

RELATORÍA

# La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos:

aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo  
(2º edición)

17.05 al 04.06 de 2021

***Juan María Fornés Azcoiti***

Coordinador del Curso  
Científico titular  
Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

# TABLA DE CONTENIDO

## Introducción

1. Los recursos hídricos y la interacción entre aguas superficiales y subterráneas: nociones básicas, situación global del agua en el mundo y, de modo particular, en los países latinoamericanos
2. Visión de conjunto de los proyectos de cooperación en materia de agua y saneamiento. Agua y saneamiento en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El agua como derecho humano. Objetivos de un programa de agua y saneamiento
3. Nociones y conceptos básicos sobre las aguas subterráneas y su funcionamiento
4. Estudios previos a realizar en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua. Sistemas de perforación de pozos. Captación de aguas de manantial
5. Problemas relacionados con la cantidad y calidad de las aguas subterráneas: explotación intensiva, fuentes de contaminación puntual y difusa. Normas e indicadores de calidad según los usos. Protección de las aguas subterráneas: perímetros de protección
6. Agua, saneamiento e higiene. Tratamientos convencionales para la obtención de agua potable. Enfermedades relacionadas con el agua y saneamiento. Fomento de prácticas de higiene
7. Guatemala: Proyecto Aldea de los González Palestina de los Altos Quetzaltenango / México: Proyecto de saneamiento de las zonas marginadas del Valle de la Sabana en el estado de Guerrero / Lista de comprobación. Orientaciones para el cumplimiento de los Derechos Humanos al agua y al saneamiento en proyectos
8. Sahara Occidental: Proyecto Aqua-Sahara de Abastecimiento de agua potable a los campamentos de refugiados saharauis
9. Ecuador: Caracterización y gestión del acuífero Manglaralto (Santa Elena) para el abastecimiento de comunidades rurales
10. Conclusiones
11. Recomendaciones

# **La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos: aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo (2ª edición)**

## **Introducción**

Las aguas subterráneas son esenciales en muchos proyectos de cooperación relacionados con el abastecimiento y saneamiento debido a sus características específicas, como su mayor accesibilidad, mayor inercia y mejor calidad química que las aguas superficiales. De ahí que presenten un enorme interés, sobre todo en pequeñas poblaciones diseminadas y alejadas de otras posibles fuentes de abastecimiento. Esta es la razón por la que muchos abastecimientos a núcleos de población en desarrollo, se basan en captaciones de manantiales o pozos excavados, que en muchas ocasiones no están bien diseñados, dimensionados o protegidos frente a la contaminación. Por tanto, además de conseguir una cantidad suficiente de agua para uso doméstico, es igual de importante todo lo relacionado con la buena calidad del agua e higiene personal, y la adecuada gestión colectiva del recurso.

Los beneficiarios finales de esta actividad son aquellas poblaciones que presentan problemas en el abastecimiento doméstico de agua, tanto desde el punto de vista de la cantidad como de la calidad. El agua subterránea puede ser un recurso estratégico en zonas donde no existen cursos fluviales o lagos de agua dulce que puedan ser fuente de suministro a la población. De ahí que la formación hidrogeológica de las personas que trabajan en entidades e instituciones directamente relacionadas con la gestión integral del agua, repercutirá de modo favorable en las condiciones de vida de los colectivos más empobrecidos y vulnerables, que en muchos casos son comunidades indígenas.

Este curso titulado “La importancia de las aguas subterráneas en la gestión integrada de los recursos hídricos: aplicaciones prácticas en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo”, es el primero de un total de cinco actividades que integran el Programa “Las aguas subterráneas como recurso estratégico para el abastecimiento a núcleos de población”, aprobado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) en noviembre de 2020, y que se desarrollará a lo largo de 2021 y 2022. Se trata de una segunda edición del curso celebrado los días 20 a 24 de noviembre de 2017, en el Centro de Formación de la Cooperación Española en La Antigua (Guatemala), cuyo contenido quedó recogido en la correspondiente Relatoría. Esta actividad, al igual que en el caso de la primera edición, ha sido coordinada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en colaboración con la AECID.

El curso, de 30 horas lectivas, se ha desarrollado en la modalidad online, desde el 17 de mayo hasta el 4 de junio de 2021. Han asistido 50 participantes, seleccionados de un total de 150 preinscritos, provenientes de 12 países hispanoamericanos (Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Perú, República Dominicana y Uruguay) y dos organismos internacionales (UICN y UNICEF).

Aunque procedentes de diferentes disciplinas profesionales (hidrogeólogos, ingenieros, analistas, cooperativistas, economistas, académicos, etc.), todos ellos compartían experiencia en la gestión de programas de cooperación y desarrollo relacionados con el agua.

Las sesiones, fueron impartidas por los siguientes ponentes: Carlos Fernández-Jáuregui (Water Assessment & Advisory Global Network), Luis Javier Lambán (Instituto Geológico y Minero de España), José Luis Armayor (Consultor en Hidrogeología), Francisco Javier Montalván (Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador) y Juan María Fornés (Instituto Geológico y Minero de España, coordinador del curso).

En cuanto a la metodología, el curso se ha organizado en tres módulos. Cada módulo se ha desarrollado a lo largo de una semana: los lunes y martes se han impartido tres sesiones, y los viernes se han reservado para tener reuniones de todos los ponentes y participantes, en las que se han planteado dudas y cuestiones de interés relacionadas con los temas tratados en cada módulo.

Los ponentes enviaron, con antelación a su exposición oral, sus temas respectivos para que estuvieran “colgados” en la plataforma Moodle, y así facilitar que los participantes pudieran acceder a sus contenidos antes de su presentación a través de la plataforma Teams. Dichas presentaciones fueron convenientemente grabadas por el equipo de apoyo del Centro de Formación de la Cooperación Española en Santa Cruz de la Sierra (Bolivia), y posteriormente añadidas a la plataforma Moodle. Los coloquios de los viernes también fueron grabados y puestos a disposición de los asistentes al curso.

Para enriquecer los conocimientos de los asistentes, se proporcionaron 19 documentos, entre informes, libros y artículos de interés, para que pudieran ser consultados y adquiridos por todos desde la plataforma Moodle.

Los módulos en los que se ha estructurado el curso contienen los siguientes temas:

**Módulo 1: Visión de conjunto de los recursos hídricos. Nociones básicas. El agua y el saneamiento en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).**

1. Los recursos hídricos y la interacción entre aguas superficiales y subterráneas: nociones básicas, situación global del agua en el mundo y, de modo particular, en los países latinoamericanos.
2. Visión de conjunto de los proyectos de cooperación en materia de agua y saneamiento. Agua y saneamiento en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El agua como derecho humano. Objetivos de un programa de agua y saneamiento.
3. Nociones y conceptos básicos sobre las aguas subterráneas y su funcionamiento.

**Módulo 2: Aspectos concretos a tener en cuenta en proyectos de cooperación internacional para el desarrollo.**



4. Estudios previos a realizar en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua. Sistemas de perforación de pozos. Captación de aguas de manantial.
5. Problemas relacionados con la cantidad y calidad de las aguas subterráneas: explotación intensiva, fuentes de contaminación puntual y difusa. Normas e indicadores de calidad según los usos. Protección de las aguas subterráneas: perímetros de protección.
6. Agua, saneamiento e higiene. Tratamientos convencionales para la obtención de agua potable. Enfermedades relacionadas con el agua y saneamiento. Fomento de prácticas de higiene.

### **Módulo 3: Casos prácticos.**

7. Guatemala: Proyecto Aldea de los González Palestina de los Altos Quetzaltenango / México: Proyecto de saneamiento de las zonas marginadas del Valle de la Sabana en el estado de Guerrero / Lista de comprobación. Orientaciones para el cumplimiento de los Derechos Humanos al agua y al saneamiento en proyectos.
8. Sahara Occidental: Proyecto Aqua-Sahara de Abastecimiento de agua potable a los campamentos de refugiados saharauis.
9. Ecuador: Caracterización y gestión del acuífero Manglaralto (Santa Elena) para el abastecimiento de comunidades rurales.

Entre los objetivos de este curso, se encuentra el brindar un conocimiento adecuado del funcionamiento de las aguas subterráneas, así como su relación con las aguas superficiales y con el medio ambiente, a fin de evitar problemas de mala gestión como la sobreexplotación y la contaminación de acuíferos, lo que permitirá garantizar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad adecuadas para el sustento y desarrollo de las poblaciones, manteniendo y protegiendo el medio ambiente.

Los conocimientos que se van a impartir en esta actividad puedan ser útiles en la toma de decisiones, tanto de las ONGs locales que desarrollan proyectos de cooperación, como de los gestores del agua especialmente relacionados con las aguas subterráneas. Y todo en armonía con la política de aguas de los diferentes países. El objetivo principal, por tanto, es dar a conocer las potencialidades del agua subterránea a personas involucradas en el diseño e implementación de proyectos de cooperación internacional para el desarrollo.

En cuanto al perfil requerido a las personas participantes, se ha concedido prioridad a:

1. Gestores del agua o responsables de la Administración pública del agua, que tengan competencias en el suministro de este recurso en comunidades indígenas, o en zonas que tengan dificultad en el abastecimiento de agua para la población.

2. Profesionales que trabajen en ONGs locales relacionadas con proyectos de cooperación internacional en materia de agua y saneamiento.
3. Población local que esté involucrada en la gestión colectiva del agua subterráneas de sus respectivas comunidades.

