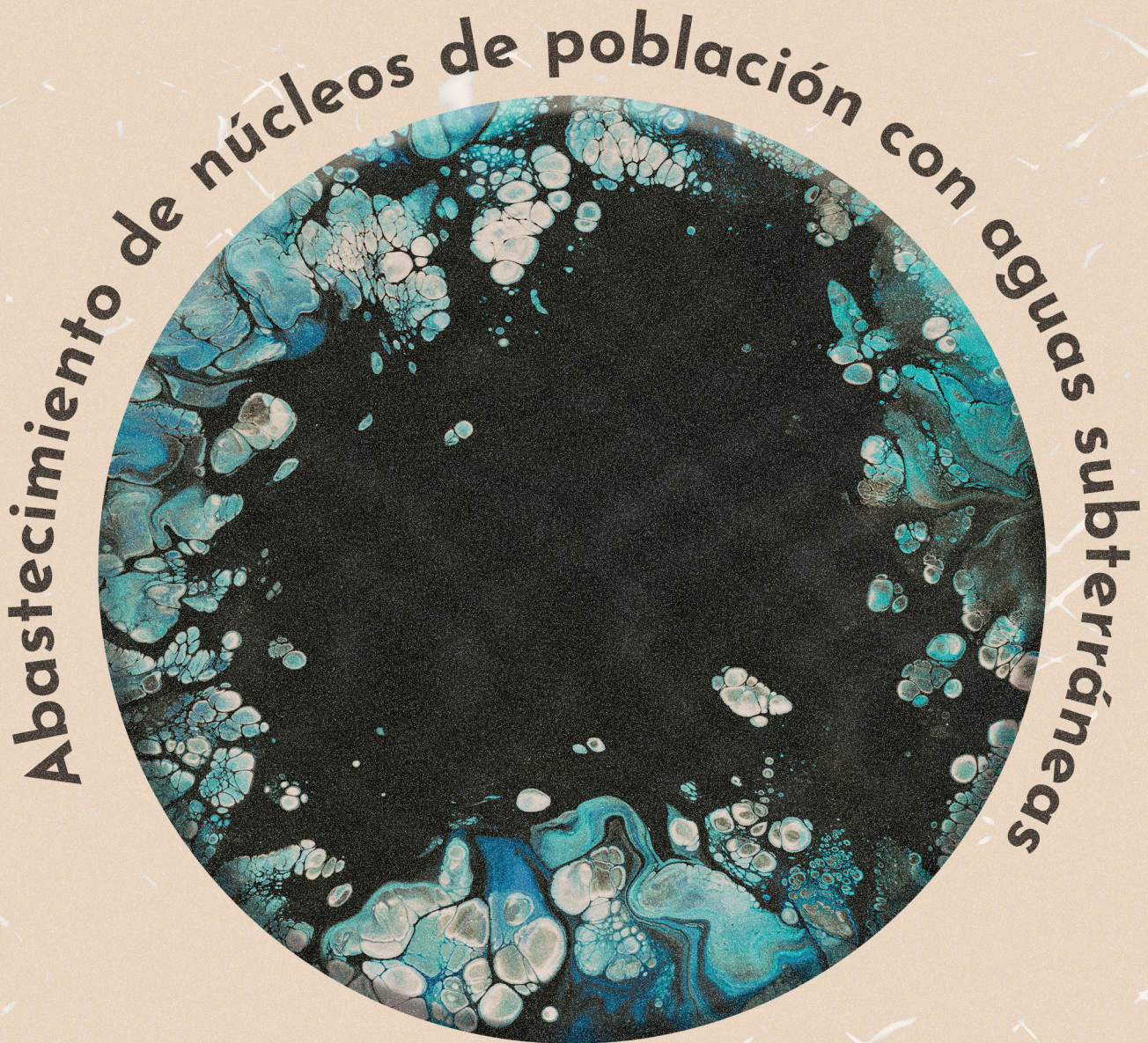


Relatoría



- 2ª. edición -

Del 14 de marzo al 1 de abril 2022

*Dr. Juan María Fornés Azcoiti
Instituto Geológico y Minero de España (IGME)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*



TABLA DE CONTENIDOS

Introducción

1. Introducción. La cooperación para el desarrollo y abastecimientos urbanos.
2. Metodologías para el suministro sostenible a las ciudades y núcleos urbanos /
Presentación de un ejercicio práctico sobre la metodología que se debería utilizar para abordar un estudio de la mejora y sostenibilidad del abastecimiento de agua a grandes núcleos de población de América Latina, basada en aguas subterráneas, superficiales y aguas no contabilizadas.
3. Gestión convencional de las aguas subterráneas destinadas al suministro de grandes ciudades y núcleos urbanos: caso de la Comunidad de Madrid (España).
4. Gestión de la recarga natural y artificial de acuíferos.
5. Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.
6. Gestión de la cantidad, calidad y protección de puntos de agua e instalaciones destinadas a la explotación para el suministro de agua a ciudades y núcleos de población.
7. Presentación de un ejercicio práctico de abastecimiento con aguas subterráneas a un pequeño núcleo de población.
8. Conclusiones y Recomendaciones.
9. Acto de clausura.

Anexo I: Mesa redonda del viernes 18 de marzo.

Anexo II: Bibliografía a disposición de los participantes.

Abastecimiento de núcleos de población con aguas subterráneas (2ª edición)

Introducción

Las aguas subterráneas constituyen un recurso estratégico que puede jugar un papel esencial en el abastecimiento urbano y/o rural, y en el desarrollo de la actividad humana, especialmente de la agricultura. Muchas de las megalópolis del planeta (Ciudad de México, Lima, Manila...) y miles de otras ciudades de tamaño medio en todos los continentes, dependen en gran medida de las aguas subterráneas para su abastecimiento. Este recurso puede jugar un papel importante en el alivio de la pobreza, la salud y la marginación social, puesto que se trata de un recurso muy abundante cuya captación supone un coste relativamente bajo: el volumen global de aguas subterráneas almacenado bajo la superficie terrestre representa el 96% del agua dulce no congelada de todo el planeta.

Una primera razón para abordar este curso es que aproximadamente el 80% de la población de América Latina se concentra en áreas urbanas. Dentro de las ciudades y núcleos urbanos latinoamericanos existe, por lo general, un alto porcentaje de marginalidad, que conlleva, no pocas veces, importantes demandas de suministro de agua para consumo humano en calidad y cantidad. Se estima que 26 millones de personas que habitan en zonas urbanas de Latinoamérica, no disponen de un sistema seguro y constante de suministro de agua. Además, entre el 40 y el 60% del agua que se consume en Sudamérica procede de los acuíferos. Este porcentaje es aún mayor en América Central y en México.

Las características específicas de las aguas subterráneas, tales como su mayor accesibilidad, mayor inercia y resiliencia frente a los periodos de sequía, y su mejor calidad química respecto a las aguas superficiales, favorecen su desarrollo especialmente en regiones áridas y semiáridas. De esta manera, constituyen un elemento importante -al que se le podría definir de "estratégico"-, en la consecución del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: *Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. 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.

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.

Esta segunda edición del curso “Abastecimiento de núcleos de población con aguas subterráneas”, es la tercera actividad de un total de cinco 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, para implementarlo en 2021 y 2022. Esta actividad, ha sido coordinada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) en colaboración con la AECID.

El curso, de 35 horas lectivas, se ha desarrollado en la modalidad online, desde el 14 de marzo hasta el 1 de abril de 2022. Se han inscrito 56 participantes, provenientes de los siguientes 8 países: Argentina, Bolivia, Colombia, El Salvador, España, Honduras, Perú y República Dominicana.

Las sesiones, fueron impartidas por los siguientes ponentes: Carlos Fernández-Jáuregui (Water Assessment & Advisory Global Network), Luis Javier Lambán Jiménez (Instituto Geológico y Minero de España), José Luis Armayor Cachero (Consultor internacional en Hidrogeología), José Manuel Murillo Díaz (Instituto Geológico y Minero de España), José María Esnaola Navarro (Consultor internacional en Hidrogeología), José Antonio Iglesias Martín (Canal de Isabel II) y David Galán Martín (Canal de Isabel II). El coordinador del curso fue Juan María Fornés Azcoiti (Instituto Geológico y Minero de España).

El viernes 18 de marzo tuvo lugar una mesa redonda, en la que intervinieron los siguientes panelistas: Aurélien Dumont (UNESCO), Juan Antonio López Geta (Club del Agua Subterránea, España), Edwin A. García Ovalle (Universidad de San Carlos, Guatemala) y Paul C. Carrión Mero (Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador).

En cuanto a la metodología, el curso se ha organizado en tres módulos. Cada uno se ha desarrollado a lo largo de una semana. Los contenidos por módulo fueron los siguientes: 1) Acto de inauguración del curso, presentación de tres sesiones y mesa redonda con cuatro panelistas internacionales; 2) Presentación de tres sesiones; y 3) Presentación y resolución de tres sesiones de ejercicios, propuesta de conclusiones y recomendaciones por parte de los asistentes, y clausura del curso.

Los ponentes y panelistas 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 actos de

apertura y de clausura 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 descargados por todos desde la plataforma Moodle.

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

a) Módulo 1 (14-18 de marzo): Aspectos generales y metodologías sobre el abastecimiento a núcleos urbanos con aguas subterráneas.

- Acto de inauguración del curso.
- Tema 1: Introducción. La cooperación para el desarrollo y abastecimientos urbanos.
- Tema 2: Metodologías para el suministro sostenible a las ciudades y núcleos urbanos / Presentación de un trabajo práctico sobre la metodología que se debería utilizar para abordar un estudio de la mejora y sostenibilidad del abastecimiento a grandes núcleos de población de América Latina, basada en aguas subterráneas, superficiales y aguas no contabilizadas.
- Tema 5: Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.
- Mesa redonda:
 - ✓ Aguas subterráneas y asentamientos humanos. Ejemplos de acciones del PHI – UNESCO.
 - ✓ El conocimiento hidrogeológico del territorio y el abastecimiento urbano. La experiencia española.
 - ✓ Reseña histórica del abastecimiento de agua a la Ciudad de Guatemala 1776-2022, y sobreexplotación de los recursos hídricos.
 - ✓ Acuífero costero de Manglaralto, una zona semiárida del Suroeste del Ecuador.

b) Módulo 2 (21-25 de marzo): Técnicas destacadas y/o novedosas aplicables a la mejor sostenibilidad de los suministros de agua a las ciudades.

- Tema 3: Gestión convencional de las aguas subterráneas destinadas al suministro de grandes ciudades y núcleos urbanos: caso de la Comunidad de Madrid (España).
- Tema 4: Gestión de la recarga natural y artificial de acuíferos.
- Tema 5 bis: Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Resolución de ejercicios.
- Tema 6: Gestión de la cantidad, calidad y protección de puntos de agua e instalaciones destinadas a la explotación para el suministro de agua a ciudades y núcleos de población.

c) Módulo 3 (28 de marzo-1 de abril): Casos prácticos y resolución de ejercicios.

- Tema 7: Presentación de un ejercicio práctico de abastecimiento con aguas subterráneas a un pequeño núcleo de población.
- Tema 8: Presentación por los distintos países de la matriz de diagnóstico sobre la metodología a utilizar para abordar un estudio de la mejora y sostenibilidad del abastecimiento de agua a grandes núcleos de población de América Latina, basada en aguas subterráneas, superficiales y aguas no contabilizadas.
- Tema 9: Resolución del ejercicio práctico de abastecimiento con aguas subterráneas a un pequeño núcleo de población, propuesto en el Tema 7.
- Sesión de Conclusiones y Recomendaciones.
- Acto de clausura del curso.

El objetivo general del curso es subrayar la importancia que pueden desempeñar las aguas subterráneas en el abastecimiento a núcleos de población. Así, cobra especial realce la eficacia del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el abastecimiento urbano, así como la gestión de la recarga natural y artificial. Se persigue que, en la medida de lo posible y a través de los participantes a la actividad, las aguas subterráneas tengan una mayor relevancia e impacto en las políticas públicas nacionales, tanto a nivel legislativo como de acciones concretas. Para ello, se ha procurado fomentar las relaciones entre los diferentes actores e instituciones asistentes al curso, como por ejemplo entre la Administración pública del agua y las entidades que gestionan el abastecimiento de agua a poblaciones.

El curso está dirigido principalmente a directivos, técnicos y responsables de la gestión del agua, tanto a nivel nacional como regional y local, especialmente en lo referente al suministro de núcleos de población con aguas subterráneas. También han participado operadores de empresas de abastecimiento de aguas y profesores universitarios.

Las personas a las que se dirige la actividad están relacionadas de alguna manera con el suministro de agua potable a la población, con la gestión integral del agua, especialmente aquellos que forman parte de la Administración pública del agua, tanto en grandes núcleos de población como en poblaciones medianas y pequeñas, y en comunidades indígenas y zonas rurales desprotegidas. Cobran especial importancia aquellas personas que tienen responsabilidades públicas en lugares más complejos desde el punto de vista hídrico, como serían aquellas zonas donde los recursos hídricos fueran insuficientes para abastecer a la población –debido tanto a la escasez natural del recurso como al aumento de la población–, o estuvieran contaminadas con peligro para la salud humana. En algunos casos se desconoce el potencial que tienen las aguas subterráneas y su alta calidad para satisfacer las necesidades más elementales de la persona, como es el derecho humano a disponer de agua potable en cantidad y calidad suficiente, y al saneamiento.

Esta Relatoría recoge de un modo sucinto los contenidos de los temas que se han tratado en el curso, y de los abordados en la mesa redonda. Se ofrecen una serie de Conclusiones

y Recomendaciones, sugeridas por los asistentes al curso, que pueden servir de hoja de ruta para alcanzar una gestión sistémica de los recursos hídricos en los países iberoamericanos.

