde los años 70, se ha creado un nuevo conjunto de datos geológicos / estratigráficos que ayudan a redefinir la comprensión de los recursos de agua subterránea en África en general y en Etiopía en particular y de esta manera mejorar su gestión. Por ejemplo, se demostró que los sedimentos aluviales lacustres sueltos, que se conocían como menos extensos, albergaban los recursos de agua subterránea más voluminosos en Etiopía. En general, los nuevos enfoques en el estudio de las aguas subterráneas han permitido conocer su potencial a nivel cualitativo y cuantitativo (Kebede, 2013)<sup>33</sup>.

### **Iniciativa internacional**

---

En respuesta a la preocupación por el estado de las aguas subterráneas a nivel mundial, el Programa Hidrológico Internacional (IHP por sus siglas en inglés) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) inició el proyecto GRAPHIC<sup>34</sup> (evaluación de recursos de aguas subterráneas bajo las presiones de la humanidad y el cambio climático) en 2004. GRAPHIC busca mejorar la comprensión de cómo interactúan las aguas subterráneas dentro del ciclo global del agua, apoyan los ecosistemas y la humanidad y, a su vez, responden a las presiones de las actividades humanas y el cambio climático. Para lograr con éxito estos objetivos dentro de un contexto global, GRAPHIC se desarrolló para incorporar un esfuerzo colaborativo y un soporte para la investigación y educación internacional.

El proyecto GRAPHIC se diseñó teniendo en cuenta que los recursos de aguas subterráneas pueden tener respuestas no lineales a las condiciones atmosféricas asociadas con el cambio climático y/o las condiciones de la superficie terrestre asociadas con las actividades humanas. Por lo tanto, las evaluaciones de las aguas subterráneas bajo las presiones asociadas de las actividades humanas y el cambio y variabilidad climática implican la exploración de las interacciones entre sistemas complejos. Además, extiende las investigaciones más allá de las interacciones físicas, químicas y biológicas para incluir sistemas humanos de gestión de recursos y políticas gubernamentales.

La estructura del proyecto GRAPHIC se dividió en temas, métodos y regiones. Los temas abarcan (i) cantidad de agua subterránea (recarga, descarga y almacenamiento), (ii) calidad y (iii) aspectos de gestión. En el marco de GRAPHIC se están aplicando una variedad de métodos y herramientas científicas, que incluyen análisis de datos de campo, geofísica, geoquímica, paleohidrología, teledetección (en particular gravimetría satelital GRACE), sistemas de información, modelado y simulación. GRAPHIC se compone de componentes regionales (África, Asia y Oceanía, Europa, América Latina, el Caribe y América del Norte) donde se han identificado y llevado a cabo estudios de casos.

<sup>33</sup> Kebede, S. (2013). *Groundwater in Ethiopia. Features, numbers and opportunities*. Berlin, New York: Springer (Springer hydrogeology). Disponible en: <http://bcn.cl/22hd2> (abril de 2020).

<sup>34</sup> Disponible en: <http://bcn.cl/2ds2a>

### Nota aclaratoria

Asesoría Técnica Parlamentaria está enfocada en apoyar preferentemente el trabajo de las Comisiones Legislativas de ambas Cámaras, con especial atención al seguimiento de los proyectos de ley. Con lo cual se pretende contribuir a la certeza legislativa y a disminuir la brecha de disponibilidad de información y análisis entre Legislativo y Ejecutivo.



Creative Commons Atribución 3.0  
(CC BY 3.0 CL)