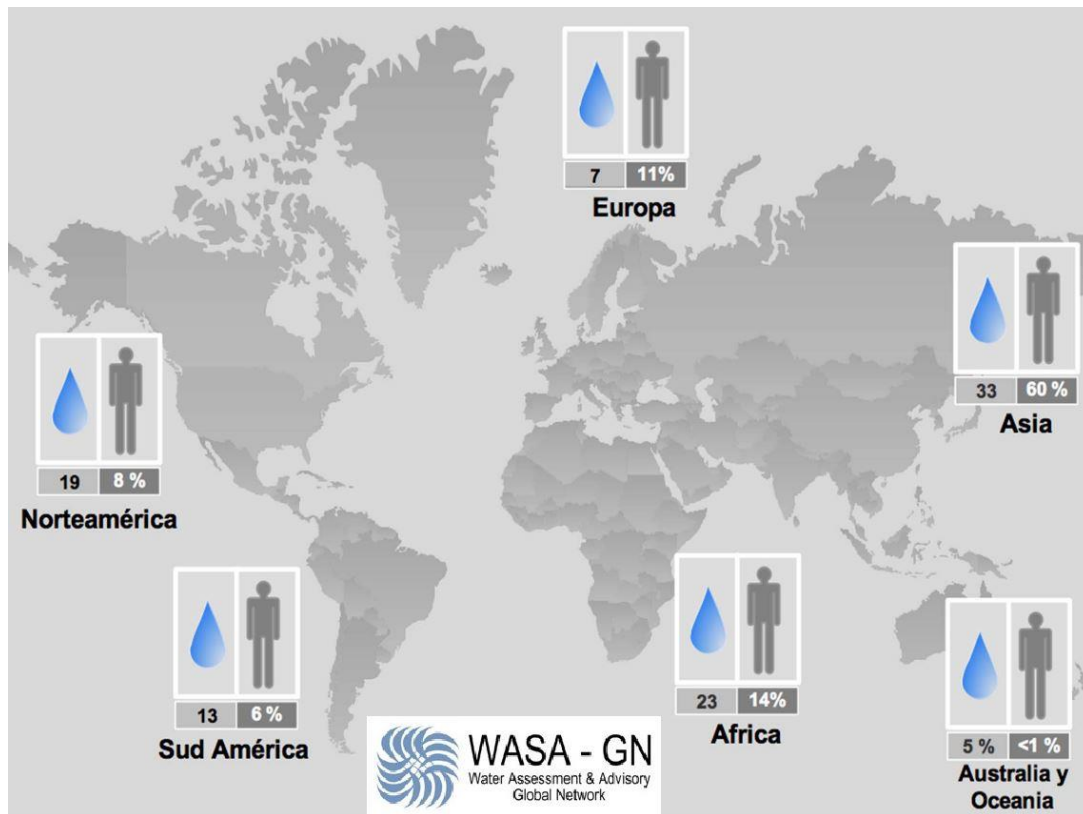
Este documento recoge de un modo sucinto los contenidos de los temas que se han tratado en el curso online, y un conjunto de conclusiones y recomendaciones que pueden servir de hoja de ruta para alcanzar una gestión integrada y sistémica de los recursos hídricos en los países iberoamericanos.

## **1. Los recursos hídricos y la interacción entre aguas superficiales y subterráneas: nociones básicas, situación global del agua en el mundo y, de modo particular, en los países latinoamericanos**

Se presenta un panorama mundial sobre la situación y distribución continental de los recursos hídricos, distinguiendo entre aguas superficiales y subterráneas, y las necesidades de agua por sectores, resaltando el acceso al agua potable y al saneamiento como uno de los temas principales en términos de soporte para la vida. Del volumen total de agua del planeta, un 2,5% es agua dulce. De ese porcentaje de agua dulce, el 68,7% está concentrada en glaciares y casquetes polares, mientras que el 30% de toda el agua dulce es agua subterránea. Respecto a los usos, aproximadamente el 75% de todas las aguas extraídas de los ríos, lagos y acuíferos se utilizan para el riego, el 10% para la industria y el 15% restante para consumo doméstico.

En la distribución por continentes, África por ejemplo cuenta con el 23% de los recursos hídricos del planeta para un 14% de la población mundial. Europa representa el 11% de la población mundial y cuenta con el 7% del recurso hídrico.

Se abordan también los problemas reales de la gestión del agua en el mundo, a la vez que se presentan los desafíos hídricos del siglo XXI en los países de América Latina y el Caribe, como por ejemplo lograr que tengan una gobernabilidad del agua robusta, que garantice un desarrollo humano y social sostenible. El Centro de Gobernabilidad del Agua del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), define la *gobernanza* del agua como el conjunto de sistemas políticos, legales, socio-económicos e institucionales-administrativos, que afectan de forma directa e indirecta el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos, que se caracteriza por objetivos de eficiencia, equidad y sostenibilidad.



**Porcentaje de recursos hídricos y de población por continentes**  
**Fuente: Presentación de Carlos Fernández-Jáuregui (Tema 1)**

Los principios básicos de esta gobernabilidad del agua, se pueden identificar en los siguientes: a) Una autoridad del agua única y al más alto nivel, que sea neutral y no dependa de ningún usuario; b) Una legislación moderna que incluya los avances del conocimiento y considere como unidad de gestión la cuenca hidrográfica y/o hidrogeológica; c) Que haya talento humano suficiente, en calidad y cantidad, en todos los sectores de la gestión; d) Que se reserven recursos financieros adecuados para la gestión del recurso hídrico; y e) Que se garantice la disponibilidad de información confiable, transparente y de libre circulación.

Un buen cambio de paradigma en cuanto a la gestión de los recursos hídricos sería trabajar en el concepto de gobernanza o gobernabilidad del agua. De esta manera, siempre que sea posible, se hará un uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento de los acuíferos, que pueden considerarse como auténticos embalses subterráneos.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que la gestión de los recursos hídricos está conformada por sistemas y subsistemas de diferente ámbito y sector, por lo que la gestión del agua debe ser sistémica.

## **2. Visión de conjunto de los proyectos de cooperación en materia de agua y saneamiento. Agua y saneamiento en los Objetivos de Desarrollo**

## **Sostenible (ODS). El agua como derecho humano. Objetivos de un programa de agua y saneamiento**

Hay dos realidades geográficas en materia de agua de suma importancia para la cooperación internacional: una es el ciclo del agua, es decir, que todas las aguas del planeta están interrelacionadas; y la otra que gran parte de las cuencas fluviales y de los acuíferos están compartidos. Casi el 40 % de la población mundial vive en cuencas compartidas. Esto, que actualmente es uno de los mayores desafíos a resolver en cuanto a la gestión de los recursos hídricos, podría convertirse en una gran oportunidad para la cooperación internacional. Un cambio importante de paradigma sería entender el agua como fuente de cooperación, no de conflicto. La cooperación internacional en torno al agua no solo es posible, sino que es necesaria para aumentar la seguridad de acceso al recurso hídrico.

La cooperación internacional en materia de agua y saneamiento se basa en una serie de principios que se resumen en los tres siguientes: a) Comunidad de intereses: los recursos hídricos superficiales y subterráneos deben ser gestionados de manera conjunta y sostenible, en beneficio de todos los usuarios; b) Soberanía territorial restrictiva: un territorio puede utilizar sus aguas siempre que no perjudique a otros territorios con los que comparta los recursos hídricos; c) Participación conjunta entre el estado y sus ciudadanos, sobre unas bases de transparencia y voluntad política.

El marco de la cooperación se centra fundamentalmente en garantizar agua segura y saneamiento básico para todos. Se observa que el déficit de saneamiento en el mundo es el doble que el del acceso al agua potable. La situación mundial, por tanto, es delicada pues se traduce en la pérdida de un elevado número de vidas humanas en la mayoría de los países en desarrollo: cada día, alrededor de 1000 niños mueren debido a enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene.

Son grandes los desafíos y es mucho el potencial de trabajo pendiente en materia de agua para la cooperación internacional. Un primer paso importante sería hacer una evaluación de los recursos hídricos ya que no se conocen los límites, capacidades, formas y funcionamiento de muchos acuíferos. Otros pasos serían crear los programas, mecanismos e instituciones necesarias para la gestión integrada y la ordenación de las cuencas hidrográficas compartidas, estableciendo, al mismo tiempo, mecanismos para la prevención y resolución de conflictos; crear redes de observación que permitan elaborar estudios de calidad/cantidad; impulsar la formación y capacitación de profesionales y expertos en cuestión de recursos hidrogeológicos, así como la investigación en este campo, y llevar a cabo campañas de información y educación para la transformación social, relacionadas con el uso, la protección y conservación de las aguas; y por último, pero no por ello menos importante, crear planes de control, prevención y acción en situaciones extremas, como inundaciones o sequías, a través de sistemas de pronóstico y alarma, protocolos e infraestructuras.

En el año 2002, el Grupo de Naciones Unidas para el Desarrollo (GNUM), convino que el acceso al agua y al saneamiento era indispensable para garantizar un nivel de vida adecuado a la población. El 28 de julio de 2010, la Asamblea General de la ONU aprobó la Resolución 64/292, por la que se reconoce que el derecho al agua potable y al



saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos. El 24 de noviembre de 2015, la Asamblea General de la ONU aprobó la Resolución 68/157, por la que se consagra la existencia de dos derechos distintos, aunque interrelacionados: el derecho humano al agua y el derecho humano al saneamiento. Define el derecho humano al agua como el derecho universal que tienen todas las personas al acceso seguro y sostenible a una cantidad suficiente de agua para consumo personal y doméstico, de forma asequible física y económicamente, y aceptable culturalmente. Se trata del derecho a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible, y asequible para el uso personal y doméstico. Hay que tener en cuenta que más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas, se vierten en los ríos o en el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación.



La Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 ratificó su compromiso con los derechos humanos al agua, al saneamiento y la higiene, haciendo un llamado a la cooperación técnica regional e internacional, a los Estados y a las empresas, para que cumplan con sus responsabilidades en la implementación y aplicación de los derechos al agua y al saneamiento, monitoreando y promoviendo su implementación. El agua se convierte en un elemento central para el cumplimiento de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El ODS 6 - Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, persigue las siguientes Metas:

- 6.1. De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.
- 6.2. De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos, y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
- 6.3. De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando los vertidos y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar, y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
- 6.4. De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el

abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua, y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

6.5. De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.

6.6. De aquí a 2020, proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

6.a. De aquí a 2030, ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.

6.b. Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.