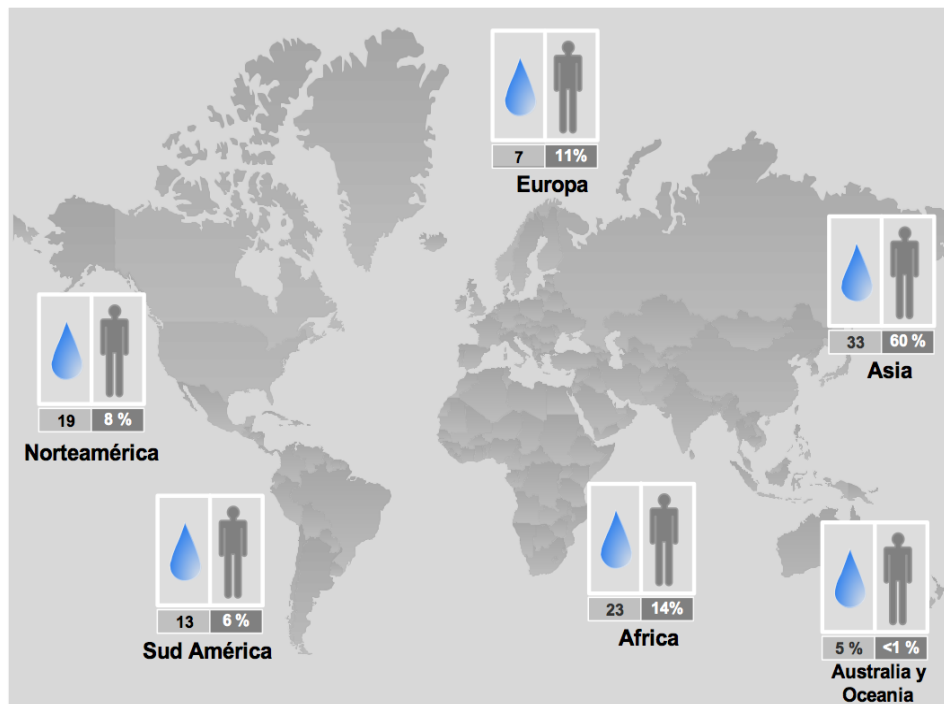
1. Introducción. La cooperación para el desarrollo y abastecimientos urbanos

Carlos Fernández-Jáuregui

1.1. Introducción

Los recursos hídricos son abundantes en el planeta. Se estima que el 97,5% de todos ellos, correspondería al agua salada de mares y océanos; y el 2,5% restante, al agua dulce, distribuida de la siguiente manera: 1,67% en forma de hielo en el Polo Norte y Polo Sur, y en glaciares y nieves permanentes; 0,77% como aguas subterráneas; y el 0,06% correspondería a ríos y lagos de agua dulce.

En la distribución por continentes, el porcentaje de recursos hídricos y población, sería el siguiente: África cuenta con el 23% de los recursos hídricos del planeta para un 14% de la población mundial; Europa, el 7% de recursos hídricos para el 11% de la población mundial; Asia, el 33% de recursos hídricos para el 60% de la población mundial; América cuenta con el 32% de los recursos hídricos para el 14% de la población mundial; Australia, el 5% de recursos hídricos para el 1% de la población mundial.



Porcentaje de recursos hídricos y de población por continentes
Fuente: Presentación de Carlos Fernández-Jáuregui

A la pregunta que se hizo a los participantes sobre si había escasez de agua en el mundo, la mayoría respondió afirmativamente. Sin embargo, la realidad es otra: la escasez no se debe al recurso sino a la falta de infraestructuras y de ideas por parte de los gestores del agua.

El agua es clave para la vida humana y su desarrollo, y para un adecuado saneamiento. Así lo ha reconocido Naciones Unidas: la Asamblea General de la ONU aprobó en 2010 el derecho humano al agua potable y al saneamiento; y en 2015 aprobó el derecho humano al agua, por un lado, y el derecho humano al saneamiento, por otro. Esta importancia queda reflejada en el análisis que el ponente presenta del agua respecto a la salud, y a su uso doméstico (15%), agrícola (75%) e industrial (10%).

Una de las ideas que el ponente quiso subrayar es que el agua es fuente de cooperación y no de conflicto. Para ello, es necesario llevar a cabo una buena gestión de los recursos hídricos, que se base, entre otros principios, en los siguientes: considerar este recurso en el marco de la unidad del ciclo hidrológico; el agua es un recurso finito y frágil; su gestión implica la participación de políticos, expertos y usuarios; el agua es un bien ambiental, económico, social, cultural y religioso; considerar la cuenca hidrográfica como unidad de gestión.

1.2. Dificultades en la gestión del agua

Ahora bien, todavía queda un largo recorrido para alcanzar esta meta, pues existen problemas y situaciones complejas que lo impiden. El ponente señala las siguientes dificultades: no poder acceder a un agua en buenas condiciones de cantidad y calidad, ha sido la primera causa de contagio del Covid-19, y es la segunda causa de muerte infantil; se estima que la pérdida de días escolares al año debido a enfermedades relacionadas con el agua, asciende a 443 millones; un elevado número de mujeres emplean varias horas al día en ir a buscar agua; son cuantiosas las pérdidas económicas asociadas a gastos en salud o a bajas laborales causadas por el agua (en África Subsahariana alcanza el 5% del PIB).

Otro campo de capital importancia son las pérdidas de agua debido a fugas en la red de distribución de agua potable en núcleos de población, pudiendo alcanzar, según cifras de 2012, el 44% en Ciudad de México, 37% en Nápoles y Glasgow, 33% en Montreal, 26% en Roma, 24% en Edimburgo, frente al 8% de París, 7% de Nueva York, Copenhague y Colonia, y el 4% de Ámsterdam.

1.3. Gobernabilidad del agua

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.

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, compartida y sostenible.

2. Metodologías para el suministro sostenible a las ciudades y núcleos urbanos / Presentación de un ejercicio práctico sobre la metodología que se debería utilizar para abordar un estudio de la mejora y sostenibilidad del abastecimiento de agua a grandes núcleos de población de América Latina, basada en aguas subterráneas, superficiales y aguas no contabilizadas.

José Luis Armayor Cachero

2.1. Introducción

El principal objetivo de un sistema de abastecimiento de agua es proveer de agua de un modo adecuado, confiable y económicamente viable, libre de cualquier riesgo para la salud y sin comprometer el acceso al recurso y su disponibilidad para las generaciones venideras. Los sistemas de agua están formados por una serie de tecnologías que cubren diferentes grupos funcionales, como son la captación, el tratamiento y almacenamiento, la aducción y distribución, y el tratamiento y manejo seguro en el hogar.

Este tema ha sido preparado por el ponente con el objetivo de que los participantes sean capaces de acometer un diagnóstico de la situación actual de un sistema de abastecimiento de agua a núcleos urbanos, y de barajar posibles soluciones ante los problemas que se presenten. Se trata de una metodología abierta y universal, que necesita adaptarse a cada caso particular. De ahí, que haya una parte práctica en la que, por países, deben configurar una matriz de diagnóstico correspondiente a una población de más de 300.000 habitantes ubicada en sus respectivos países.

La exposición se ha centrado en los siguientes contenidos, necesarios para que el abastecimiento de agua a núcleos urbanos sea sostenible: aguas subterráneas, superficiales y aguas no contabilizadas; redes de conducción y distribución; infraestructuras de regulación y tratamiento; gobernanza del agua; aspectos transversales como asentamientos, género, mortalidad infantil y servicios ecosistémicos; y nuevas metodologías y técnicas para mejorar la sostenibilidad del abastecimiento de agua a las ciudades.



Fuente: Presentación de José Luis Armayor

2.2. Aguas subterráneas

El aprovechamiento de las aguas subterráneas de una manera sostenible lleva consigo garantizar las reservas actuales y futuras de los acuíferos explotados y la calidad del agua de los mismos. Para ello, se esperan los siguientes resultados: a) Elaboración de productos hidrogeológicos de alta calidad: bases de datos e inventarios de puntos de agua y focos de contaminación, MDT y MDE, mapas geológicos e hidrogeológicos, red de control piezométrico y de calidad, estudios geofísicos; b) Modelo conceptual de funcionamiento del acuífero: zonas de recarga, límites geométricos, conexiones

hídricas, caracterización hidroquímica, hidrodinámica y balance hídrico; y c) Plan Técnico de gestión y explotación que garantice la sostenibilidad del uso de las aguas subterráneas y alimiente las actuaciones legales y reglamentarias.

2.3. Aguas superficiales

Respecto a las aguas superficiales, se trata de optimizar la explotación de los recursos actuales, y de incrementar la búsqueda de nuevos recursos, debido a los efectos del cambio climático. Para ello, se esperan los siguientes resultados: a) Mejora en calidad y cantidad del sistema: actualización de bases de datos, inspección y modelización hidrodinámica de cuencas y acueductos, búsqueda y caracterización de nuevos recursos; b) Elección de nuevos sistemas de suministro de agua complementarios o de refuerzo; c) Coordinación y uso conjunto con las aguas subterráneas: regulación de los tiempos de explotación; y d) Elaboración de un Plan Maestro que incluya una cartera de proyectos futuros (para los países en desarrollo con bases para la financiación internacional) y de medidas de resarcimiento.

2.4. Aguas no contabilizadas

En el caso de las aguas no contabilizadas, el objetivo claro es su reducción (fugas, tomas y derivaciones ilegales y gestión de la facturación). Para ello, se esperan los siguientes resultados: a) No se trata solo de comparar producción/facturación, puesto que se necesita también un análisis integral del modo de funcionamiento de la empresa, y la identificación de las causas que generan las pérdidas; b) No basta con reducir pérdidas físicas y aparentes, sino que también puede implicar: la reingeniería de los procesos de la empresa, la revisión de los sistemas, el uso de tecnología inteligente, la formación del personal, el uso de herramientas de gestión, el fomento de la productividad y el fomento eficiencia general de la empresa.

2.5. Gobernanza y sostenibilidad

En cuanto a la *gobernanza* del agua, se refiere a la interacción de los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos, que entran en juego para regular el desarrollo y gestión de los recursos hídricos, y la provisión de servicios de agua a diferentes niveles de la sociedad.

Existen otros aspectos transversales que son importantes para alcanzar la deseada sostenibilidad en el abastecimiento de agua a núcleos de población: a) Asentamientos (población vulnerable): catastro de usuarios de los asentamientos, capacidad de pago, catastro de redes, catastro de tomas ilegales y suministro de agua, educación hidrosanitaria, régimen tarifario subvencionado, programas de lucha contra la pobreza, la población excluida (viudas y personas con discapacidades) y la delincuencia; b) Género: censo de población femenina y participación de las mujeres en los sistemas de

gestión interna y como beneficiarios; c) Mortalidad infantil de origen hídrico: censo de infantes menores de 5 años, seguimiento de enfermedades gastrointestinales de origen hídrico de infantes en centros de salud, seguimiento de la disminución de mortandad por la mejora en los sistemas de suministro de agua; d) Servicios ecosistémicos: valorar los servicios de abastecimiento de agua (productos que obtenemos de los ecosistemas), valorar los servicios de regulación: purificación del agua mediante la conservación de los ecosistemas para una mejor calidad de vida, análisis económico de los servicios ecosistémicos (ahorro), promoción de normativa ambiental, promoción de la gestión integral del recurso hídrico, especialmente protegiendo y recuperando las áreas de recarga naturales, y sensibilizar ante los síntomas del cambio climático.

Respecto a metodologías y técnicas para mejorar la sostenibilidad del abastecimiento de agua a las ciudades, destacan las siguientes: a) Uso conjunto basado en entornos de desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (SSD) para planificación y gestión de cuencas o de sistemas de recursos hídricos (Aquatool); b) Recarga artificial de acuíferos; c) Reutilización de aguas residuales para riego y limpieza de calles; d) Reutilización de aguas de tanques de tormenta; e) Plantas desaladoras de aguas salobres; f) Sistemas condominiales; y g) Tecnologías inteligentes para el uso del agua: SWIT incluye medición inteligente (AMR/AMI), distritos hidrométricos (DMAs), gestión de presión (PMA), detección activa de fugas, sistemas de información de gestión (MIS), sistemas de gestión de relaciones con los clientes (CRM), sistemas de información geográfica (SIG), control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), y modelado hidráulico.



Fuente: Presentación de José Luis Armayor

2.6. Ejercicio práctico: matriz de diagnóstico

En cuanto al ejercicio práctico, consiste en fijar una metodología para abordar el diagnóstico de la sostenibilidad básica de un sistema de agua, para una ciudad mayor de 300.000 habitantes en Latinoamérica y el Caribe. Para ello, hay que seguir los siguientes pasos:

3. Gestión convencional de las aguas subterráneas destinadas al suministro de grandes ciudades y núcleos urbanos: caso de la Comunidad de Madrid (España)

David Galán Martín

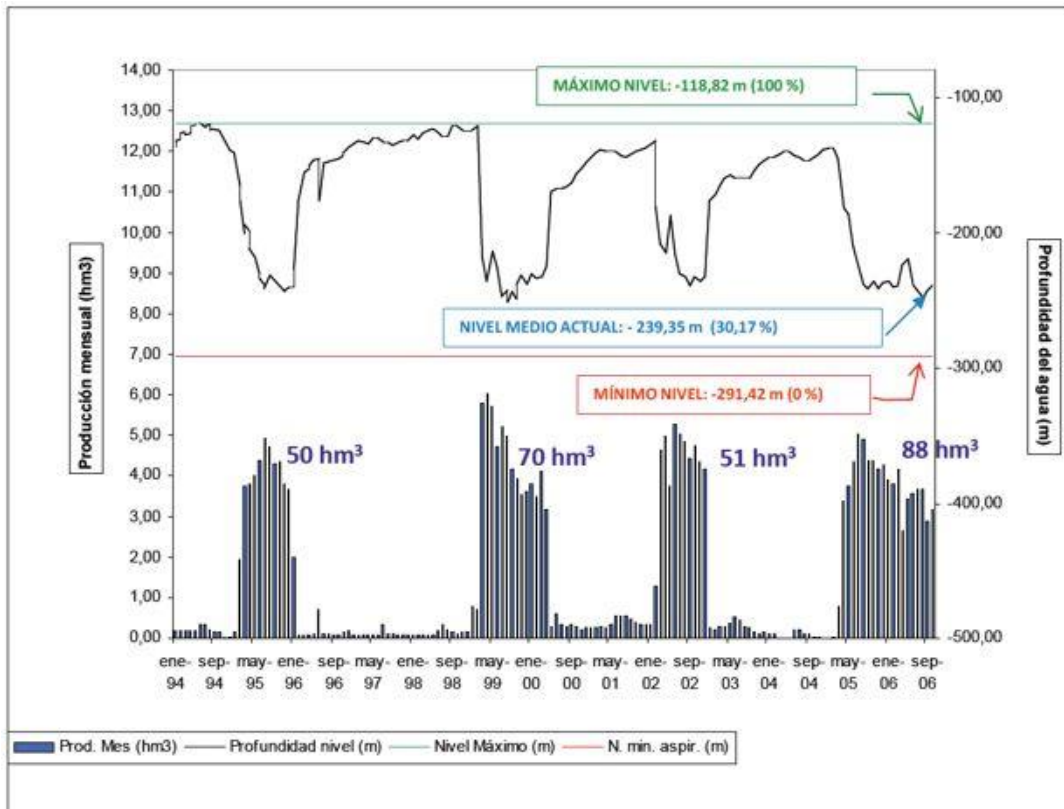
3.1. Acuíferos en la Comunidad de Madrid