El reconocimiento del acceso universal al agua y al saneamiento como derechos humanos esenciales para una vida digna, supone una obligación que los Estados deben respetar, proteger y cumplir. Sin embargo, muchas de las intervenciones en materia de agua y saneamiento no han resultado sostenibles debido a factores como la falta de

planificación, la fragmentación institucional, la escasez de financiamiento, una regulación débil para la gestión privada de los servicios, la falta de compromiso a largo plazo, la escasa participación de las comunidades, la falta de regulación, supervisión y rendición de cuentas, y la falta de atención a los grupos más vulnerables. Aunque entre 1990 y 2015, la proporción de población mundial que utilizaba una fuente mejorada de agua potable pasó del 76% al 90%, en la actualidad 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, y 6 de cada 10 carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura. La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial, y más de 1.700 millones de personas viven actualmente en cuencas fluviales donde el consumo de agua es superior a la recarga. Más del 80% de las aguas residuales resultantes de las actividades humanas se vierte en ríos o el mar sin que se eliminen los contaminantes.

### **3. Nociones y conceptos básicos sobre las aguas subterráneas y su funcionamiento**

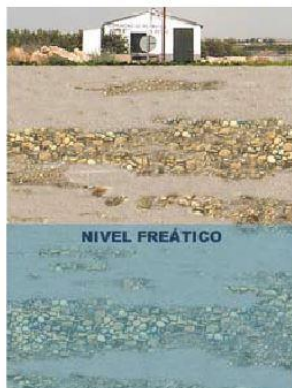
Para poder gestionar de forma óptima el recurso hídrico es necesario conocer el ciclo hidrológico. El ciclo hidrológico o ciclo del agua es el movimiento cíclico y continuo del agua en el planeta. El agua cambia su estado entre sólido, líquido y vapor durante diferentes fases de su ciclo; también tiene diferentes tipos de almacenamiento (océanos, glaciares, lagos, ríos, aguas subterráneas) y tiempos de residencia muy diferentes según donde se encuentre almacenada: unos 2.500 años en el caso de las aguas oceánicas; 9.700 años en glaciares y casquetes polares; de decenas a miles de años para las aguas subterráneas dulces; 17 años para los lagos de agua dulce; de 15 a 20 días en el caso de los ríos; o entre 8 y 10 días si se trata del agua atmosférica.

Las aguas subterráneas representan una fracción importante de la masa de agua dulce del planeta (30%) y se alojan en los acuíferos bajo la superficie de la tierra. Un acuífero es una estructura geológica subterránea capaz de almacenar y transmitir el agua para que pueda ser aprovechada como recurso. El volumen de agua que entra en un acuífero durante un periodo determinado de tiempo se conoce como *recarga*; esta es natural cuando se debe a filtraciones de precipitaciones de lluvia o de un flujo de agua; un acuífero también se puede recargar artificialmente. El volumen de agua del que podría disponerse en un acuífero para un período de tiempo es el *recurso* subterráneo y la cantidad de agua que contiene un acuífero en un instante determinado es la *reserva* subterránea.

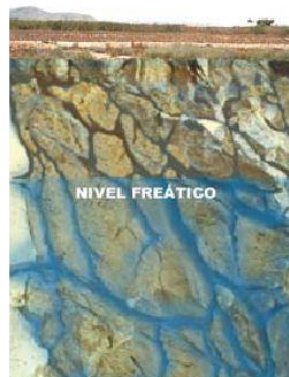
A la hora de extraer agua de un acuífero para uso humano, es clave conocer los límites del mismo y su balance hídrico. Los límites de un acuífero siempre se deben definir con base a criterios hidrogeológicos. La relación entre los aportes de agua y las pérdidas de agua en un intervalo de tiempo determinado se llama *balance hídrico*. La diferencia entre el total de entradas y el total de salidas, con un mínimo margen de error, debe ser igual a la variación en el almacenamiento.

Los acuíferos se clasifican según diferentes criterios. En función de su litología pueden ser:

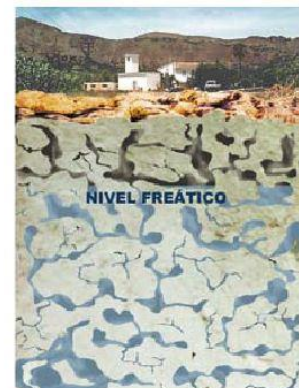
- a) Detríticos: formados por materiales sueltos (gravas, arenas y limos) o consolidados (conglomerados, areniscas y arcillas), que en general son de edades geológicamente recientes y presentan buenas condiciones de porosidad y permeabilidad.
- b) Carbonatados: formados por materiales calizos y dolomíticos (origen químico) más o menos karstificados, y varían mucho en densidad, porosidad y permeabilidad.
- c) Fisurados: en su mayoría están constituidos por rocas ígneas y metamórficas que presentan zonas de alteración o zonas fisuradas (diacclasas y fallas), y forman pequeños acuíferos de interés local.



Acuífero detrítico



Acuífero fisurado



Acuífero kárstico

#### Tipos de acuíferos en función de su litología

Fuente: "Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo" (IGME, 2001)

En función de la presión hidrostática se clasifican en:

- a) Acuíferos libres, no confinados o freáticos: su límite superior forma una superficie real que está en contacto con el aire de la zona no saturada y, por tanto, a presión atmosférica.
- b) Acuíferos confinados, cautivos o a presión: aquellos en los que, en su límite superior, el agua está a una presión superior a la atmosférica.
- c) Acuíferos semiconfinados o semicautivos: constituyen un caso particular de acuíferos confinados en los que el muro, el techo, o ambos, no son totalmente impermeables, sino que permiten la circulación vertical del agua.

Para la gestión de aguas subterráneas es clave llevar a cabo campañas de observación sistemáticas y continuadas, tanto a través de estudios piezométricos para establecer los volúmenes de agua en un lugar determinado, como de análisis químicos para determinar la composición y calidad de las aguas. Con el término *composición* de un agua, se hace referencia al contenido en sustancias disueltas, partículas en suspensión, componentes biológicos y temperatura. La *composición* en relación con una

determinada utilización, aplicación o uso, se denomina *calidad*. El término *contaminación* se reserva para los casos en que existen sustancias disueltas inconvenientes o nocivas como consecuencia de la actividad humana, o bien cuando se produce alteración de las propiedades físicas, químicas o biológicas del agua por la acción antrópica.

El análisis de la composición del agua no solo sirve para determinar la calidad de la misma en función de un determinado uso, sino que también ayuda a conocer los procesos del agua desde que se filtra hasta que es extraída; es decir, indica cómo funciona un acuífero y permite conocer el flujo del agua en el acuífero (recarga, circulación, almacenamiento, descarga).

Las aguas subterráneas son un recurso de gran importancia, vital para el ser humano, también desde el punto de vista social, cultural y religioso. Representan una reserva a largo plazo que permite su disponibilidad como recurso estratégico. Entre sus ventajas está que son más resilientes a la contaminación que las aguas superficiales, su facilidad de captación que permite gestionarlas localmente, su calidad generalmente buena y poco variable, su ubicuidad territorial, su rápida incorporación y escasa inversión inicial, su acceso sencillo, su flexibilidad de uso y su segura disponibilidad, entre otras. Ahora bien, esto no significa que las aguas subterráneas vayan a sustituir a las aguas superficiales, sino que lo ideal es hacer un uso conjunto de ambas.

#### **4. Estudios previos a realizar en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua. Sistemas de perforación de pozos. Captación de aguas de manantial**

El diseño de un sistema de abastecimiento de aguas requiere una serie de estudios previos. En primer lugar, habrá que identificar las fuentes de agua dulce disponibles y priorizar las que se utilizarán para el abastecimiento con base a ciertos criterios, como son:

- Regularidad de presencia de agua dulce en el territorio: aguas subterráneas > aguas superficiales > agua de lluvia.
- Protección natural del agua frente a la contaminación: aguas subterráneas profundas > manantiales > superficiales.
- Facilidad de captación: aguas superficiales = manantiales > aguas subterráneas profundas.
- Facilidad de distribución: manantiales > aguas superficiales y subterráneas profundas.

Se entiende por *exploración hidrogeológica*, el conjunto de acciones que permiten la localización de acuíferos, de los que se puede obtener agua en cantidad y calidad adecuadas para el fin que se pretende. Las técnicas de exploración hidrogeológica más comúnmente utilizadas son:



- Elaboración de mapas e informes hidrogeológicos a partir del inventario de puntos de agua.
- Estudios geofísicos de superficie mediante sondeos eléctricos verticales (SEV).
- Muestreo de las perforaciones para conocer la naturaleza geológica y las condiciones hidrogeológicas del subsuelo.
- Registro geofísico de los pozos para conocer el potencial espontáneo, la resistividad aparente y la radiación gamma.

En el inventario de puntos de agua, se elaborará una ficha que recoja la siguiente información:

- Localización geográfica y altimétrica precisa de la referencia.
- Columna litológica de la perforación o situación geológica del manantial.
- Posición del nivel piezométrico y evolución.
- Caudales de agua explotados y su evolución con el tiempo.
- Características físico-químicas del agua y su evolución con el tiempo.
- Comentarios e indicaciones de los usuarios, encargados o conocedores del lugar.

Una vez realizada la exploración hidrogeológica, se procederá al diseño más adecuado del sistema de abastecimiento de agua, teniendo en cuenta las siguientes observaciones:

- Período de diseño del sistema: prever el posible aumento demográfico de la comunidad, y analizar la durabilidad de las instalaciones y su capacidad para cubrir el servicio.
- Dotación de abastecimiento: depende del contexto. Así, en casos de emergencia se reduce de 3 a 5 litros/persona/día; el mínimo para cubrir necesidades básicas es de 15 a 20 litros/persona/día; y el volumen ideal en comunidades rurales es de unos 50 a 100 litros/persona/día.
- Número de usuarios por grifo o punto de agua: salvo casos de emergencia, debe limitarse a un máximo de unas 80 personas por grifo.
- Caudal por grifo: entre 0,1 y 0,25 litros/segundo.
- Velocidad de flujo en las tuberías: de 0,5 a 3 metros/segundo, a fin de evitar decantaciones de sólidos en suspensión y erosión en las tuberías.

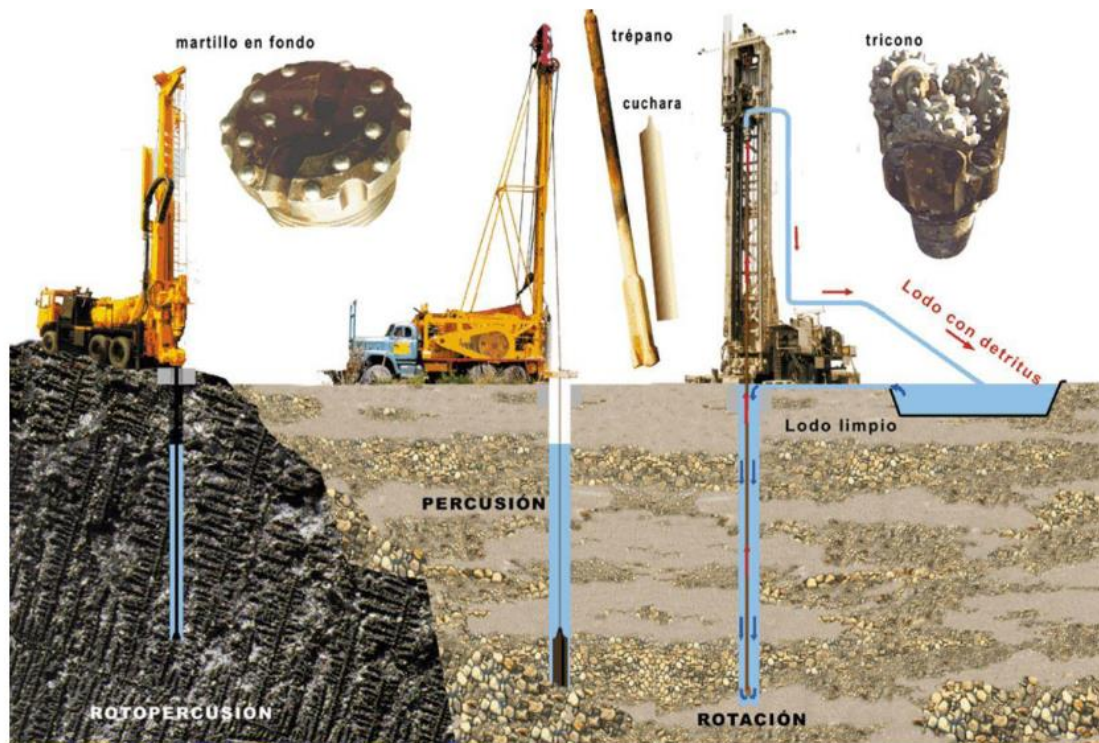
El sistema básico de abastecimiento de agua se basa en los pozos de extracción. Existen diferentes métodos de perforación de pozos:

- Excavación: los pozos se pueden realizar a mano, deben ser rectilíneos y excavados siempre del centro a las paredes. Este método se aconseja cuando el nivel freático está próximo a la superficie, el terreno es fácil de excavar y no existen otras posibilidades. Estos pozos tienen gran capacidad de almacenamiento de agua, son de fácil acceso y están muy expuestos a la contaminación. Por lo general son de bajo coste económico.
- Percusión: consiste en romper la formación geológica mediante golpes de una maza (trépano) que cae desde cierta altura. Es un sistema lento, adecuado para formaciones moderadamente duras con paredes estables. La operación y el mantenimiento son sencillos. Pueden alcanzarse profundidades considerables.
- Rotación: se trata de hacer rotar un útil de corte. Se denomina de *circulación directa*, cuando el lodo entra por el varillaje y retorna por el anular de la perforación. Los materiales más favorables de perforar son las formaciones detríticas y sedimentarias moderadamente duras. En el caso de la *circulación inversa*, el lodo entra por el anular de la perforación y sale por el varillaje. Este sistema es más favorable en formaciones blandas, no abrasivas y no fracturadas, y es más limpio, rápido y barato que la circulación directa, pero tiene más riesgo de caída de paredes.
- Rotopercusión: utiliza aire a presión para girar y rotar un martillo en el fondo de la perforación. Se emplea para formaciones consolidadas de dureza media a alta, especialmente en rocas ígneas y metamórficas. Es un método muy rápido, de pequeños diámetros, que requiere personal cualificado. Suele ser de alto coste económico.

La elección de uno u otro sistema depende básicamente de la profundidad de la capa acuífera, de las características hidrogeológicas del terreno, de la rapidez de perforación deseada y del presupuesto para la excavación.

Otra fuente importante de abastecimiento de agua son los manantiales, que pueden ser temporales, permanentes o efímeros. Adicionalmente, se pueden clasificar en función del modo de salida del agua del subsuelo, de los materiales geológicos del acuífero al que pertenecen, de la magnitud de su caudal, de las características físico-químicas del agua, de la temperatura del agua o de sus propiedades terapéuticas y medicinales.

Previo a captar agua de un manantial hay que saber cómo funciona. Para ello es preciso observar la relación entre el área de recarga, el caudal medio y la recarga media anual del manantial, con base a las variables hidrometeorológicas del lugar en el que está ubicado.



Métodos de perforación de pozos y útiles de corte

Fuente: "Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo" (IGME, 2001)

Una vez se haya determinado que es factible captar agua de un manantial específico, habrá que tomar ciertas medidas de precaución para proceder a excavar y ejecutar las obras físicas. En primer lugar, hay que evitar excavar demasiado en el extracto impermeable, puesto que esto podría provocar que el manantial desaparezca o aflore en otro sitio. Para proteger el manantial, debe excavar la ladera donde sale el agua y construirse un tanque o caja de manantial. Asimismo, hay que preparar la zona de captación y construir cajas de captación, que pueden ser de mampostería o de concreto reforzado. Adicionalmente, se construye un sistema de drenaje para el agua de lluvia y el excedente en la zona. Por último, se crea un perímetro de protección –cercado y cerrado con llave– en torno al manantial para evitar la presencia de animales o los depósitos de basura del manantial.

## 5. Problemas relacionados con la cantidad y calidad de las aguas subterráneas: explotación intensiva, fuentes de contaminación puntual y difusa. Normas e indicadores de calidad según los usos. Protección de las aguas subterráneas: perímetros de protección

Las aguas subterráneas están sujetas a una serie de riesgos y problemas relacionados tanto con su cantidad (reducción del caudal) como con su calidad (contaminación). Proteger los acuíferos no solo es importante para asegurar el suministro actual y de las generaciones futuras, sino porque todo lo que afecta a un acuífero, afecta al resto del ciclo hidrológico.

En lo que se refiere a la cantidad, es evidente que toda extracción de agua subterránea lleva consigo unos efectos que podríamos calificar de negativos, como serían: a) disminución de la descarga a manantiales, lagos, ríos y humedales; b) disminución progresiva de niveles piezométricos; c) cambios en el esquema de flujo subterráneo; d) cambios en la calidad del agua; y e) disminución de la presión en los poros dando lugar a fenómenos de subsidencia y colapsos.

El rendimiento sostenible de un acuífero sería aquel que utiliza un porcentaje de la recarga anual, en función de las condiciones hidrogeológicas locales. Cuando durante varios años, la extracción media de agua subterránea en un acuífero supera o se aproxima a su recarga media, se dice que hay *sobreexplotación*, *explotación intensiva* o *sobreuso*. Se habla de *minería del agua* cuando la extracción es muy superior a la recarga, es decir, cuando hay un consumo continuado de la reserva. La explotación intensiva de un acuífero costero puede producir descensos en los niveles piezométricos que conlleven una contaminación del agua debida a la filtración de agua salada.

El término *sobreexplotación* incluye una componente subjetiva, y su percepción puede cambiar con el tiempo. De ahí que sea más adecuado hablar de *explotación intensiva*.

Existen diversos medios para proteger la cantidad de agua de un acuífero: posiblemente el más importante sea conocer bien las características del acuífero, para así poder plantear diferentes escenarios de uso y disponibilidad del agua. Otras medidas de protección incluyen elaborar e implementar normas y restricciones para la extracción, educar a las comunidades de usuarios a través de campañas de sensibilización, proteger las zonas de recarga, aumentar la eficiencia en el uso del agua, asignar parte de los beneficios económicos derivados del acuífero a proteger, restaurar y mejorar la recarga, y hacer un uso conjunto de aguas subterráneas y superficiales.

Asimismo, las aguas subterráneas pueden presentar problemas relacionados con su calidad. Si bien son más resilientes a la contaminación que las aguas superficiales, los núcleos poblacionales, la industria, la minería y las explotaciones agropecuarias, son fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas.

Por su distribución, la contaminación puede ser puntual o difusa. Es puntual cuando está localizada, como así ocurre en: actividades domésticas, ganaderas o industriales; residuos sólidos; pozos deficientemente contruidos y/o sellados; tanques de combustible mal contruidos; vertidos directos mediante pozos de inyección. Es difusa cuando se extiende por una superficie más o menos vasta, como en el caso de la contaminación por abonos agrícolas, por intrusión de agua marina o de aguas residuales.

A fin de proteger y conservar la calidad y cantidad de las aguas subterráneas, es necesario conocer la vulnerabilidad del mismo. En términos generales, se entiende por *vulnerabilidad* de un acuífero, el grado de protección natural respecto a la contaminación. La vulnerabilidad natural de un acuífero, también conocida como vulnerabilidad intrínseca, es aquella que depende únicamente de sus características naturales (características geológicas y morfológicas, parámetros hidráulicos, características del suelo y de la zona no saturada, etc.), y se debe calcular y expresar en

términos hidrogeológicos. La vulnerabilidad específica de un acuífero hace referencia a su aptitud frente a un tipo determinado de impacto o de contaminante, y se expresa en términos de riesgo. Existen varias metodologías para determinar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, y representarla gráficamente en mapas temáticos a escalas diversas. Estos mapas de vulnerabilidad son de gran ayuda para proteger la calidad de las aguas subterráneas.