El agua subterránea en grandes municipios se utiliza principalmente en casos de sequía y de incidencia. En la Comunidad de Madrid, se pueden distinguir dos tipos de acuíferos:

- **Acuífero cretácico carbonatado:** se extiende a lo largo de 56 km² al NE de la Comunidad, y presenta una potencia media de 150 m. Se comporta como un acuífero libre en las zonas de afloramiento, y cautivo en el resto. La recarga, estimada en 12 hm³/año, se produce por infiltración de agua de lluvia y de los arroyos provenientes de la sierra que circulan sobre este terreno. Sus aguas presentan facies bicarbonatada cálcica y sulfatada cálcica y son tratadas en la ETAP de El Bodonal.
- **Acuífero terciario detrítico:** se extiende a lo largo de 2.600 km² en la parte intermedia de la Comunidad, y presenta una potencia de 1.000-3.000 m. Se considera un acuífero único, heterogéneo y anisótropo. La recarga, estimada en 120-150 hm³/año, se produce en los interfluvios de los ríos Jarama, Manzanares y Guadarrama, a partir del agua de lluvia. La descarga se produce tanto a los arroyos y zonas húmedas, como a los principales ríos de la región. Las aguas son bicarbonatadas cálcicas en los interfluvios y bicarbonatadas sódicas en las zonas de descarga.

3.2. Recursos hídricos disponibles de la Comunidad de Madrid

El ponente explica las distintas fases en la perforación de los sondeos, junto con su equipamiento y electrificación. El Canal de Isabel II, empresa que suministra agua a la casi totalidad de la Comunidad de Madrid, realiza un uso conjunto de todas las fuentes de agua disponibles en la región: superficiales, subterráneas y de reutilización, siendo las aguas superficiales la fuente de suministro prioritaria. La capacidad de bombeo de aguas subterráneas puede alcanzar los 100 hm³/año en situaciones de sequía, que representa el 18-20% del consumo de la Comunidad de Madrid, y se distribuye en 6 campos de pozos: zona norte, zona oeste, zona sur, zona Guadarrama, zona Torrelaguna y zona Cadalso.



Utilización de aguas subterráneas. Fuente: Presentación de David Galán

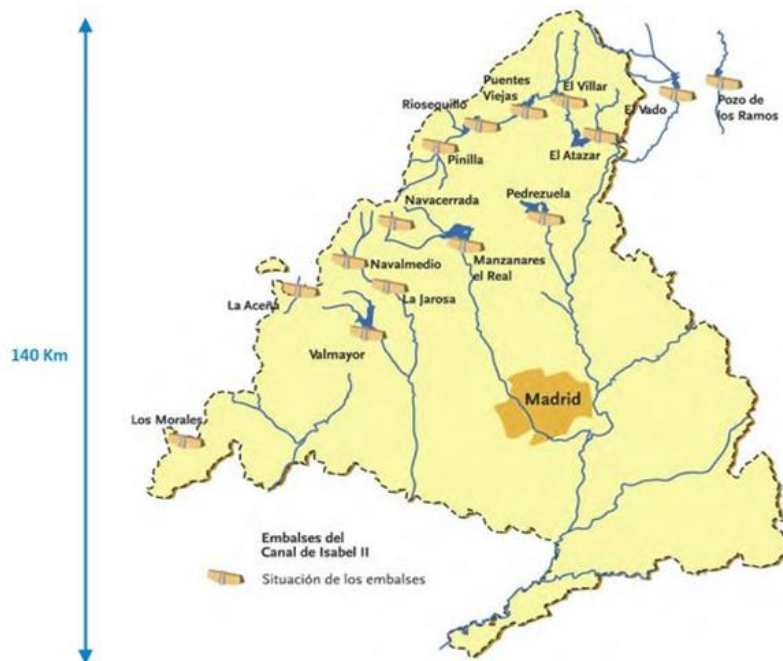


Pozos en el acuífero terciario detrítico
Fuente: Presentación de David Galán

En el Canal de Isabel II, las fases desde la captación hasta la depuración son las siguientes: captación, producción eléctrica, tratamiento, transporte, almacenamiento, distribución y depuración.

Los recursos hídricos proceden de tres ámbitos diferentes:

- Recursos ordinarios (946 hm³): 13 embalses y 4 azudes.
- Recursos complementarios (120 hm³): río Alberche (embalses de Picadas y San Juan).
- Recursos estratégicos (80 hm³): 54 sondeos procedentes de los campos de pozos del acuífero terciario detrítico. Profundidad 300-700 m.



Embalses del Canal de Isabel II. Fuente: Presentación de David Galán

Las infraestructuras principales son:

- Red de aducción: 540 km.
- Red de distribución: 12.000 km.
- 23 grandes depósitos (3 hm³).
- 240 pequeños depósitos en municipios.
- 18 grandes elevadoras.
- 12 estaciones de tratamiento de agua potable (45 m³/s).
- 69 estaciones depuradoras (260 hm³/año).

Estas instalaciones necesitan operaciones de conservación y mantenimiento. El mantenimiento puede ser preventivo, predictivo o correctivo. Además, existe una red piezométrica en el acuífero terciario detrítico, integrada por 65 piezómetros a diferentes profundidades: 50, 150 y 300 m. Y dispone de una tecnología satelital para el control de desplazamientos y deformaciones en presas, para la cuantificación de las reservas de agua acumulada en forma de nieve en la Sierra de Guadarrama, y para el control de la evolución de la calidad del agua embalsada.

4. Gestión de la recarga natural y artificial de acuíferos

4.1. Recarga natural (Luis Javier Lambán Jiménez)

4.1.1. Introducción

La recarga natural es una variable esencial del balance hídrico y un concepto de difícil determinación. El término *natural* hace referencia a condiciones no perturbadas por la acción del hombre, a lo largo de todo el ciclo hidrológico. En términos generales, se entiende por recarga el proceso por el que se incorpora agua del exterior a un acuífero. Se trata de un volumen que penetra en un cierto intervalo de tiempo; el volumen por unidad de tiempo se conoce como *tasa de recarga*.

Los términos *recarga* e *infiltración* no son sinónimos. El primero se utiliza cuando el agua alcanza la zona saturada del acuífero, mientras que el segundo se emplea cuando el agua atraviesa la superficie del terreno, aunque no alcance la zona saturada.

La procedencia del agua que se infiltra puede tener su origen en la precipitación, en ríos y ecosistemas acuáticos, en retornos de riego y pérdidas en canales de distribución, en parques y zonas ajardinadas urbanas, o bien por transferencia de otros acuíferos. En función de su origen, los métodos de estudio y evaluación de la recarga serán diferentes. En todo caso, esta evaluación es incierta por varias causas: a) Falta de precisión de las variables que la determinan; b) Incertidumbre en los parámetros; c) Naturaleza empírica o semiempírica de fórmulas y gráficas; d) Simplificaciones para tratar de cuantificar los procesos; e) No identificación o mala identificación de estos procesos.

Además de la incertidumbre que lleva consigo la evaluación de la recarga, puede haber errores en su estimación debido a los siguientes factores: a) Modelo conceptual inadecuado; b) Errores en la variabilidad espacial y temporal; c) Errores de medida; d) Errores numéricos de cálculo.

4.1.2. Estimación de la recarga natural

¿Cuáles son los métodos de cálculo que existen para estimar la recarga?

- a) Balance de agua en el suelo.
- b) Análisis de fluctuaciones freáticas.
- c) Perfiles y variaciones de humedad del suelo.
- d) Gradientes térmicos verticales.
- e) Modelos numéricos de flujo del agua subterránea acoplados a un modelo de cálculo de la recarga.
- f) Balance de la deposición atmosférica de cloruro.
- g) Técnicas de trazadores ambientales o artificiales.
- h) Observación de cambios verticales de salinidad en sondeos.
- i) Medida de la evapotranspiración real y de la humedad del suelo mediante sensores remotos (satélite o aerotransportados) o desde la superficie (métodos geofísicos).

Es necesario tomar medidas para proteger las áreas de recarga. Así, en zonas urbanas, se pueden planificar zonas verdes y parques que favorezcan la recarga. Otro sistema son los perímetros de protección, que se estudiarán en el tema 6 el curso.

4.2. Recarga artificial (José Luis Armayor Cachero)

4.2.1. Introducción

Se entiende por *recarga artificial* al conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía (falta de recarga hídrica y/o demanda) y disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad. En España se gestionan 380 hm³/año de agua por recarga artificial.

4.2.2. Objetivos que persigue la recarga artificial

Esta tecnología pretende contribuir, siempre que técnica y económicamente sea factible, a una gestión más racional de la potencialidad hídrica que presenta una determinada cuenca hidrográfica o sistema de explotación. Los objetivos que persigue se engloban en dos tipos principales; siendo muy frecuente el que ambos aparezcan juntos: a) Aumento y optimización del volumen de los recursos hídricos; b) Prevención o corrección del deterioro de la calidad del agua. Pero también persigue otros objetivos colaterales como: a) Compensar pérdidas de recarga natural; b) Frenar la intrusión salina; c) Estabilidad geotécnica de terrenos naturales; d) Regenerar ecosistemas, etc.

4.2.3. Información necesaria en un estudio para recarga artificial

Para realizar con éxito actuaciones en el campo de la recarga artificial de acuíferos, es preciso disponer información detallada relativa a los siguientes puntos:

- Cálculo de agua disponible para la recarga (modelos de precipitación y escorrentía).
- Litología y aspectos geológicos de los materiales que integran el acuífero.
- Geometría del acuífero.
- Piezometría.
- Hidroquímica y calidad del agua.
- Parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento, capacidad de infiltración).
- Velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo.
- Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero (reservas útiles).
- Zonas de drenaje o descarga natural.
- Relación río-acuífero.
- Usos, demandas y consumos de agua.
- Balance hídrico.

4.2.4. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de recarga artificial

No todo son ventajas en la recarga artificial, pues también existen algunos problemas anejos, como pueden verse en la siguiente Tabla.

FACTOR	METODOS	SUPERFICIALES	EN PROFUNDIDAD
Precio y disponibilidad del terreno.		Puede ser muy difícil o imposible establecerlos en una zona poblada o muy cultivada por no disponer de espacio o por ser los terrenos muy caros. Precisa en general terrenos baratos.	Pequeño. Precisan poco espacio.
Factores estéticos y ambientales.		Pueden presentar problemas de proliferación de insectos y roedores. Requieren cercados y vallas para proteger a personas y animales.	Excavos.
Permeabilidad del acuífero.		Media a grande.	Variable. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables, o cuando existen niveles poco permeables entre la superficie del suelo y el acuífero.
Construcción de instalaciones.		Pueden requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arcillosas, retirar vegetación, obtener diques resistentes, construir estructuras para la conducción del agua, etc.	Complicadas. Especialmente las instalaciones de pretratamiento e inyección.
Caudal recargable.		Pueden llegar a ser muy grandes.	Notablemente inferior si se compara con el medio de las instalaciones superficiales.
Pérdidas por evaporación.		En determinandos casos pueden ser importantes.	Nulas.
Requisitos de calidad del agua.		Prácticamente muy pequeños.	Muy grandes. Que implican un coste de mantenimiento a veces muy importante.
Colmatación		Los problemas derivados de la colmatación son generalmente pequeños.	Presentan una gran susceptibilidad a la colmatación.
Grado de depuración del agua.		Grande. El paso del agua por el medio no saturado es decisivo para conseguir una buena eliminación de los contaminantes.	Pequeño o nulo.

Ventajas e inconvenientes de los sistemas de recarga artificial

Fuente: Presentación de José Luis Armayor

Los métodos de recarga artificial pueden agruparse en dos tipos, en función de si se realizan en superficie o en profundidad. Entre los primeros unos pueden ser en cauces de ríos y otros fuera de ellos.

4.2.5. Dos casos prácticos: acuíferos de Orba I y Orba II

El ponente se detuvo en explicar dos casos prácticos de metodologías para la realización de operaciones de recarga artificial de acuíferos con aguas pluviales, en pequeñas cuencas hidrológicas situadas en zonas áridas del área Mediterránea. Se trata de zonas que tienen en común las siguientes características hidrológicas, sociales, y legales y económicas:

a) Hidrológicas

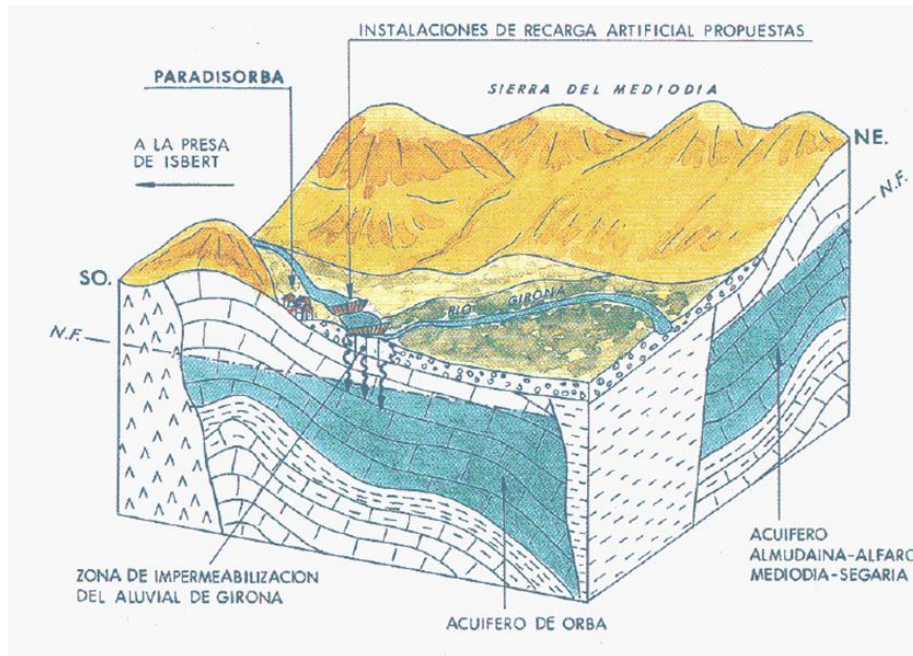
- Caudales intermitentes, con circulación constante durante 3 meses al año.
- Cuencas pequeñas de menos de 800 km² y longitudes que no sobrepasan los 100 km.