Esquema de los diferentes perímetros de protección de la calidad del agua subterránea, en un pozo destinado al abastecimiento urbano

Fuente: "Las aguas subterráneas: un recurso natural del subsuelo" (IGME, 2001)

Para salvaguardar la calidad de las aguas subterráneas que se extraen de las captaciones de abastecimiento urbano (agua potable), una medida clave de protección es delimitar un área en el entorno de la captación en la que, de forma graduada, se restrinjan o prohíban actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas. Estas zonas se denominan *perímetros de protección*, y se definen de forma gradual en función de su proximidad al punto de extracción y el tiempo de residencia del agua en esa área. Es frecuente distinguir tres zonas: a) Zona inmediata o de restricciones absolutas: para un tiempo de tránsito del agua de 24 horas, o bien de modo arbitrario entre 100 y 400 m<sup>2</sup>, y se excluye cualquier actividad; b) Zona próxima, de restricciones máximas o de protección bacteriológica: para un tiempo de tránsito del agua de 10 a 100 días, o bien delimitando un área entre 2.500 y 90.000 m<sup>2</sup> en función del tipo de terreno, de la zona no saturada y del caudal; c) Zona lejana o de restricciones moderadas: suele extrapolarse a los límites del acuífero o a distancias que supongan tiempos de tránsito superiores a una década.

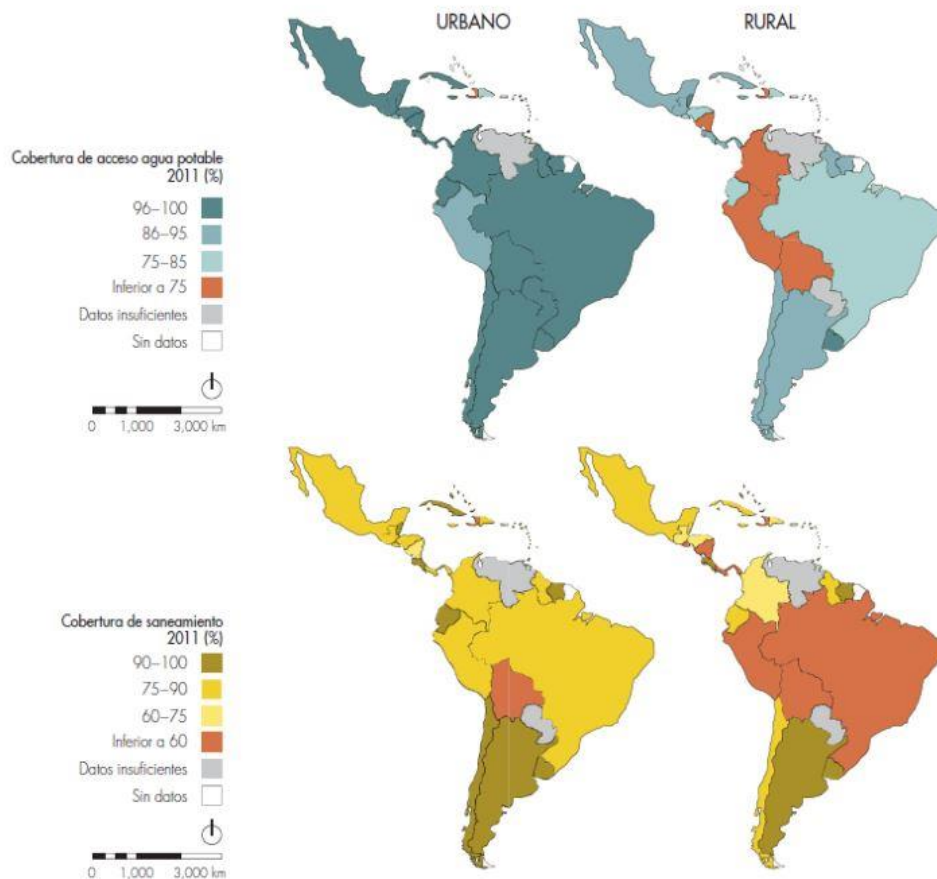
## 6. Agua, saneamiento e higiene. Tratamientos convencionales para la obtención de agua potable. Enfermedades relacionadas con el agua y saneamiento. Fomento de prácticas de higiene

Pese a que el acceso al agua y el saneamiento han sido declarados derechos humanos, actualmente 2.400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, como retretes o letrinas, y casi 2 millones de personas fallecen cada año a causa de enfermedades diarreicas; el 85% de esas personas son niños menores de 5 años, principalmente de países en desarrollo. El 88% de las enfermedades diarreicas se atribuyen a la mala calidad del agua, la precariedad de los servicios de saneamiento y la falta de higiene. Por tanto, todavía estamos lejos de alcanzar el Objetivo de Desarrollo



Sostenible 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos.

El acceso al agua y el saneamiento resalta la desigualdad e inequidad mundiales, siendo las poblaciones rurales las más vulnerables, y las regiones de África subsahariana, América Latina y Caribe, y Asia suroriental las más afectadas en cuanto a fuentes de agua disponibles y sistemas de saneamiento.



**Porcentaje de la población de ALC con acceso a agua potable y a saneamiento, en núcleos urbanos y rurales**

**Fuente: "Seguridad hídrica y alimentaria en América Latina y el Caribe. Implicaciones regionales y globales" (Fundación Botín, 2014)**

Son múltiples las enfermedades relacionadas con el agua. Algunas de las más corrientes son las siguientes:

- Las transmitidas por agua contaminada debido a materia orgánica procedente de humanos o animales: disentería amebiana, disentería bacilar, diarreas, cólera, hepatitis A y E, fiebres tifoideas, poliomielitis, meningitis y leptospirosis.
- Las transmitidas por agua contaminada debido a sustancias químicas: saturnismo o plumbosis (plomo), fluorismo (flúor), arsenicosis o arsenicismo (arsénico).
- Las producidas por organismos acuáticos que pasan parte de su ciclo vital en este medio y otra parte como parásitos de animales, que infectan directamente al ser

humano, penetrando a través de la piel o del sistema digestivo: ascariasis, clonorchiasis, dracunculosis, paragonimiasis, esquistosomiasis.

- De origen vectorial, transmitidas al hombre por vectores como los mosquitos y las moscas, que se crían y viven cerca de aguas contaminadas y no contaminadas: malaria, dengue, fiebre amarilla, leishmaniasis, FVR.
- Enfermedades que prosperan en condiciones de escasez de agua, saneamiento deficiente y hacinamiento de vida. Son de rápida difusión en la mayor parte del mundo, y se pueden controlar eficazmente con una mejor higiene de las personas y de sus utensilios y ropa, para lo cual es imprescindible tener agua en cantidad y calidad adecuadas: tracoma, sarna, tifus, tuberculosis, salmonelosis, micosis.

Las rutas de infección de enfermedades relacionadas con el saneamiento pueden ser variadas: el contacto directo de manos sucias con la boca y comida, el uso o consumo de agua contaminada, o debido a vectores de transmisión. Es fundamental vigilar todo el proceso que recorre el agua desde su recogida hasta su consumo, pasando por el transporte, el almacenamiento y la desinfección.

Existen diferentes tratamientos para potabilizar el agua. Por *tratamiento del agua* se entienden aquellos procesos físicos, químicos y biológicos, mediante los cuales se convierte el agua natural en agua potable. Estos tratamientos van desde los más complejos, como las plantas de tratamiento de agua potable, hasta otros más sencillos, aunque eficaces, que se pueden hacer en los mismos hogares, como sería la cloración, la filtración y la ebullición del agua.

Prácticas tan sencillas como lavarse las manos con agua y jabón, eliminar adecuadamente las excretas y almacenar de forma segura el agua para beber, podrían reducir en más del 40% las enfermedades diarreicas, y casi en un 25% las infecciones respiratorias. Así, podría evitarse la muerte de 2,2 millones de niños y niñas, simplemente mejorando sus comportamientos higiénicos y las posibilidades de acceso al agua potable y al saneamiento elemental.



## **7. Guatemala: Proyecto Aldea de los González Palestina de los Altos Quetzaltenango / México: Proyecto de saneamiento de las zonas marginadas del Valle de la Sabana en el estado de Guerrero / Lista de comprobación. Orientaciones para el cumplimiento de los Derechos Humanos al agua y al saneamiento en proyectos**

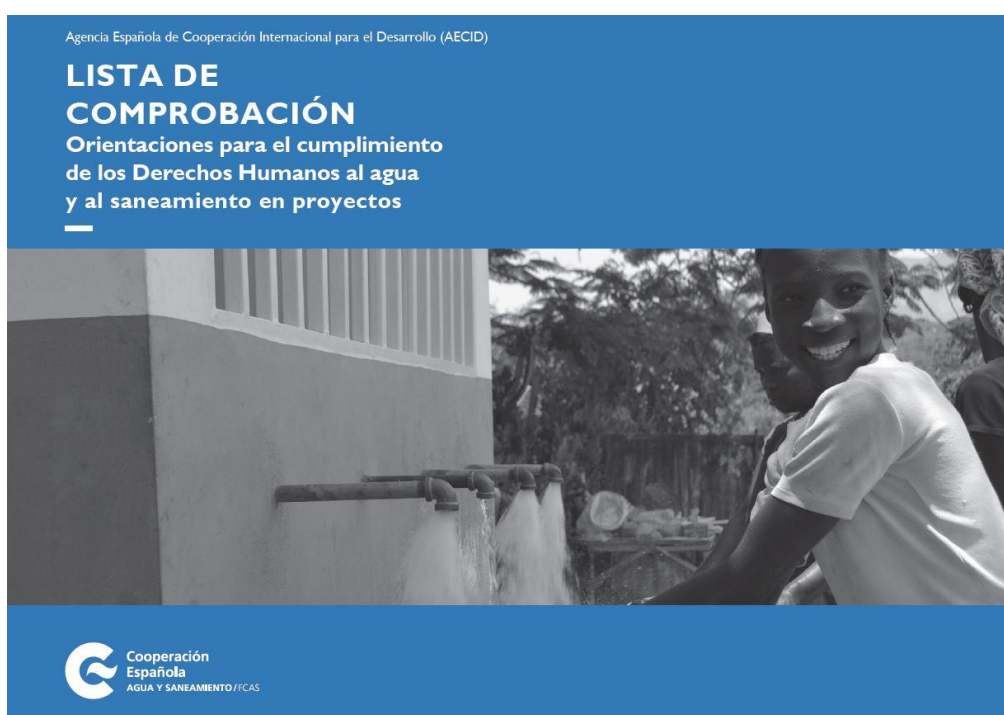
Se presentan ambos proyectos como dos casos reales de éxito de la aplicación de conocimientos y técnicas hidrogeológicas por parte del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS), en los que se utilizó una herramienta elaborada por el propio FCAS en el año 2017 denominada *Lista de comprobación. Orientaciones para el cumplimiento de los Derechos Humanos al agua y al saneamiento en proyectos*. Estos dos proyectos están asociados a las actividades de cooperación internacional para el desarrollo de la AECID.