- No hay datos foronómicos, aunque sí hay una buena red de estaciones meteorológicas, sobre todo pluviométricas.
 - No hay un interés por realizar infraestructuras hidráulicas, salvo para seguimiento de avenidas: muros de laminaciones de avenidas y limnógrafos de escala controlados por Protección Civil.
 - Frecuentes fenómenos de gota fría.
 - Problemas de calidad de agua e intrusión marina.
- b) Sociales
- Zonas de gran presión agrícola (y animales estabulados) con problemas de nitratos y amonio.
 - Zonas de fuerte impacto turístico, en principio estacional que ha pasado a anual.
 - Grandes poblaciones con alta concentración de turistas y fuertes demandas.
 - Existencia de Reservas Naturales que condicionan caudales ecológicos, etc.
- c) Legales y económicas
- Exigencias legales sobre calidad de las aguas y Directiva Marco del Agua Europea (2000/60/CE).
 - ¿Costes económicos competitivos?: 0,23 €/m³ (50 m) y de 0,58€/m³ (500 m). Agua desalada entre 0,35 y 0,57 €/m³ (incluso,0.90 €/m³).

En el caso de la recarga en el acuífero de Orba I, sus características se resumen en las siguientes:

- Existe en el río Girona una presa de 27 m de altura de muro, con infiltraciones de agua al estar su vaso sobre un macizo kárstico.
- La generación de series históricas de precipitación para el periodo de 1975- 1998, ha dado como resultado una precipitación media de 810 mm/año con máximas que llegan hasta los 1.598 mm/año y mínimas de 378 mm/año. Mensualmente se llegan a alcanzar precipitaciones máximas de más de 200 mm, llegando incluso en un solo día a superar los 100 mm. Esto produce que la presa se desborde esporádicamente.
- La geometría del acuífero libre es un pequeño compartimento tectónico que alcanza espesores que superan los 500 metros. Los límites laterales del acuífero son complejos, estando asociados a discontinuidades tectónicas que lo ponen en contacto las formaciones impermeables del sustrato con los materiales del acuífero.
- Según la tipología climática del año hidrológico en curso, la recarga media anual del acuífero es muy variable. Así, para años húmedos alcanza valores de 5,3 hm³, para años de tipo medio de 3,7 hm³ y finalmente para años secos de 2 hm³.
- El acuífero estuvo sobreexplotado hasta el año 1988 y se extraían del acuífero 2,5 hm³ para abastecimiento a Calpe, más 0,40 m³/año para otros usos.

- La recarga artificial se basa en el uso de excedentes hídricos de la presa de Isbert que dispone 1,7 hm³/año como valor de escorrentía superficial medio, con máximos de 3,9 hm³/año y mínimos de 0,2 hm³.

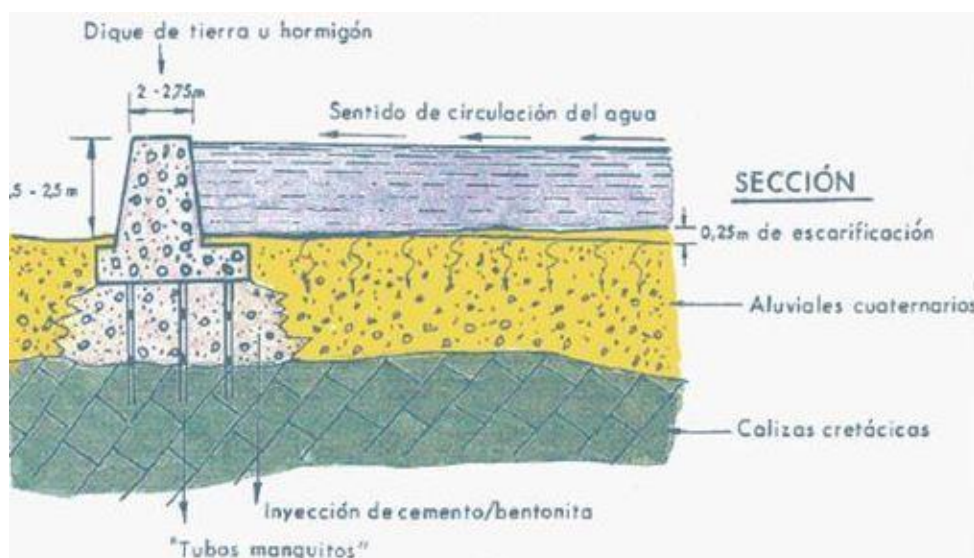


Fuente: Presentación de José Luis Armayor

En el caso de la recarga en el acuífero de Orba II, sus características se resumen en las siguientes:

- Se localizaron emplazamientos en paraje de MalPass, en contacto hidráulico con el acuífero de Orba, y mediante dos diques se alcanzó una capacidad real de embalsamiento cercana a los 28.125 m³. La tasa de infiltración es de 6 m/día.
- Se realizó un modelo matemático, fundamentado en el desarrollo de un algoritmo matemático que interpreta el acuífero de Orba como un modelo unicelular de parámetros agregados y que reproduce el fenómeno de la variación de niveles piezométricos del acuífero, como consecuencia de la recarga que lo alimenta y del régimen de explotación al que se encuentra sometido.
- El modelo se ha corrido en dos periodos; en el primero utilizando un umbral de precipitación de 240 mm para el periodo comprendido entre enero de 1975 y septiembre de 1985; y en el segundo mediante el método del S.C.S. de EE.UU. para el período comprendido entre enero de 1975 hasta agosto de 1998. Los resultados fueron los siguientes:
 - ✓ Primera simulación: elevación media del nivel piezométrico con respecto a la evolución medida de 17 m, alcanzándose máximos de 38 m y un volumen de recarga artificial para todo el período analizado de 1,9 hm³.

- ✓ Segunda simulación: elevación media del nivel piezométrico con respecto a la evolución medida de 18 m, alcanzándose máximos de 47,31 m y un volumen de recarga artificial para todo el período analizado de 8,6 hm³.



Fuente: Presentación de José Luis Armayor

4.2.6. Calidad del agua reutilizada destinada a recarga artificial

En cuanto a la calidad del agua reutilizada destinada a operaciones de recarga artificial, se fijan los límites que se reflejan en la Tabla siguiente (BOE: RD 1620/2007). Para la calidad del agua de recarga de otros orígenes, no existe una legislación específica.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
5.- USOS AMBIENTALES					
CALIDAD 5.1 a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	No se fija límite	1.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	NT ¹ : 10 mg N/L NO ₃ : 25 mg NO ₃ /L Art. 257 a 259 del RD 849/1986
CALIDAD 5.2 a) Recarga de acuíferos por inyección directa.	1 huevo/10 L	0 UFC/100 mL	10 mg/L	2 UNT	
CALIDAD 5.3 a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. b) Silvicultura.	No se fija límite	No se fija límite	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.
CALIDAD 5.4 a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso				

¹ Nitrógeno Total.

Fuente: Presentación de José Luis Armayor

4.2.7. Recarga artificial y cambio climático

Por último, la recarga artificial puede ser una buena medida de adaptación al cambio climático, como se aprecia en la siguiente Tabla (Fernández-Escalante et al. 2019).

EFECTOS CC	PROBLEMAS CC	SOLUCIONES MAR
↑ TEMPERATURA MEDIA	↑ Evaporación	Almacén subterráneo
	↑ ETP	Humedad edáfica
↓ PRECIPITACIONES ANUALES (esp. invernales)	↑ Demanda hídrica	Infiltración regeneradas
	↑ Riesgo incendio	Infiltración puntual/dirigida
	↓ Oferta hídrica	Autodepuración/Reinfiltración
	↓ Escorrentía	Almacén fuera de ribera
↑ FENÓMENOS EXTREMOS	↓ Humedales	Restauración / regeneración
	↓ E hidroeléctrica	Distribución gravedad / ahorro E
↑ NIVEL MARINO	↑ Avenidas	Infiltración excedentes
	↑ Sequías	Gestión plurianual / Reservas
	↑ Intrusión salina	Barrera hidráulica positiva

Fuente: Presentación de José Luis Armayor

5. Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas

5.1. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas (José Manuel Murillo Díaz)

5.1.1. Introducción

Se entiende por *uso conjunto*, la utilización planificada y coordinada de múltiples fuentes de agua para la satisfacción de una demanda, al objeto de obtener un mejor resultado, tanto técnico como ambiental, social y económico, que el conseguido usando una única fuente de agua.

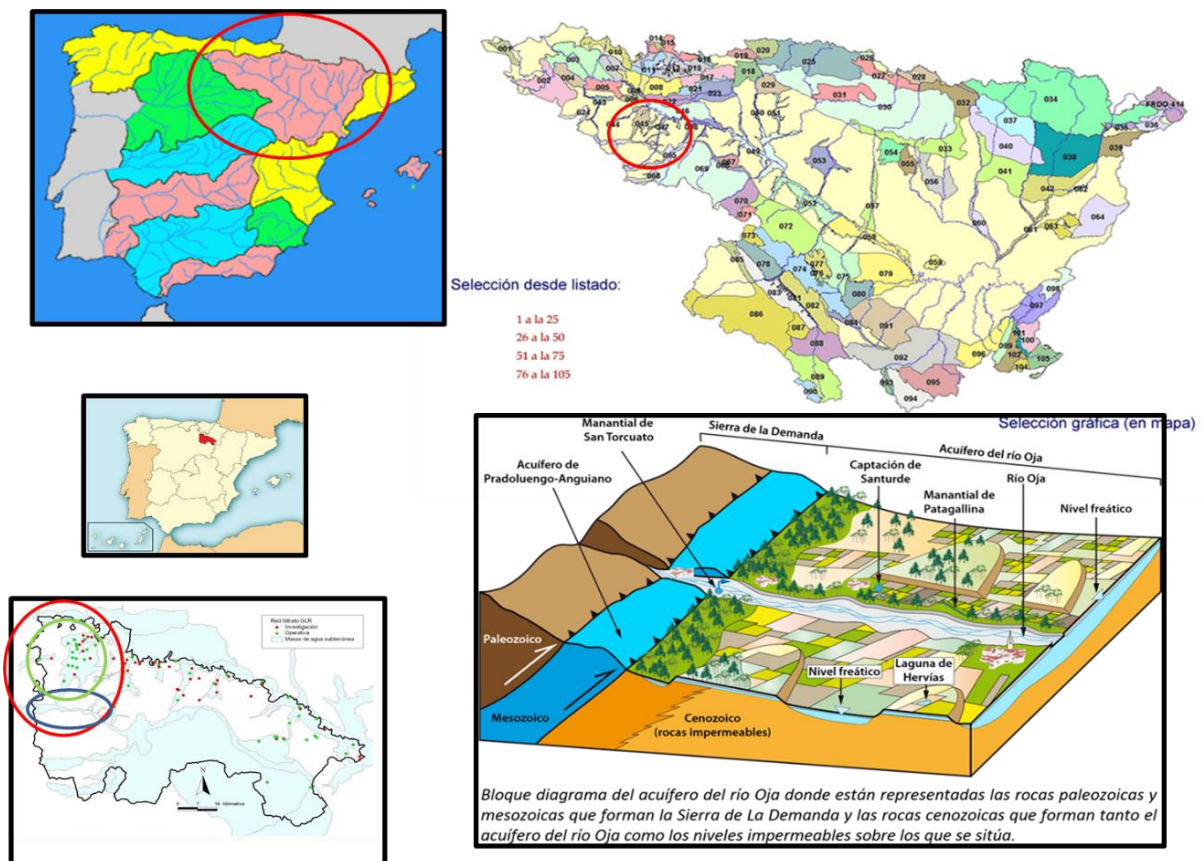
La implantación práctica del uso conjunto precisa, como paso previo a su establecimiento físico, de un detallado análisis del sistema de recursos hídricos que, en la mayor parte de los casos, se debe afrontar mediante modelación. Por tanto, la metodología de trabajo a seguir sería la siguiente:

- Recopilación, análisis y tratamiento de datos climáticos, hidrológicos y de calidad del agua.
- Construcción de un grafo o esquema topológico que represente y esquematice el conjunto de los elementos que forman el sistema.

- Identificación de los elementos del sistema de recursos hídricos capaces de aportar agua.
- Identificación de las estrategias de gestión que permiten integrar las aguas subterráneas en los esquemas de recursos hídricos superficiales.
- Identificación, descripción y definición de las infraestructuras hidráulicas que existen, o están previstas para construir, en el sistema de recursos hidráulicos: embalses, conducciones, planta de tratamiento de aguas residuales, potabilizadoras, desaladoras.
- Establecimiento de las reglas de operación que rigen el funcionamiento de los distintos elementos que conforman el sistema.
- Modelación y simulación del sistema de explotación bajo diferentes escenarios de gestión.

5.1.2. Caso práctico: acuífero del río Oja

Se explica el caso concreto de uso conjunto en el acuífero del río Oja, perteneciente a la Demarcación Hidrográfica del Ebro.