Esta *Lista de comprobación* nació como una herramienta de autodiagnóstico para los gestores del FCAS, en relación a los proyectos que se están realizando en cada país. Permite, tanto a nivel de multiproyectos como de un proyecto concreto, realizar una comprobación para el análisis de la incorporación de los Derechos Humanos al agua y al saneamiento (DHAS) en los proyectos de agua y saneamiento.

Se han elaborado, por tanto, un conjunto de preguntas que ayudan a determinar en qué medida se están implementando los DHAS en un proyecto concreto (o en una cartera de multiproyectos similares) y, en función del resultado, identificar posibles acciones de mejora. Cuando una pregunta responde a varios criterios, se hace explícito cuál/es está/n involucrado/s. Además, se señala si cada pregunta afecta al agua y/o saneamiento y al ámbito urbano y/o rural.

La herramienta dispone de espacios específicos que permiten al gestor del proyecto, registrar su valoración a cada pregunta, establecer las medidas correctoras o de mejora y realizar su seguimiento durante la ejecución del proyecto. El proyecto que se analice puede estar en cualquier momento de su ciclo de vida, si bien lo recomendable es aplicar la herramienta desde la fase de diseño, para facilitar la incorporación de las acciones correctoras.

Si bien la *Lista de comprobación* ha sido pensada para los proyectos que se han desarrollado y se están desarrollando por el FCAS, tiene un carácter universal que permite su utilización en cualquier programa de agua y saneamiento para el desarrollo en cualquier país, y bajo el mandato de cualquier institución local y nacional. Este es el motivo principal de haber sido utilizada durante este Curso online, al existir una presencia importante de personal técnico relacionado con administraciones estatales y locales de gran parte de Iberoamérica, e incluso alguna institución internacional relacionada con el desarrollo.



La *Lista* contempla algunos de los principios transversales que rigen los Derechos Humanos, tales como: no discriminación y equidad; derecho a la participación, a la información y rendición de cuentas; sostenibilidad. También considera los siguientes criterios normativos del Derecho Humano al agua y del Derecho Humano al saneamiento: disponibilidad, accesibilidad, calidad, aceptabilidad y asequibilidad. Por último, la *Lista* incluye una serie de preguntas relacionadas con los titulares de obligaciones, de cara a verificar si los Estados están cumpliendo con sus obligaciones en el marco de este tipo de proyectos, y si el proyecto en evaluación está llevando a cabo acciones que promuevan la responsabilidad por parte de los Estados.



En este Curso se han explicado tanto las características de la propia herramienta, como dos casos prácticos correspondientes a dos proyectos FCAS ya finalizados: el *Proyecto Aldea de los González Palestina de los Altos Quetzaltenango*, situado en el occidente de Guatemala y con carácter plenamente rural; y el *Proyecto de saneamiento de las zonas marginadas del Valle de la Sabana en el estado de Guerrero*, en la zona periurbana de Acapulco (México). En ambos casos se trataba de zonas con graves problemas de pobreza y con manifestaciones de enfermedades de origen hídrico.



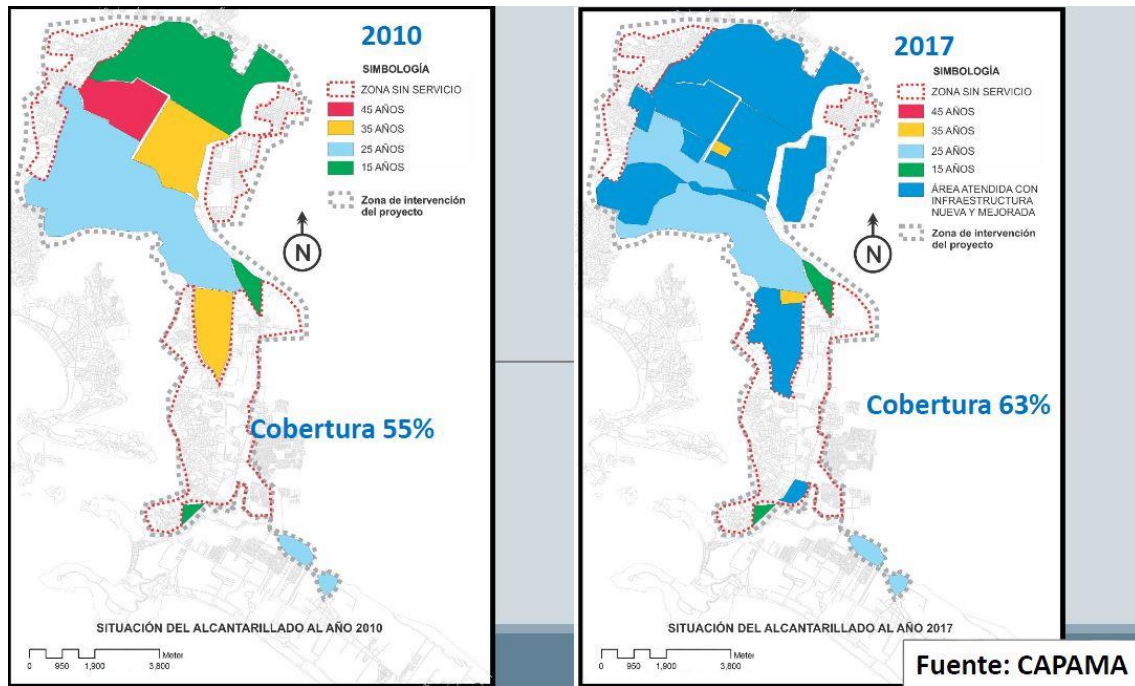
**Proyecto Aldea de los González Palestina de los Altos Quetzaltenango**  
**Fuente: Presentación de José Luis Armayor (Tema 7)**

En el primero de ellos, *Proyecto Aldea de los González Palestina de los Altos Quetzaltenango*, se realizó una explicación del sistema de suministro de agua mediante la construcción de un pozo profundo en materiales volcánicos, un foso de bombeo para conducir el agua a un depósito situado en lo alto de un cerro, así como los sistemas de conducción, distribución y conexiones domiciliarias. Mediante las explicaciones del caso práctico, se pusieron en conocimiento de los alumnos las principales dificultades técnicas y transversales encontradas, así como las soluciones a las mismas. Especial atención se ha tenido con las específicas características sociales y culturales de la beneficiaria población indígena maya, que incluso afectó a la localización del depósito de agua situado en un altar de celebraciones de ritos mayas, y que se acordó compartir ambos usos de una forma consensuada con los representantes indígenas.

En el caso del *Proyecto de saneamiento de las zonas marginadas del Valle de la Sabana en el estado de Guerrero* (municipalidad de Acapulco), se analizó un caso real de suministro de agua basado en la explotación de pozos en el acuífero cuaternario del río la Sabana, zona periférica marginal de Acapulco que fue creciendo ante el efecto llamada de trabajo potencial dentro de las zonas turísticas. Se detallaron tanto los aspectos técnicos constructivos, como de funcionamiento del sistema: extracción de aguas subterráneas mediante pozos someros, estaciones de bombeo al tanque de la



Mica, conducciones entre los distintos depósitos y red de distribución y conexiones domiciliarias. También se contemplaron las actividades transversales realizadas: educación hidrosanitaria, cursos formativos sobre el uso del agua, etc. Por último, las importantes dificultades que se tuvieron durante la construcción del sistema, debido a la presencia de delincuencia organizada.

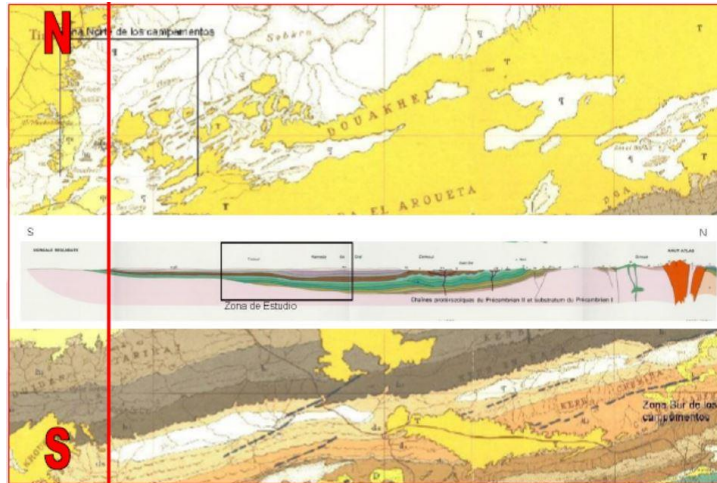


**Proyecto de saneamiento de las zonas marginadas del Valle de la Sabana en el estado de Guerrero  
Cobertura del servicio de alcantarillado sanitario en 2010 y 2017  
Fuente: Presentación de José Luis Armayor (Tema 7)**

## 8. Sahara Occidental: Proyecto Aqua-Sahara de Abastecimiento de agua potable a los campamentos de refugiados saharauis

El Proyecto Aqua-Sahara, de Ingenieros sin Fronteras (Galicia), se desarrolló a lo largo del periodo 2003-2006, con los siguientes objetivos: a) Mejorar las instalaciones de bombeo en El Aaiún; b) Estudiar las aguas subterráneas y el abastecimiento en los campamentos de refugiados de Tindouf; c) Establecer una Unidad de Hidrogeología en el Departamento de Hidráulica saharauí, para fomentar la docencia y la investigación.