Fuente: Presentación de José Manuel Murillo

La tasa de recarga media calculada mediante el método APLIS v.2 ($R = [(A + P + 3 \cdot L + 2 \cdot I + S) / 0'9] \cdot Fh$) en el total del acuífero, es del 35%. Si se aplica esta tasa media de recarga a la precipitación media anual de 699,2 mm/año, se obtiene una tasa de recarga anual

al acuífero carbonático de Ezcaray de 242,97 mm (242.970 m³/km²), que, aplicada a la superficie total del acuífero (35,02 km²), supone una recarga media anual de 8,51 hm³/año. Los mapas que se han considerado en el método APLIS son las siguientes:

- **Altitud:** elaborado a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con 5 x 5 m de espaciado, de las Hojas 240 (Ezcaray) y 202 (Santo Domingo de la Calzada).
- **Pendiente:** elaborado a partir del MDT anterior. La pendiente de cada celda se determina en relación con sus ocho vecinos inmediatos y promediando dichas pendientes de acuerdo a su distancia con la celda central.
- **Litología:** elaborado a partir del Mapa geológico cartografiado a escala 1/10.000 *ex professo* para este proyecto.
- **Infiltración preferente:** elaboración propia a partir de fotointerpretación cotejada con el Mapa de zonas deprimidas (PITS, profundidad de cada depresión con respecto a su borde a partir del MDT) + trabajo de campo donde se cartografían tres zonas de máxima infiltración (depresiones endorreicas) + zonas de infiltración moderada que se corresponden con zonas de baja pendiente, inferior al 10%, coincidentes con afloramientos de materiales jurásicos.
- **Suelo:** elaborado a partir del Mapa de suelos de España, escala 1/1.000.000, del IGN.
- **Factor (Fh) características hidrogeológicas:** elaborado a partir del Mapa geológico realizado para el proyecto y de las observaciones de campo. Este factor quita peso, en el cálculo de la tasa de infiltración, a los afloramientos de materiales de carácter acuitardo con valor 0,1, respecto a los materiales acuíferos, con valor 1.

Mapa de distribución espacial de la tasa de recarga en el acuífero carbonático de Ezcaray
Método APLIS v.2

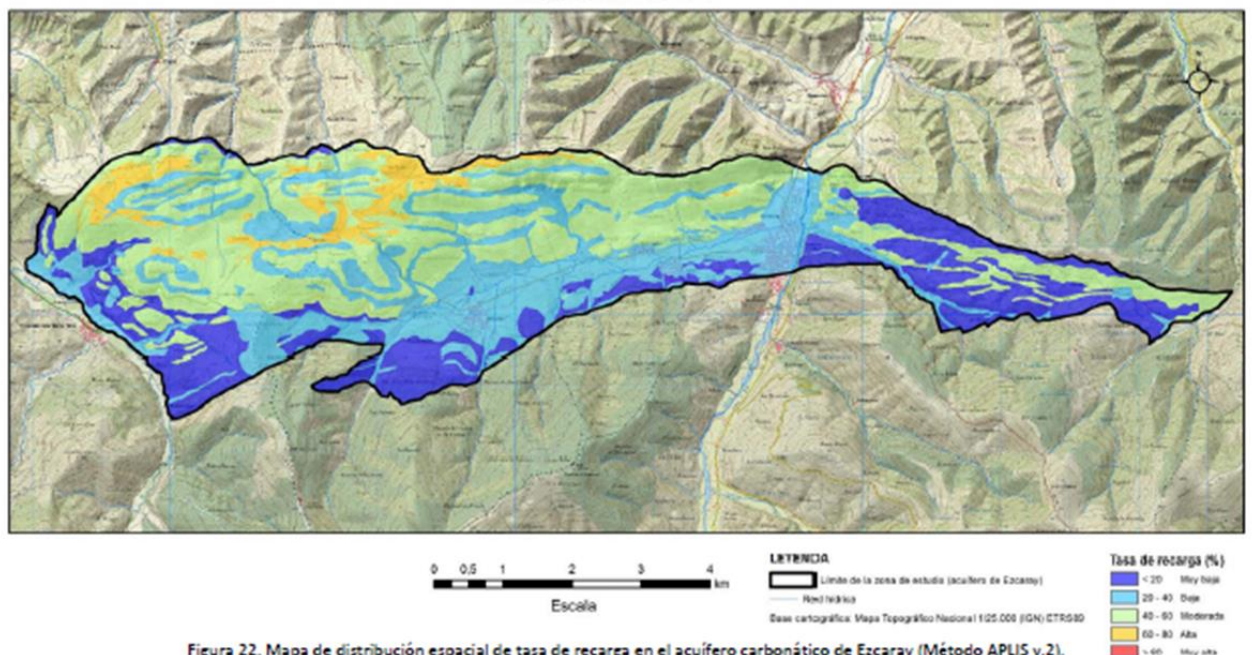


Figura 22. Mapa de distribución espacial de tasa de recarga en el acuífero carbonático de Ezcaray (Método APLIS v.2).

Fuente: Presentación de José Manuel Murillo

Una vez obtenido el mapa de estimación de la recarga natural por el método APLIS, el ponente explica el Código RENATA.

5.1.3. Conclusiones y recomendaciones

Para concluir, se extraen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Utilizar los embalses preferentemente en las épocas húmedas y las aguas subterráneas en las secas.
- Realizar el abastecimiento de los núcleos urbanos costeros con agua desalada.
- Complementar el regadío con aguas residuales tratadas.
- Utilizar las técnicas de recarga artificial para almacenar en los acuíferos los sobrantes de las aguas residuales tratadas, que no se puedan emplear directamente en regadío, ya que hay periodos en los que no se precisa regar, pero en los que se sigue produciendo agua residual.
- Adoptar medidas de ahorro de agua que pueden contemplar, tanto disposiciones educacionales, como el empleo de técnicas más eficientes de riego y la mejora de la infraestructura de las redes de distribución.

5.2. Modelos y herramientas informáticas para la mejora de la cantidad y calidad en sistemas para abastecimiento de aguas (José María Esnaola Navarro)

5.2.1. Introducción

Se entiende por *uso conjunto* la utilización planificada y coordinada de múltiples fuentes de agua para satisfacer una necesidad o demanda concreta, que frecuentemente se corresponde con el abastecimiento urbano, el abastecimiento industrial o el riego agrícola.

Pueden darse distintos tipos de uso conjunto de las fuentes de agua, como el uso alternante de aguas superficiales y subterráneas, la recarga inducida desde el río a un pozo de captación, la recarga artificial del acuífero, y el uso esporádico de las reservas del acuífero.

El tipo de uso conjunto a diseñar en cada caso dependerá de los usos y caudales a satisfacer, las infraestructuras e instalaciones preexistentes (por ejemplo, presas de embalses, sondeos de captación subterránea y conducciones) y las características de cada subcuenca o emplazamiento concreto.

El éxito de un proyecto de uso conjunto también está relacionado con la buena gobernanza del agua. Es necesario encuadrar la actuación propuesta en el marco de la planificación hidrológica y debatirla en un proceso participativo y abierto, con presencia de gestores, técnicos, y futuros usuarios.

A la vez, debe definirse el marco normativo que permita utilizar conjuntamente distintas fuentes y gestionarlas eficientemente, conforme a un programa específico que incluya los costes de explotación, control y mantenimiento de las instalaciones.

5.2.2. El modelo conceptual de uso conjunto

Desde el punto de vista técnico, un proyecto para uso conjunto debe fundamentarse en un modelo conceptual que explique su funcionamiento bajo distintas hipótesis. Para aprovechar toda su potencialidad es necesario conocer el funcionamiento de las aguas subterráneas y la gran capacidad de almacenamiento que ofrecen los acuíferos, ya que muchas veces constituyen auténticos embalses subterráneos.

Es esencial efectuar un buen estudio inicial del marco hidrológico, geológico e hidrogeológico de la zona de actuación, para caracterizar el flujo de agua en las fases atmosférica, superficial y subterránea, y evaluar el recurso hídrico disponible.

En particular, la georreferenciación de los afloramientos geológicos y de las columnas litológicas en sondeos de investigación, junto con los datos de prospecciones geofísicas y las cotas del terreno y láminas de agua superficiales y subterráneas, permitirán definir cortes hidrogeológicos característicos del acuífero y del flujo subterráneo en la zona de estudio.

También es imprescindible recopilar y tratar las series hidrológicas, sobre todo los datos de pluviometría, aforos en cauces y evolución piezométrica de las aguas subterráneas. La cuantificación de la tasa de infiltración del agua en el terreno resulta bastante más compleja y suele estimarse mediante métodos indirectos.

Coincidiendo con el estudio inicial de la actuación de la zona es aconsejable definir e instalar nuevos puntos y estaciones para disponer de una red inicial de control de la cantidad y calidad del recurso, máxime si en el entorno no existen redes oficiales de monitoreo. Las mediciones que se obtengan en esta fase proporcionarán una información muy valiosa para diseñar correctamente el proyecto.

Por ejemplo, para caracterizar si un río se comporta como ganador, perdedor o variable con respecto al acuífero, probablemente habrá que identificar adecuadamente las formaciones geológicas permeables que atraviesa su cauce, e interpretar los datos obtenidos en estaciones pluviométricas, los aforos en el cauce fluvial y los niveles medidos en pozos y piezómetros próximos.

Los balances hídricos en acuíferos o masas de agua subterránea son esenciales para caracterizar el comportamiento del sistema en distintos períodos temporales, tanto en condiciones naturales como en régimen modificado por extracciones para los distintos usos.

Estos balances se basan actualmente en el concepto de *recurso renovable*, que es el valor promedio interanual obtenido al sumar la infiltración de lluvias, la infiltración en cauces superficiales, los retornos totales y las entradas laterales subterráneas.

Si existen transferencias hídricas importantes entre acuíferos deberán descontarse las salidas laterales subterráneas para evitar duplicidades a la escala de cuenca, obteniéndose entonces el *recurso renovable zonal* del acuífero o masa de agua subterránea estudiada.

La planificación hidrológica incorpora los siguientes conceptos y criterios para asegurar los flujos subterráneos necesarios y la sostenibilidad del sistema a escala interanual:

- Restricción ambiental = Flujo subterráneo a ríos y a humedales (caudales ambientales requeridos) + Flujo subterráneo al mar (prevención de la intrusión marina en masas costeras).
- Recurso disponible = Recurso renovable zonal – Restricción ambiental.
- Índice de explotación = Bombeo subterráneo / Recurso disponible.

Toda esta información, junto con la que proporcionen las redes de monitoreo, debe ser tratada en formato digital para facilitar su almacenamiento y consulta. Estos datos constituirán la base sobre la que se pueden desarrollar distintos modelos matemáticos de uso conjunto (con grado creciente de complejidad y detalle):

- Modelos unicelulares acuífero-río, según el coeficiente de agotamiento α .
- Modelos de flujo distribuido, tipo Modflow.
- Modelos integrados de gestión conjunta y de soporte a la decisión (SSD), tipo AquaTool.

En los sistemas de abastecimiento de aguas es frecuente utilizar bases de datos vinculadas a los sistemas de información geográfica. También pueden estar integradas en entornos y redes informáticas de apoyo para la toma de decisiones planificadas, o bien directamente, para operar sensores que permiten el telecontrol de las instalaciones y la implementación de avisos y alertas tempranas.

De todos modos, las instituciones encargadas del suministro de agua no siempre disponen de estos complejos sistemas de información y gestión, especialmente cuando se trata de proporcionar abastecimiento para el consumo humano en áreas remotas o en pequeñas o medianas poblaciones que se encuentran aisladas y desconectadas de las conducciones regionales. En estos casos resulta muy útil apoyarse en una serie de programas y fácil manejo, como se detallará en los siguientes apartados.

5.2.3. Herramientas informáticas de acceso libre aplicables al uso conjunto

Se encuentra disponible una amplia selección de programas y códigos informáticos, de acceso libre y con interfaz en español. Se pueden descargar gratuitamente desde internet y se instalan fácilmente en un ordenador personal. Estas herramientas informáticas de apoyo son muy versátiles para el tratamiento de datos, el planteamiento de hipótesis de trabajo y la optimización de la cantidad y calidad del recurso hídrico en este tipo en proyectos de abastecimiento de aguas.

- **Utilidades basadas en hojas de cálculo:** Las aplicaciones del tipo hoja de cálculo, como *Apache OpenOffice Calc* (www.openoffice.org/es/), facilitan la importación de datos con formato de texto plano, o bien su anotación directamente en las hojas. Se pueden preparar y personalizar diversas plantillas o modelos para organizar la información geolocalizada: observaciones de campo, inventarios de puntos de agua y series de datos hidrológicos. También es posible diseñar gráficos automáticos para su incorporación a los informes. Resultan muy

útiles en el tratamiento de datos de aforos y la caracterización del coeficiente de descarga acuífero-río mediante modelos unicelulares.

- **Sistemas de geolocalización y representación de la información hidrológica e hidrogeológica:** Entre las aplicaciones que permiten trabajar con datos referenciados espacialmente cabe destacar dos tipos de sistemas de información geográfica (SIG) de acceso libre: a) *QGIS* (www.qgis.org) permite geolocalizar, superponer y operar con capas digitales en formatos de tipo ráster (píxeles) y vectorial (arco-nodo); b) *Google Earth Pro* para ordenadores (www.google.com) puede importar y exportar puntos, mapas y coberturas geolocalizadas de la zona de proyecto. También se puede analizar la evolución de los usos del suelo en el área de estudio comparando ortoimágenes históricas y actuales.
- **Sistemas de soporte a la decisión 'SSD' para la planificación de sistemas de recursos hídricos en cuencas hidrográficas:** Estos programas se basan en la integración de los principales elementos de un sistema hídrico en forma de *grafo*, junto con sus reglas o normas de operación en cantidad y calidad, facilitando la simulación y comparación de hipótesis de funcionamiento para optimizar su gestión conjunta en una cuenca hidrográfica. Destacan: a) *GEHMA-Gestión Hídrica Medio Ambiental* (www.igme.es), que fue desarrollado por el IGME y la Diputación Provincial de Alicante (España) para simular procesos de gestión de recursos hídricos superficiales, subterráneos y no convencionales. Incluye esquemas de uso conjunto, interacciones río-acuífero y criterios de optimización asociados a caudales ambientales y humedales, incluyendo criterios de calidad y coste económicos; b) *AQUATOOL-Versión Demo* (aquatool.webs.upv.es/) de la Universidad Politécnica de Valencia (España), UPV, es una versión de demostración para la optimización de la gestión conjunta en una cuenca y permite interrelacionar numerosos elementos como acuíferos, tomas en demanda, conducciones y recargas artificiales.
- **Bases de datos, inventarios y fichas de puntos de captación de aguas subterráneas para abastecimiento:** Se trata de un lote de aplicaciones de la Diputación Provincial de Alicante, España, que se pueden descargar desde su página web (www.ciclohidrico.com). Entre las utilidades aplicables a abastecimientos urbanos con aguas subterráneas se encuentran los siguientes: a) *CROQUIS* integra una base de datos de aguas y genera automáticamente las fichas de inventario con las fotografías, columnas geológicas, características de las instalaciones y los niveles piezométricos en sondeos y pozos; b) *PIBE* genera un inventario de sondeos y ensayos de bombeo en una base de datos, además de facilitar la interpretación automática de los datos obtenidos en cada ensayo, aplicando múltiples condiciones de contorno en el acuífero; c) *LOLI* optimiza el régimen y el caudal de explotación del abastecimiento con aguas subterráneas a pequeñas y medianas poblaciones, minimizando el coste eléctrico de la instalación electromecánica de la impulsión.

- **Diagramas hidroquímicos automáticos a partir de datos de analíticas de aguas:** Entre las aplicaciones que generan diagramas hidroquímicos automáticos cabe destacar *DIAGRAMMES* del Profesor Roland Simler, Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon en Francia (www.lha.univ-avignon.fr/). La interfaz principal se puede configurar en español, calcula correlaciones estadísticas entre los parámetros y facilita la interpretación de la calidad de las aguas y su evolución para estudios de gestión de cuencas y en proyectos de abastecimientos y riegos.
- **Optimización de las redes de distribución de abastecimiento de aguas:** La aplicación *EPANET* fue desarrollada por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos de América, y es ampliamente utilizada en el ámbito internacional. La UPV mantiene actualizado un blog en español (<https://epanet.es/>). Es una herramienta útil para simular y optimizar el funcionamiento hidráulico, así como el tiempo de tránsito y la calidad de las aguas esperable en las redes de abastecimiento de agua potable a presión, mediante el control de los caudales y las presiones en los nodos y las conducciones.

6. Gestión de la cantidad, calidad y protección de puntos de agua e instalaciones destinadas a la explotación para el suministro de agua a ciudades y núcleos de población

Luis Javier Lambán Jiménez

6.1. Gestión de la cantidad: *sobreexplotación* de acuíferos

El ponente comienza definiendo tres términos que pueden ser confundidos:

- a) Recarga: Volumen de agua que entra en un acuífero durante un periodo de tiempo.
- b) Recursos: Volumen de agua del que podría disponerse en un acuífero para un periodo de tiempo.
- c) Reservas: Cantidad de agua contenida en un acuífero en un instante determinado.

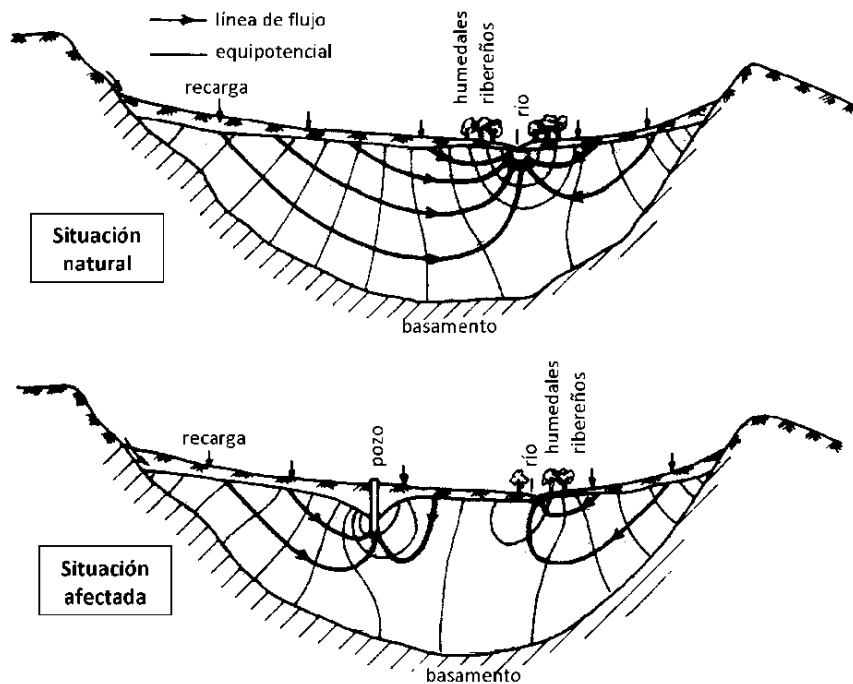
Se produce *sobreexplotación*, cuando durante varios años la extracción media de agua subterránea en un acuífero supera o se aproxima a se recarga media. Sin embargo, en la práctica se aplica este término cuando se observan o perciben ciertos resultados negativos de la explotación. Ahora bien, hay que tener en cuenta que pueden producirse efectos negativos sin que necesariamente la extracción sea igual o superior a la recarga. El término *sobreexplotación* tiene una componente subjetiva importante, cuya percepción puede cambiar con el tiempo. De ahí que sea más preciso y objetivo emplear

el término de *explotación intensiva*. El concepto de *minería del agua* se reserva a los casos en que la extracción de agua subterránea es muy superior a la recarga.

En toda explotación de agua subterránea, se producen unos efectos negativos que conviene no olvidar, entre los que destacan:

- Disminución progresiva de niveles piezométricos.
- Disminución de la descarga a manantiales, ríos y humedales.
- Cambios en el esquema de flujo subterráneo.
- Cambios en la calidad del agua.
- Disminución de la presión en los poros (subsistencia y colapsos).

Toda explotación de agua subterránea (excepto el caso de captación de manantiales o caudal de base fluvial), supone una extracción que produce un descenso de niveles (Custodio, 2012).



Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán

Para periodos transitorios prolongados, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Resulta difícil establecer relación causa-efecto (fala sensación de ausencia de interferencia), aunque finalmente el cambio se produce.
- El agua subterránea no es un nuevo recurso a sumar a las aguas superficiales.
- La extracción de agua subterránea se compensa por consumo de parte del agua almacenada en el acuífero (descenso de niveles).

- Cuando la extracción supera la recarga natural (más la inducida por descenso de niveles), se produce un consumo permanente de reservas y un descenso continuo de niveles (explotación intensiva / minería del agua).
- La composición del agua cambia más lentamente.
- Ejemplos: SO y parte central de Estados Unidos, NE de México, Brasil, China, India, SE y centro de España, N de África, Islas Canarias, Islas Baleares, Cabo Verde, Chipre, Islas Reunión, inmediaciones de grandes ciudades como Ciudad de México, Sao Paulo o Lima.

En cuanto a las medidas de gestión de la denominada *sobreexplotación*, destacan las siguientes:

- Integrar en un marco global, recursos disponibles y aspectos económicos, sociales, ambientales y usos del suelo.
- Buen conocimiento del funcionamiento del acuífero, que permita plantear diferentes escenarios de uso y disponibilidad de agua.
- Aplicar, en la medida de lo posible, parte de los beneficios en protección, restauración y mejora de la recarga.
- Reducir y controlar las extracciones, para alcanzar un uso racional y protección de agua subterránea y otros recursos de agua.
- Aumentar la eficiencia en el uso del agua (reducir pérdidas de agua, mejorar prácticas de riego, reutilización de agua, etc.).
- Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.
- Proteger e incrementar áreas de recarga mediante cambios en el uso del suelo, y establecer zonas de reserva de agua subterránea.

6.2. Gestión de la calidad: contaminación de aguas subterráneas

Conviene distinguir los siguientes conceptos:

- a) Composición: contenido en sustancias disueltas, partículas en suspensión, componentes biológicos y temperatura.
- b) Calidad: contenido en sustancias disueltas, partículas en suspensión, componentes biológicos y temperatura, en relación con una determinada utilización o aplicación.
- c) Contaminación: sustancias disueltas inconvenientes o nocivas / alteración de las propiedades físicas, químicas o biológicas como consecuencia de la actividad humana.
- d) Contaminante: factor físico, químico o biológico, que ocasiona, por su presencia o concentración anormal, una alteración del rango normal de la calidad natural de las aguas.

En cooperación, el agua potable se considera segura si cumple ciertas normas microbiológicas y químicas. Las Guías para la calidad del agua potable de la Organización

Mundial de la Salud (OMS) proporcionan orientación al respecto (http://www.who.int/topics/drinking_water/es/).

La contaminación puede ser:

- a) Según el tipo de contaminante:
 - Química: inorgánica / orgánica.
 - Biológica: bacterias y virus.
 - Radioactiva: ^3H , ^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{239}Pb y ^{226}Ra .

- b) Según su distribución:
 - Difusa: abonos agrícolas; intrusión marina; y productos sanitarios.
 - Puntual: actividades domésticas, ganaderas o industriales; residuos sólidos; tanques defectuosos; pozos mal construidos; vertidos directos mediante pozos de inyección.

- c) Según su fuente:
 - Urbana o doméstica: residuos sólidos; aguas residuales.
 - Agrícola: prácticas de regadío; fertilizantes (nitratos); pesticidas y plaguicidas.
 - Ganadera: nitratos; sólidos en suspensión; DBO; coliformes; bacterias fecales.
 - Industriales: hidrocarburos; residuos radioactivos; explotaciones mineras.

Las aguas subterráneas presentan, por lo general, una buena calidad química y bacteriológica por degradación y atenuación natural (autodepuración), en función del ambiente físico, estructura, mineralogía y características hidráulicas del acuífero. A lo largo de su circulación por el acuífero, pueden tener lugar los siguientes procesos: filtración mecánica; reacciones redox; absorción y adsorción del terreno; procesos bioquímicos; procesos de precipitación; intercambio de gases; desintegración radioactiva; procesos de dilución.

Entre los inconvenientes que presentan las aguas subterráneas en cuanto a su calidad, figuran la dificultad de detección, su larga duración y la complejidad en los procesos de corrección, además de que suele afectar a grandes volúmenes de agua.

6.3. Diseño de redes de seguimiento de calidad y contaminación

Es frecuente que las redes de seguimiento actuales, presenten los siguientes problemas:

- Puntos de características poco conocidas en los que se desconoce el tramo acuífero muestreado y la representatividad de la muestra analizada.
- Muchas veces se trata de pozos o sondeos de explotación para abastecimiento o regadío, y puede haber un sesgo en la información.

- Diferencias en el protocolo de muestreo, pues no se aplica un protocolo común, ni se adapta el muestreo al tipo de contaminación esperable.
- El coste económico de algunas determinaciones analíticas, puede condicionar en parte la información existente.

Una buena red de seguimiento lleva consigo:

- Adecuado número de puntos de control, frecuencia y parámetros a analizar: pH, CE, oxígeno disuelto, Temperatura, Ca, Mg, Na, K, Cl, NH₄, NO₃, NO₂, HCO₃ y SO₄. Otros parámetros según presiones o tensiones (metales pesados, plaguicidas, compuestos orgánicos...).
- Diseño de un protocolo de muestreo común en función de la situación, características del punto, y el tipo de contaminación esperable.
- Progresiva sustitución de puntos actuales de control por sondeos de investigación para diversos fines.

Valor orientativo	Tipo de afección	Riesgo contaminación	Estado químico
> 1000% V _L	Muy grave	Contaminación	Malo
> 100% V _L	Grave		
> 50% V _L	Moderada	Riesgo	Bueno
< 50% V _L > V _N	Leve		
V _N	Nula	Sin riesgo	

V_L = valor límite según el uso del agua o valor umbral para el estado químico

V_N = concentración o fondo natural

Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán

Parámetro	Valor Límite	Unidades
Concentración iones hidrógeno	entre 6,5 y 9,5	unidades pH
Conductividad eléctrica	2500	μS/cm a 20°C
Oxidabilidad	5	mg/l de O ₂
Cloruro	250	mg/l
Sulfato	250	mg/l
Sodio	200	mg/l
Nitrato	50 (*)	mg/l
Nitrito	0,50 (*)	mg/l
Amonio	0,5	mg/l
Arsénico	10 (*)	μg/l
Tritio	100 (*)	Bq/l

Valores límite indicados u obligados (*) por Directiva 98/93/CE y RD 140/2003 para abastecimiento

Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán

6.4. Modelación de la contaminación

Primeramente, hay que identificar los principales procesos de contaminación (modelo conceptual): a) Actividades agrarias: nitratos y plaguicidas; b) Actividades urbanas y/o industriales: nitratos, cloruros, hierro, manganeso, otros metales, disolventes organohalogenados, e hidrocarburos.

A continuación, se relacionan una serie de códigos de simulación numérica de flujo y transporte reactivo:

- PHREEQM: Transporte1D + PHREEQE (intrusión marina).
- MINTRAN: PLUME2D (elementos finitos) + MINTEQA2 (equilibrio).
- ACUITRAQ: Transporte2D + reacciones (equilibrio y cinética de adsorción).
- UNSATCHEM-2D: Transporte flujo y calor + reacciones (equilibrio y cinética) en medios porosos.
- CORE-LE y RETRASO: Transporte flujo y calor + reacciones (l secuencial o sustitución directa).
- BIOSCREEN y BIOCHLOR: hidrocarburos (parámetros agregados).
- BIOPLUME: hidrocarburos (parámetros distribuidos: flujo + transporte).

6.5. Protección de la cantidad y calidad de las aguas subterráneas

La protección de las aguas subterráneas se refiere tanto a problemas de calidad como de cantidad. Tiene como objetivo la conservación, protección y restauración de los acuíferos, para que las generaciones futuras puedan disfrutarlos, además de asegurar un suministro normal, incluso en situaciones de emergencia. Para ello se precisa considerar la zona no saturada del terreno, la zona de recarga natural y aquellas posibles de implantación de recarga artificial. No es lo mismo la protección de las aguas subterráneas que la protección de las captaciones.