La zona del proyecto presenta los siguientes datos climáticos anuales, propios de un clima desértico: precipitación de 42 mm; temperatura media de 23,5 °C (en verano supera los 50 °C); y evapotranspiración potencial de 295 mm.



**Sinclinal asimétrico de la cuenca de Tindouf**  
**Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán (Tema 8)**



**Marco geológico**  
**Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán (Tema 8)**



**Marco hidrogeológico: acuíferos principales**  
**Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán (Tema 8)**

Existen cuatro tipos de acuíferos principales:

- Acuífero detrítico superficial (Terciario / Cuaternario): descarga formando el oasis de Dajla, al tener el nivel freático muy próximo a la superficie. El agua se extrae mediante pozos artesanales y excavados, y es de mala calidad pues está contaminada por falta de un saneamiento adecuado.
- Acuífero detrítico (Terciario): identificado en los alrededores de El Aaiún. Formado por arenas y areniscas terciarias, con espesores de 58 a 100 m. El tramo productivo se encuentra entre 17 y 80 m de profundidad. Presenta transmisividades de 3.9 a 4.3 m<sup>2</sup>/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.058. Se trata de un acuífero semiconfinado.
- Acuífero carbonatado (Carbonífero): constituido por calizas, calizas dolomíticas y dolomías paleozoicas del Sinclinal de Tindouf, con una potencia entre 50 y 100 m. Presenta transmisividades de 15-17 m<sup>2</sup>/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.111. Se trata de un acuífero semiconfinado.
- Acuífero profundo (Devónico): constituido por rocas sedimentarias paleozoicas del Sinclinal de Tindouf. Existen dos pozos perforados de 100 m y 68 m de profundidad. El agua subterránea es de buena calidad y es la que se utiliza para el abastecimiento a la población de Dajla.

Las aguas subterráneas constituyen la única alternativa posible de abastecimiento para los refugiados saharauis. Son aguas de elevada salinidad (CE entre 1.000 y 4.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), con altos contenidos en cloruro, sulfato, nitrato y sodio, que dan lugar a aguas cloruradas sódicas, sulfatadas sódicas y sulfatadas magnésicas. Las mayores concentraciones de nitratos aparecen en los pozos que abastecen a los campamentos del norte y no se detectan coliformes totales, mientras que en los del sur, el contenido en nitratos es menor y se detectan coliformes.

## **9. Ecuador: Caracterización y gestión del acuífero Manglaralto (Santa Elena) para el abastecimiento de comunidades rurales**

El acuífero costero Manglaralto se encuentra ubicado al norte de la provincia de Santa Elena (Ecuador), y sus aguas subterráneas abastecen aproximadamente a 20.000 personas, cifra que corresponde a la población local permanente, repartidas entre las comunidades de Montañita, Manglaralto, Río Chico, Cadeate y Libertador Bolívar. Hay que tener en cuenta que, en la época turística de playa, la población flotante puede duplicarse.

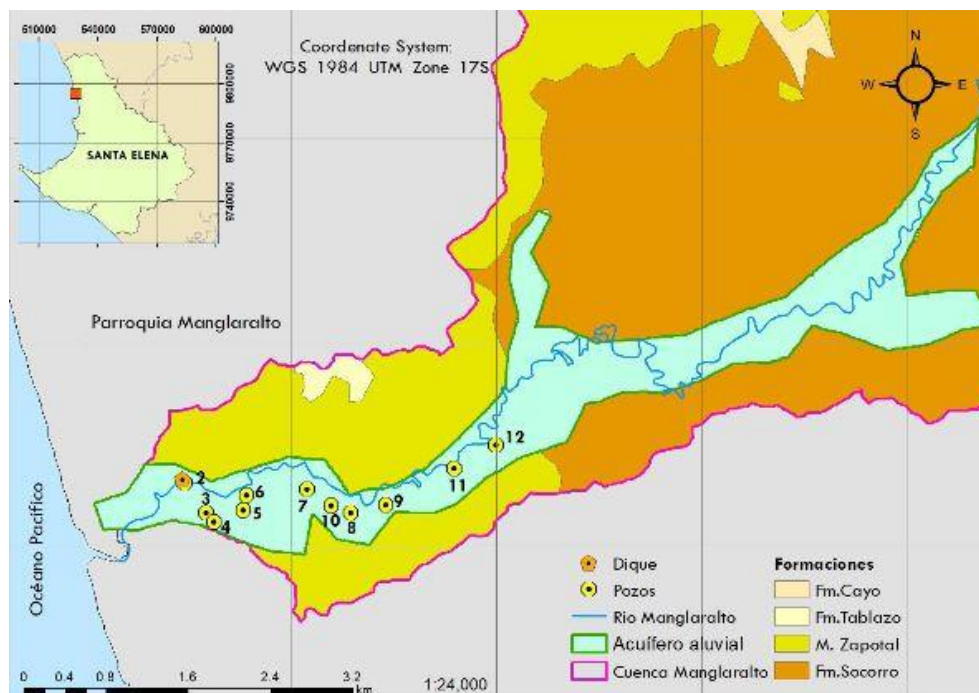
El ritmo de explotación del acuífero aumenta conforme al incremento de la población local y flotante, produciéndose una disminución considerable de los niveles piezométricos y, por tanto, una disminución también del rendimiento y del caudal de extracción. La gestión del recurso hídrico de este acuífero corresponde a la Junta



Administradora de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), que es una entidad comunitaria.



Fuente: Presentación de Francisco Javier Montalván (Tema 9)



Mapa geológico de la subcuenca de Manglaralto con la ubicación de los pozos en el acuífero de Manglaralto

Fuente: "Flow and transport numerical model of a coastal aquifer based on the hydraulic importance of a dyke and its impact on water quality: Manglaralto, Ecuador" *Water*, 13 (4), 2021

La Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), y la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), se han encargado de la caracterización del medio físico del acuífero, tanto mediante proyectos de investigación y de graduación, como de tesis doctorales y de maestría. Entre los trabajos realizados para la caracterización del acuífero, destacan los siguientes:

- Monitoreo en el campo de pozos para la obtención de datos hidrogeológicos: mensualmente se han tomado medidas de sólidos totales disueltos (TDS), niveles piezométricos y parámetros físico-químicos.
- Campañas de sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías eléctricas (TE): trabajos geofísicos necesarios para la caracterización y disposición de las estructuras geológicas, que van a permitir posteriormente la delimitación de la geometría del acuífero presente en la cuenca Manglaralto.
- Hidroquímica: se han diferenciado dos tipos de agua subterránea en la cuenca, en función de la concentración de los iones mayoritarios Cl, Na, K, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, Ca, SO<sub>4</sub>, Mg: a) aguas carbonatadas sódicas procedentes de los pozos más al interior de la cuenca; y b) aguas cloruradas sódicas-cálcicas procedentes de los pozos influenciados por el agua de mar. Las aguas se encuentran en equilibrio químico respecto a la concentración de carbonatos, lo que es acorde a los materiales presentes en el sustrato del acuífero.
- Isótopos: la caracterización isotópica permitió establecer que la recarga del acuífero depende exclusivamente de las precipitaciones en la cuenca. Destaca la alta permeabilidad de los materiales del acuífero (gravas, arenas y limos), puesto que el agua de los pozos presenta la misma huella isotópica que las aguas superficiales del río. También indica que, en un determinado momento, la infiltración no ha sido directa, sino que ha pasado por un proceso de evaporación en la zona no saturada.
- Modelo numérico de flujo y transporte: el modelo numérico reforzó el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca Manglaralto, indicando que la cuña de intrusión se encuentra en los pozos más próximos al mar. En esta zona del litoral, la cuña de intrusión avanza en la época de estiaje, mientras que en la época de lluvias retrocede, permitiendo con ello una mejora de la calidad del agua y, por tanto, que pueda ser utilizada por los habitantes de las comunidades.



## 10. Conclusiones

Las principales conclusiones del Curso se concretan en las diez que se relacionan a continuación:

1. Para garantizar una gestión sostenible de los recursos hídricos, es fundamental asegurar una gobernabilidad del agua en base a los siguientes principios: a) Autoridad única del Agua y al más alto nivel, que sea neutral y no dependa de ningún usuario; b) Legislación moderna que incluya todos los avances del conocimiento hidrogeológico y garantice como unidad de gestión del recurso hídrico, la cuenca hidrográfica y/o hidrogeológica; c) Talento humano suficiente, en calidad y cantidad, en todos los sectores de la gestión; d) Recursos financieros adecuados y suficientes para la gestión total del recurso hídrico; y e) Garantizar la disponibilidad de información confiable, transparente y de libre circulación. La gestión de los recursos hídricos deber ser sistémica.
2. El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 ampara el derecho humano al agua y al saneamiento. Por tanto, todas las personas, y especialmente aquellas más vulnerables, deben tener acceso al agua en cantidad y calidad necesarias para el uso personal y doméstico, la producción de alimentos y para garantizar la salud de cada persona.
3. Para llevar a cabo una buena gestión de las aguas subterráneas, es esencial tener un conocimiento claro y preciso sobre su funcionamiento. No se puede gestionar aquello que no se conoce. Deben tenerse en cuenta aspectos básicos como: a) La unidad del ciclo hidrológico; b) Qué es un acuífero y cómo se delimita; c) Diferencia entre recarga, recurso y reserva de agua subterránea; d) Qué es un balance hídrico y cómo se estiman sus términos; e) Los principales problemas relacionados con la cantidad (explotación intensiva) y calidad (contaminación) de las aguas subterráneas, etc.
4. A la hora de determinar la fuente de agua más adecuada para abastecimiento a una población, es conveniente considerar las siguientes ventajas de las aguas subterráneas: buena calidad general, temperatura constante, facilidad de extracción, proximidad al centro de consumo, fácil adaptación a la demanda, protección natural frente a la contaminación, inercia frente a períodos de sequía, capacidad de almacenamiento de los acuíferos, etc. Aunque sin olvidar sus posibles inconvenientes: descenso continuado de niveles, cambios en el esquema de flujo afectando a manantiales, ríos y/o humedales, cambios en la calidad del agua, posibles procesos de subsidencia y colapso, mayor afección y dificultad de limpieza frente a la contaminación, entre otros.
5. La protección de los acuíferos, en cantidad y calidad, es importante no solo para garantizar el suministro actual y futuro de aguas subterráneas, sino porque afecta al resto del ciclo hidrológico. Muchas enfermedades provienen de bacterias, virus y protozoos que tienen su origen o se transmiten a través del agua. De ahí que las comunidades de usuarios deben tener un control del agua

durante todo el proceso, desde la captación hasta la evacuación, pasando por el transporte, almacenamiento, desinfección y distribución del agua.

6. En todo proyecto de cooperación es fundamental involucrar al personal de la zona beneficiada, para que sean ellos los principales actores de la gestión del agua. De ahí la conveniencia de aplicar el principio de subsidiaridad, y de promover el fortalecimiento institucional de aquellas organizaciones competentes en el suministro del agua.
7. Para que un proyecto de cooperación de agua y saneamiento sea exitoso, es preciso reservar una partida del presupuesto a la sostenibilidad del sistema de suministro de agua durante todo su ciclo de vida, desde el comienzo del proyecto, durante la ejecución del mismo y después de su terminación, mediante un mantenimiento técnico, social, ambiental y legal.
8. Es importante dedicar tiempo y esfuerzo a reforzar la educación hidrosanitaria, y a concienciar a la población de la conveniencia y utilidad de un determinado proyecto de cooperación de agua y saneamiento, a través de los comités de gestión y de la participación de la mujer. De esta manera, se pueden adquirir o desarraigar hábitos en un tiempo razonablemente breve.
9. ONGs, Agencias de Cooperación y Organizaciones Mundiales para el Desarrollo, deben contar con profesionales que conozcan bien las características específicas de las aguas subterráneas, y estén capacitados para diseñar los sistemas de mantenimiento y sostenibilidad de las instalaciones oportunas. Un modo de facilitar esta competencia profesional es la participación en cursos de formación y especialización que promueven distintas instituciones. La asistencia a estos cursos de formación y especialización, es muy útil por los conocimientos adquiridos, y especialmente por el contacto y relación con técnicos de otras naciones. El conocimiento de actividades relacionadas con el agua y saneamiento de otros países, tanto si han sido un éxito como un fracaso, constituye un buen modo de acertar en la resolución de casos similares del propio país.
10. Es preciso considerar siempre el agua como fuente de cooperación y no de conflicto. Se necesita descubrir y fomentar los valores menos tangibles relacionados con el agua, aquellos que no se pueden pesar ni medir pero que son igualmente importantes, como los éticos, religiosos, ambientales, culturales y sociales.

## 11. Recomendaciones

Estas veinte recomendaciones que se recogen a continuación, provienen de los comentarios que hicieron los alumnos en el coloquio final que tuvo lugar el viernes 4 de junio. Dicho coloquio se centró en dos grandes bloques: a) Gobernabilidad de las aguas subterráneas; y b) Conocimiento de los acuíferos y del funcionamiento de las aguas subterráneas. Junto a las recomendaciones, aparecen también algunos de los problemas y dificultades que existen en los diferentes países para alcanzar una buena gestión de las aguas subterráneas.

### a) Gobernabilidad de las aguas subterráneas

1. La dificultad en la gobernabilidad de los recursos hídricos en Perú, se debe principalmente a una deficiente gestión de los mismos, y no a su ausencia o escasez. Esta afirmación podría extenderse a los demás países de América Latina y el Caribe.
2. Para una buena gobernabilidad del agua en Colombia, es fundamental profundizar en el enfoque sistémico del ciclo hidrológico. En muchas regiones con abundante agua superficial, se percibe un olvido de las aguas subterráneas en detrimento de una buena gestión sistémica del recurso hídrico.
3. Cuando se habla de gobernabilidad en América Latina y el Caribe, generalmente se está refiriendo a las aguas superficiales. Las aguas subterráneas suelen quedar relegadas a un segundo plano.
4. En muchos países latinoamericanos se desconocen los recursos hídricos subterráneos de que disponen, especialmente aquellos que se encuentran en acuíferos compartidos por varios países. El acuífero Guaraní, que comparten cuatro países de Sudamérica, es uno de los más grandes del mundo con 1,2 millones de km<sup>2</sup>, y es fundamental que se llegue a un consenso por parte de esos cuatro países, para alcanzar una buena gobernabilidad de sus aguas subterráneas.
5. En la República Dominicana la gobernabilidad pasa por tener un control de los permisos que se conceden para extraer las aguas subterráneas. En muchas ocasiones ese control es poco riguroso y no está claro a qué autoridad le compete conceder tales permisos. Además, la gobernabilidad se centra exclusivamente en el suministro de agua potable a la población, sin apenas atender a la depuración de las aguas residuales, que se vierten directamente a los cauces de los ríos. Hay que tener en cuenta que el saneamiento es tan importante como el acceso al agua potable. Para ello resulta determinante la actitud de los políticos y su conocimiento del ciclo hidrológico.
6. Una buena gobernabilidad del agua lleva consigo que los políticos responsables de su manejo y gestión, cuenten con la colaboración de técnicos y expertos que puedan asesorarles en sus decisiones.
7. En algunos países como Colombia, la variabilidad de la precipitación está muy acentuada según las zonas. Las corporaciones autónomas gestionan el agua en función de sus características propias. En algunas de ellas se han propuesto

actuaciones de recarga inducida, pero el aparato burocrático es enmarañado y complejo, y dificulta que puedan llevarse a cabo.

8. Conviene que el agua dependa de una única autoridad y al más alto nivel, que sea neutral y no dependa de ninguno de los usuarios, considerando que el medio ambiente es uno de ellos. Así, en Argentina existen varios organismos que se ocupan del agua, y muchas veces se solapan las competencias sin que haya comunicación entre ellos.
9. En Perú, el ANA pertenece al Ministerio de Agricultura. Esta institución tiene una estrategia descentralizadora y cuenta con 14 entidades administrativas. Los recursos financieros no son suficientes para alcanzar una buena gobernabilidad: faltan infraestructuras y hay regiones que no disponen de agua potable las 24 horas del día.
10. La gobernabilidad exige que haya una legislación de aguas que sea moderna y que contemple los recursos financieros y el personal necesarios para la gestión completa del recurso hídrico. Esta legislación debería comprender la integridad del ciclo hidrológico y, por tanto, incluir también las aguas residuales. Esto es especialmente urgente en países como Honduras y Colombia.
11. El conocimiento de las aguas subterráneas es fundamental para una buena gobernabilidad. Hay que reservar financiación para conocer cada acuífero. Esta información debe ser confiable y de libre circulación.
12. Un claro problema de gobernabilidad en Colombia radica en el proceso de potabilización del agua. Se trata de un procedimiento costoso que se reparte entre instituciones territoriales y los propios usuarios. Muchos de estos usuarios son comunidades indígenas que no cuentan con los medios económicos necesarios y de ahí surgen conflictos difíciles de resolver.
13. En Perú existe un problema grande de gobernabilidad debido a los frecuentes casos de contaminación de origen minero y agrícola, que se da en las partes altas de algunas cuencas hidrográficas.
14. En Bolivia existe un Ministerio de Agua y Medio Ambiente. Las instituciones que tienen competencias en el agua van en la dirección del manejo integral de la cuenca y del agua, incorporando las exigencias que lleva consigo el Derecho Humano al agua y al saneamiento. Sin embargo, ha habido conflictos políticos y sociales que han dificultado esta gestión integral del agua.

#### **b) Conocimiento de los acuíferos y del funcionamiento de las aguas subterráneas**

15. Para gestionar las aguas subterráneas, hay que conocer el acuífero, sus dimensiones, límites, litología, las zonas de recarga y descarga, el sentido del flujo, la calidad química de sus aguas, etc. Este conocimiento debería estar acompañado por una red de monitoreo de las aguas subterráneas que permitiera caracterizarlas en el tiempo, tanto en cantidad como en calidad. Solo así es posible diseñar una buena planificación del recurso, estimar las pérdidas

de agua que se producen en la agricultura y en el abastecimiento urbano, y fomentar, en su caso, el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.

16. El conocimiento de los aspectos básicos de las aguas subterráneas y del ciclo hidrológico debería comenzar en las escuelas y colegios de primaria. En muchos casos, los estudiantes acceden a la universidad con un completo desconocimiento de este recurso. Además, en los grados más afines a la Hidrogeología, como pueden ser las ingenierías o las ciencias de la naturaleza, apenas se aborda esta materia. Por tanto, se recomienda que, en los planes académicos de grado y postgrado de las universidades iberoamericanas, exista la posibilidad de estudiar esta disciplina, y que no haya que salir del país para adquirir estos conocimientos.
17. La cooperación internacional puede ayudar a que se desarrollen cursos específicos sobre aguas subterráneas en los países iberoamericanos, y a promover estudios hidrogeológicos en las zonas más desfavorecidas y marginales. Muchas comunidades indígenas no pueden cubrir el gasto económico de dichos estudios.
18. Para facilitar el acceso al conocimiento e información sobre las aguas subterráneas, conviene que haya un sistema nacional de información que los centralice, y que sea el depositario de los resultados científicos y técnicos que otras instituciones van generando. Si no, es difícil y supone un tiempo considerable reunir todos esos conocimientos e investigaciones. Este es el problema de algunos países como Guatemala, donde el acceso a la información es limitado y muchas veces se restringe a usuarios privados.
19. El conocimiento de las aguas subterráneas de un país, pasa necesariamente por elaborar un inventario de los pozos, sondeos y manantiales, así como conocer el estado químico de sus aguas y su comportamiento hidrogeológico.
20. En muchos países como Uruguay, existen núcleos de población del interior que se abastecen con aguas subterráneas. Casi ninguno de ellos cuenta con estudios sobre la vulnerabilidad de sus aguas a la contaminación. Y eso ocurre en un país donde la totalidad de la población tiene acceso al agua potable.