Se entiende por *vulnerabilidad* la sensibilidad o susceptibilidad que tiene un determinado medio, incluido en un territorio concreto, frente a los impactos de origen natural o antrópico. La vulnerabilidad puede ser

- **Natural o intrínseca:** atributos (características geológicas de la formación, características hidrogeológicas del suelo y de la zona no saturada, parámetros hidráulicos y recarga) que controlan la aptitud del acuífero frente a un impacto indeterminado, y su capacidad de autorestauración. Se calcula y expresa en términos hidrogeológicos.
- **Específica:** aptitud del acuífero frente a un tipo de contaminante (concentración, movilidad y persistencia) o impacto concreto, dentro de su contexto coyuntural y socioeconómico. Se expresa en términos de riesgo.

Los objetivos de los mapas de vulnerabilidad respecto a la protección de la cantidad, pueden fijarse en los siguientes:

- Asegurar que las extracciones provoquen afecciones aceptables.
- Garantizar una parte de las reservas para situaciones de emergencia.
- Priorizar las dotaciones para el abastecimiento sobre las demás.

Para conseguir esos objetivos, se cuenta con los siguientes medios:

- Establecer restricciones y prohibiciones en extracciones y captaciones.
- Definir unas normas de explotación.
- Constituir comunidades de usuarios.
- Delimitar áreas de reserva.
- Proteger y favorecer las zonas de recarga.
- Implementación de sistemas de recarga artificial.

El objetivo de los mapas de vulnerabilidad respecto a la protección de la calidad, consiste en que el agua mantenga los usos preexistentes, incluidos los ambientales.

Para conseguir ese objetivo, se cuenta con los siguientes medios:

- Prevención.
- Control de las acciones contaminantes.
- Rápida actuación.
- Concienciación ciudadana.
- Constituir comunidades de usuarios.
- Delimitar perímetros de protección.

Los perímetros de protección tienen como objetivo salvaguardar la calidad de las aguas subterráneas que se extraen de las captaciones de abastecimiento urbano (suministro de agua potable). Se delimita un área en el entorno de la captación en la que, de forma graduada, se restringen o prohíben actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas. El sistema más utilizado consiste en dividir el entorno de las captaciones en diferentes zonas, graduadas de mayor a menor riesgo e importancia en las restricciones de actividad a imponer. Estas zonas son:

- a) Zona inmediata o de restricciones absolutas: aquella en la que el tiempo de tránsito del agua es de 24 horas, o área fijada de forma arbitraria entre 100 y 400 m². Se excluye cualquier actividad y se recomienda que permanezcan cerradas.
- b) Zona próxima o de restricciones máximas o de protección bacteriológica: aquella en la que el tiempo de tránsito del agua desde la superficie del terreno oscila entre 10 y 100 días. En función del tipo de terreno, espesor de la zona no saturada y caudal, se fija un área entre 2.500 y 90.000 m².
- c) Zona lejana o de restricciones moderadas: suele extrapolarse a los límites del acuífero y es aquella zona en la que el tiempo de tránsito es superior a una década. Hay restricciones en el uso del suelo.



Fuente: Presentación de Luis Javier Lambán

7. Presentación de un ejercicio práctico de abastecimiento con aguas subterráneas a un pequeño núcleo de población

José Antonio Iglesias Martín

7.1. Introducción

Un estudio hidrogeológico es el conjunto de estudios, trabajos y operaciones, llevados a cabo tanto por técnicas directas como indirectas, encaminadas a la localización de acuíferos, para captación de aguas subterráneas, en cantidad y con calidad adecuadas para el fin pretendido y definición de las condiciones óptimas de explotación.

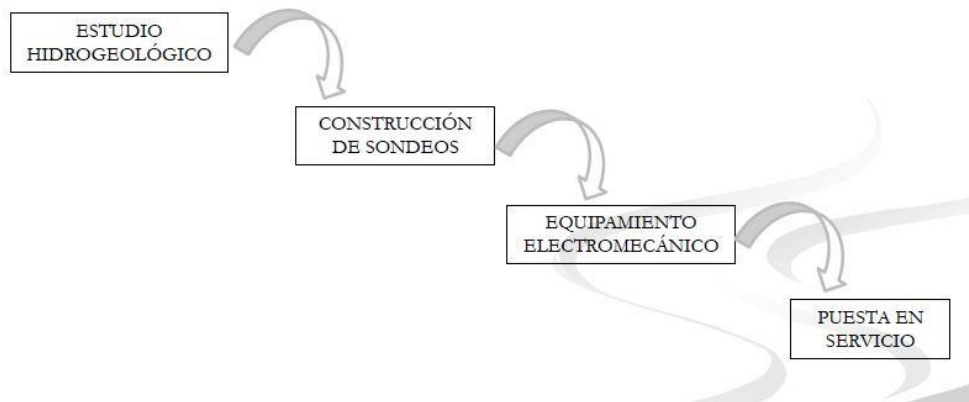
Antes de dar paso al ejercicio práctico, el ponente dio algunas nociones básicas sobre los tipos de captaciones y métodos de perforación, y sobre equipamiento electromecánico y conexión al sistema de abastecimiento.

7.2. Tipos de captaciones y métodos de perforación

La ejecución de una obra de captación de aguas subterráneas se proyecta en dos fases diferenciadas: a) Definición del tipo de captación en función de los materiales y de la demanda a cubrir (obra de captación); b) Equipamiento necesario de la captación para extraer el recurso y entregarlo en el sistema de abastecimiento (equipamiento de la obra). Entre los tipos de captaciones, destacan: a) Zanjas o drenes; b) Pozos con drenes radiales que suelen ubicarse en zonas cercanas a lechos de ríos y recogen agua de los alrededores del pozo principal y la reúnen para su bombeo; y c) Sondeos profundos.

En la perforación de un sondeo, hay que tener en cuenta las siguientes fases: perforación (emboquille, sondeo y reducciones); cementaciones (emboquille y aislamiento de tramos); tubería (emboquille, tubería de revestimiento ciega y filtrante); empaque de

gravas; desarrollo y limpieza; aforo; registros de vídeo y diagrañas; sellado y desinfección.



Los principales métodos de perforación son los tres siguientes: a) Percusión: 3-6 m/ día; b) Rotación a circulación directa e inversa: 10-30 m/día; c) Rotopercusión con martillo en fondo o en cabeza: 100-150 m/día. Estas técnicas necesitan diferentes tipos de medios auxiliares: motor, compresor, bomba de lodos, balsas de decantación, ciclonado, etc. Se adjunta un cuadro resumen de Tomás García (2012).

DUREZA	LITOLOGÍA (ejemplos)	DIÁMETRO (pequeños < 300 mm)	CAPTACIÓN	
			SUPERFICIAL (< 100 m)	PROFUNDA
MUY DURA Resistencia a compresión > 2.000 Kp/cm ²	PIZARRAS CUARCITAS GRANITOS BASALTOS	GRANDE	X	X
		PEQUEÑO	- ROTOPERCUSIÓN DIRECTA	X
DURA Resistencia a compresión entre 800 - 2.000 Kp/cm ²	CALIZAS DURAS ARENISCAS DURAS	GRANDE	- PERCUSIÓN	- PERCUSIÓN
		PEQUEÑO	- ROTOPERCUSIÓN DIRECTA - ROTOPERCUSIÓN INVERSA	- ROTOPERCUSIÓN DIRECTA - ROTOPERCUSIÓN INVERSA
MEDIA Resistencia a compresión entre 200 - 800 Kp/cm ²	CALIZAS ARENISCAS	GRANDE	- PERCUSIÓN - ROTOPERCUSIÓN DIRECTA - ROTOPERCUSIÓN INVERSA	- PERCUSIÓN - ROTOPERCUSIÓN DIRECTA - ROTOPERCUSIÓN INVERSA
		PEQUEÑO	- ROTACIÓN A C. DIRECTA (?) - ROTACIÓN A C. INVERSA (?)	- ROTACIÓN A C. DIRECTA (?) - ROTACIÓN A C. INVERSA (?)
BLANDA Resistencia a compresión menor que 200 Kp/cm ²	ARENA LIMOS MARGAS ARCILLA	GRANDE	- POZOS ABIERTOS (?) - PERCUSIÓN (?) - ROTACIÓN A C. INVERSA	- PERCUSIÓN (?) - ROTACIÓN A C. INVERSA
		PEQUEÑO	- ROTACIÓN A C. INVERSA	- ROTACIÓN A C. INVERSA

Fuente: Presentación de José Antonio Iglesias

7.3. Equipamiento electromecánico y conexión al sistema de abastecimiento

El equipamiento puede ser:

- a) Eléctrico: equipo de bombeo con motor eléctrico; cableado de alimentación; variador de velocidad; transformadores; interruptores y protecciones.
- b) Hidráulico: equipo de bombeo hidráulico; tubería de impulsión; elementos de control (sondas de nivel, transductor de presión, caudalímetro).

El hueco entre el grupo electrobomba y la entubación tiene que ser tal que asegure una velocidad mínima de refrigeración del motor ($V > 0,5$ m/s) y una velocidad máxima para evitar turbulencias y pérdidas elevadas ($V < 3$ m/s).

- Si $V < 0,5$ m/s → Camisa de refrigeración.
- Si $V > 3$ m/s → Bomba de menor diámetro.

7.4. Ejercicio a resolver

Definir algunos de los puntos a considerar en los proyectos constructivos de un pozo de captación de aguas subterráneas, cuyo objetivo es el abastecimiento de agua de un nuevo desarrollo urbanístico que se está planificando (quedan fuera del alcance del ejercicio la definición de los equipos electromecánicos y de control, excepto el grupo de bombeo), cuyo techo actual de planificación está constituido por los siguientes elementos:

- 800 viviendas unifamiliares, con la siguiente tipología:
 - ✓ 400 de 500 m² de parcela.
 - ✓ 200 de 750 m² de parcela.
 - ✓ 200 de 850 m² de parcela.
- 60 edificios de viviendas multifamiliares, cada uno de los cuales lo integran 16 viviendas de 130 m²/vivienda.
- La superficie de zonas verdes comunes planificada es de 2,5 ha.
- 1 Centro comercial de 300 plazas.
- 1 camping para 500 plazas.

Las aguas extraídas en el pozo se entregarán en el depósito municipal, situado 30 m más alto de cota que la boca de pozo y a una distancia de 850 m. El depósito tiene una capacidad de 6.000 m³ con un solo compartimento. Según los datos del estudio hidrogeológico realizado las características fundamentales del acuífero a explotar son las siguientes:

- Formación detrítica subhorizontal constituida por arcillas arenosas con intercalaciones de arenas limpias y de limos, de 200 m de espesor, que se apoya sobre un potente paquete de arcillas plásticas.

- La superficie piezométrica se sitúa a unos 50 m de profundidad, mostrando un ligero gradiente hidráulico hacia el principal río del valle. El inventario de puntos de agua realizado indica que el rendimiento específico medio de los pozos existentes es de 0,5 litros/segundo/metro.

Para posibilitar el diseño del grupo de bombeo a definir, en la Tabla adjunta se recogen las profundidades medias en las que se han colocado los tramos filtrantes en las entubaciones de los pozos existentes en el área en la que se ubicará el desarrollo urbanístico (la posición definitiva de los tramos filtrantes en la tubería de revestimiento se debe hacer a partir de la columna litológica levantada con los rípios de perforación y los resultados de la testificación geofísica realizados durante la perforación del sondeo):

COLUMNA DE ENTUBACIÓN (profundidad prevista de los tramos filtrantes (m))
50 - 58
65 - 71
75 - 84
88 - 97
101 - 107
111 - 119
124 - 130
137 - 143
148 - 152
160 - 166

Fuente: Presentación de José Antonio Iglesias

Se pide definir los siguientes aspectos constructivos de la obra, que permitan posteriormente la redacción del proyecto contractivo del pozo:

1. Método de perforación a emplear, profundidad del sondeo y diámetro, espesor y material de la tubería de revestimiento a colocar, si es necesaria.
2. Dimensionado del grupo de bombeo a instalar.

Observaciones:

- Se puede considerar que las pérdidas de carga en la tubería de impulsión son del 1,0 % de la longitud de esta, o bien proceder a su cálculo.
- Las características del grupo electrobomba sumergible a instalar en el equipamiento del pozo se pueden buscar consultando la página web de alguno de los fabricantes de estos equipos (Grundfos o Indar tienen aplicaciones libres para hacer este diseño).
- Información de referencia: Plan Hidrológico de la cuenca:

DOTACIONES DE REFERENCIA PARA USOS CONECTADOS A RED GENERAL (l/h/día)

POBLACIÓN ABASTECIDA	ACTIVIDAD INDUSTRIAL-COMERCIAL DEL NÚCLEO		
	ALTA	MEDIA	BAJA
Menos de 2.000 habitantes	-	280	220
De 2.000 a 50.000 habitantes	340	300	240
De 50.000 a 100.000 habitantes	320	290	260
De 100.000 a 500.000 habitantes	300	270	-
Más de 500.000 habitantes	270	-	-

Sector	Dotación/empleado (m ³ /empleado/año)
Alimentación, bebidas, tabaco	470
Textil, confección, cuero y calzado	330
Madera y corcho	66
Papel, edición y artes gráfica	687
Industria química	1.257
Caucho y plástico	173
Otros productos minerales no metálicos	95
Metalurgia y productos metálicos	563
Maquinaria y equipo mecánico	33
Equipo eléctrico, electrónico y óptico	34
Fabricación material de transporte	95
Industrias manufactureras diversas	192

Dotaciones para usos no conectados a red general		
TIPO DE CONSUMO	DOTACIÓN	UD
Centro comercial o de ocio	100	l/plazas /día
Camping	120	l/plazas /día
Hospital, clínica, residencia	300	l/plazas /día
Hotel	250	l/plazas /día

Tipo de cultivo	Dotación neta (m ³ /ha-año)
Cereal	3.500
Girasol	3.600
Maíz	5.000
Patata	3.600
Tabaco	4.600
Alfalfa	6.800
Hortícolas	3.500
Citricos	5.000
Frutales	5.400
Vid y olivo	2.250

Fuente: Presentación de José Antonio Iglesias

De la Norma de Abastecimiento de la empresa suministradora de agua de la zona:

Vivienda multifamiliar		Vivienda unifamiliar	
Tamaño	Dotación	Superf. Parcela	Dotación
S_v (m^2 /viv)	(m^3 /viv/d)	S_p (m^2)	(m^3 /viv/d)
		$S_p < 200$	1,2
≤ 120	0,9	$200 < S_p \leq 400$	1,6
$120 \leq S_v \leq 180$	1,05	$400 < S_p \leq 600$	2
$S_v > 180$	1,2	$600 < S_p \leq 800$	2,5
		$800 < S_p \leq 1.000$	3
		> 1.000	3, añadiendo aparte las demandas de riego que excedan de 1,20 m ³ /d calculadas según el apartado siguiente.

Dotaciones a considerar en cálculo demandas en áreas urbanas y residenciales

ZONAS VERDES, COMUNES Y PÚBLICAS	
Superficie de riego	Dotación
S_r (ha)	(m^3 /ha/d)
$S_r \leq 3$	18
$S_r > 3$	Otras fuentes

Fuente: Presentación de José Antonio Iglesias

Documentos de referencia:

- Herrera, J. y Castilla, J. (2012). Utilización de técnicas de sondeos en captaciones de agua. E.T.S. Ingenieros de Minas de Madrid (U.P. de Madrid).
- Grundfos. Manual de ingeniería SP
- <http://www.indarpumpselectionprogram.com/ofertas/oferta.asp?idioma=0&ti po=UGP>

8. Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones y recomendaciones que se recogen a continuación, provienen de los comentarios que hicieron los participantes del curso en el coloquio final que tuvo lugar el viernes 1 de abril de 2022. A través de ellas, se vislumbran los problemas y dificultades que existen en estos países para alcanzar una buena gestión de las aguas subterráneas. Las conclusiones y recomendaciones propuestas han sido las siguientes:

1. Por lo general, el problema no se debe a la escasez de agua, sino a su mala o inadecuada gestión.
2. En Perú, para garantizar el abastecimiento a todas las ciudades, se precisa aumentar las infraestructuras, especialmente en su capital, Lima.
3. Las aguas subterráneas constituyen un recurso fundamental en algunas ciudades del Perú como Trujillo. De ahí la importancia de conocer bien su funcionamiento y sus características específicas.
4. Es necesario que, en las universidades de Colombia, se estudien materias relacionadas con el agua subterránea desde un punto de vista multidisciplinar.
5. Por lo general, la reutilización del agua, la calidad del agua potable y una adecuada y actualizada ley de aguas, son tres hitos fundamentales a tener en cuenta para alcanzar una buena gestión del agua.
6. Las aguas subterráneas constituyen un recurso de vital importancia para muchos núcleos de población. Sin embargo, al no visualizarse, pasan muchas veces desapercibidas e ignoradas. Por lo general, presentan una buena calidad química, pero son frágiles, y su contaminación requiere complejos procesos de limpieza, donde la tecnología es muy importante.
7. Es importante preguntarse por el precio justo que se debe pagar por el consumo doméstico del agua, teniendo en cuenta que debería incluir el coste de la captación, tratamiento, distribución, depuración y reutilización.
8. Se recomienda abordar el agua en bloque. Este enfoque es el que se está llevando a la práctica en muchos países para alcanzar una buena gestión del agua.
9. En República Dominicana, hay un serio problema de intrusión marina que es preciso reducir y que está muy extendido.
10. En El Salvador, no hay un control de la situación de los acuíferos, ni de las extracciones de agua subterránea y su calidad química. No hace mucho se aprobó una Ley de Aguas que pretende regular este escenario de falta de control.
11. Es necesario que exista una legislación sobre el agua, y que se eduque a la sociedad en un código de buenas prácticas, desde la infancia a través de las escuelas.
12. En Colombia, hay una falta generalizada de control en el monitoreo y en la extracción de las aguas subterráneas. Aunque existen muchos estudios hidrogeológicos, se echa de menos un diagnóstico encaminado a mejorar la gestión de las aguas subterráneas.
13. En no pocas ocasiones, se presta más atención al abastecimiento de agua a la población, que al saneamiento. Este hecho queda más expuesto en zonas

turísticas, donde hay problemas de intrusión salina y de un tratamiento deficitario de aguas residuales.

14. En los núcleos de población, especialmente en las grandes urbes, es necesario afrontar el problema de las pérdidas de agua en las redes de distribución. En muchas de las grandes ciudades iberoamericanas, pueden alcanzar porcentajes muy elevados.
15. En Bolivia aún no hay una Ley de Aguas, aunque hay claras mejoras respecto al saneamiento del agua. Sin embargo, faltan recursos para que esos proyectos sean sostenibles en el tiempo.
16. En Perú, Lima y Trujillo tienen una buena normativa sobre monitoreo y gestión de las aguas subterráneas, pero no es así en el resto de ciudades. Sin embargo, se puede decir en términos generales, que existe en el país una buena base de conocimientos hidrogeológicos.
17. Se precisa que la gestión del agua en el abastecimiento y saneamiento, se realice con enfoque de cuenca hidrográfica, para aprovechar al máximo el recurso: desde la captación del agua hasta su distribución a la población. En esta gestión, se deben contemplar también otros proyectos que se estén desarrollando en la zona, aunque sean ajenos al agua, para que haya una coordinación entre todos. Esta reflexión es muy importante en Perú.

9. Acto de clausura

Una vez cerrada la sesión de conclusiones y recomendaciones, se procedió al Acto de clausura del curso. Intervinieron algunos de los ponentes, el coordinador de la actividad y el responsable de este curso en el Centro de Formación de la Cooperación Española de Santa Cruz de la Sierra, Óscar Herrera. El orden y contenido de las intervenciones fue el siguiente:

- **José María Esnaola:** partió del lema de la UNESCO del Día Mundial del Agua de este año 2022 (22 de marzo), que reza *Aguas subterráneas: hacer visible lo invisible*, para resaltar la importancia de una buena gobernanza del agua en la cooperación internacional, y de la utilidad que este curso habrá tenido para los participantes, no solo desde el punto de vista del conocimiento (sesiones síncronas, bibliografía recomendada, ejercicios y casos prácticos), sino también de los enlaces y conexiones que se habrán forjado entre los participantes.
- **José Luis Armayor:** felicitó en primer lugar a los participantes por su dedicación y trabajo, y citó algunos de los temas que más interés han suscitado entre los asistentes, y que podrían ser abordados en futuros cursos: intrusión marina, recarga artificial, sostenibilidad, legislación, agua en bloque, etc. Señaló que lo importante es que la gente entienda qué son las aguas subterráneas, y para ello la necesidad de contar con buenos comunicadores. Como ejemplo hizo alusión a la iniciativa que hubo el pasado 27 de marzo de 2022 en Ciudad de Guatemala, con motivo del Día

Mundial del Agua, donde a partir del conocido mapa de relieve de la ciudad de unos 1.800 m², se dieron a conocer al gran público los conocimientos más básicos de las aguas subterráneas del país.

- **Luis Javier Lambán:** comenzó señalando la estrecha relación que existe entre el agua y la cooperación, y animó a los participantes a seguir formándose y, en la medida de lo posible, a implementar los contenidos del curso en el trabajo de cada uno, especialmente en lo relacionado con las aguas subterráneas. La gran ignorancia que, sobre las aguas subterráneas, existe en Iberoamérica y en todos los países, acentúa la necesidad de divulgar y transmitir los conocimientos adquiridos en este curso. Para terminar, destacó dos ideas: 1) No se puede gestionar aquello que no se conoce; 2) No existen soluciones únicas: cada abastecimiento requiere condiciones propias.
- **Carlos Fernández-Jáuregui:** al igual que los ponentes anteriores, comenzó agradeciendo a la AECID la organización y el apoyo que constantemente han proporcionado para el buen desarrollo de la actividad. Destacó dos ideas: 1) No hay escasez de agua en el mundo: hay escasez de ideas y de infraestructuras; 2) Para garantizar la gestión inteligente de los recursos hídricos de un país, la palabra clave es *governabilidad*, anclada en los siguientes principios: a) Que exista una autoridad del agua al más alto nivel; b) Que haya una ley moderna de recursos hídricos; c) Que se disponga de los recursos financieros adecuados; d) Que cuente con el talento humano idóneo; y e) Que exista transparencia en la información.
- **Juan María Fornés:** como coordinador general del curso, se unió al agradecimiento de los ponentes al director del Centro de Formación de la AECID de Santa Cruz de la Sierra, José Ignacio Ayala, y a todo el equipo de dicho centro que ha facilitado los medios para el buen desarrollo de la actividad: Óscar Herrera, Karina Olachea, Miguel Hinojosa y Ramiro López. Asimismo, agradeció a los ponentes su trabajo y disponibilidad, claves para el éxito del curso. Muchos de los participantes transmitieron en el coloquio previo al acto de clausura, su deseo de tener estos cursos de modo presencial; y esa ha sido la práctica habitual hasta que la pandemia lo impidió. De ahí que, para continuar estos cursos, la AECID se haya visto obligada a innovar su metodología para que tuvieran lugar en la modalidad online, con sus *pros* y *contras*. Aprovechó para anunciar a los participantes los dos próximos cursos que tendrán lugar este año 2022. Destacó la importancia de que cada uno viera el modo de implementar los conocimientos adquiridos, en su campo de trabajo y en sus respectivas instituciones. Y, como ya comentó alguno de los ponentes, la importancia de establecer contactos entre ellos para intercambiar experiencias y conocimientos.
- **Óscar Herrera:** agradeció el trabajo del coordinador del curso y de los ponentes, y expresó su deseo de que ambas instituciones, AECID e IGME-CSIC, sigan colaborando en estas actividades de transferencia de conocimiento.

Anexo I: Mesa redonda del viernes 18 de marzo

En la mesa redonda, se expusieron los siguientes temas:

1. Aguas subterráneas y asentamientos humanos. Ejemplos de acciones del PHI – UNESCO.
2. El conocimiento hidrogeológico del territorio y el abastecimiento urbano. La experiencia española.
3. Reseña histórica del abastecimiento de agua a la Ciudad de Guatemala 1776-2022, y sobreexplotación de los recursos hídricos.
4. Acuífero costero de Manglaralto, una zona semiárida del suroeste del Ecuador.

1. Aguas subterráneas y asentamientos humanos. Ejemplos de acciones del PHI – UNESCO

Aurélien Dumont

El Plan Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO, tiene como objetivo en su 9ª Fase (2022-2029), tomar la iniciativa en la solución de los problemas mundiales del agua, centrados en los siguientes cuatro aspectos: 1) Cambio climático y sus consecuencias globales; 2) Incremento de las sequías e inundaciones; 3) Deterioro progresivo de la calidad del agua de uso urbano; y 4) El impacto de estos tres aspectos en los países en vías de desarrollo, es mayor que en los países desarrollados.

Las cinco áreas prioritarias de esta 9ª Fase del PHI, que están desglosadas en 34 resultados previstos, son las siguientes.

- Investigación científica e innovación.
- Educación sobre el agua en la cuarta revolución industrial, incluida la sostenibilidad.
- Reducción de la brecha entre datos y conocimientos.
- Gestión integrada de los recursos hídricos en condiciones de cambio global.
- Gobernanza del agua basada en la ciencia para la mitigación, la adaptación y la resiliencia.

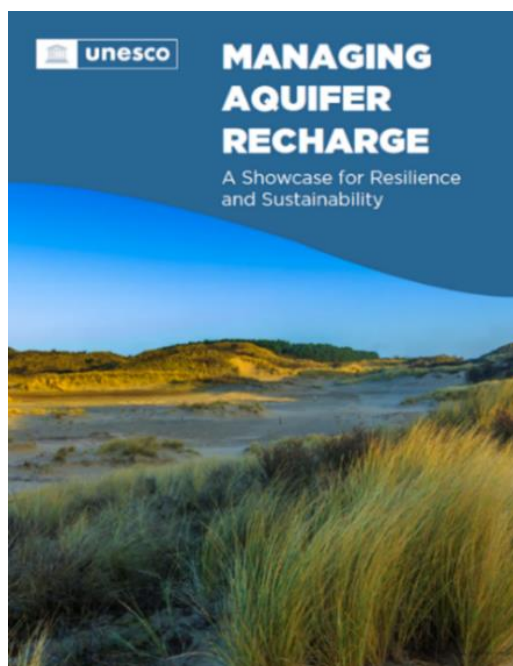
Para ello, UNESCO reclama la colaboración internacional. Así, la República de Corea, concede Fondos fiduciarios dirigidos a la seguridad hídrica sostenible para los asentamientos humanos, en países en desarrollo sometidos al cambio climático (*Water Security Project*). Algunos ejemplos de países que están recibiendo esa ayuda son:

- Nairobi (Kenia): Tiene una población de unos 3 millones de habitantes. La precipitación media anual es de 630 mm, y entre el 63,2% y 81,6% de la población tiene acceso a agua segura. El *Water Security Project* está dirigido a la mejora de la gestión de las aguas subterráneas y a la recarga de agua tratada en Nairobi.

- Lusaka (Zambia): Tiene una población de 1,7 millones de habitantes. La precipitación media anual es de 1.020 mm, y entre el 65,4% y 85,6% de la población tiene acceso a agua segura. El *Water Security Project* está dirigido a la elaboración del mapa de aguas subterráneas y al desarrollo de las aguas subterráneas en el distrito de Mansa, en la provincia de Luapula.
- Dili (Timor-Leste): Tiene una población de 190.000 habitantes. La precipitación media anual es de 1.500 mm, y entre el 71,9% y 95,2% de la población tiene acceso a agua segura. El *Water Security Project* está dirigido a la instalación de la infraestructura necesaria para llevar a cabo la gestión y control de las aguas subterráneas.

La UNESCO publicó en 2021, el libro titulado *Managing Aquifer Recharge: A showcase for resilience and sustainability*, en el que se analizan 28 casos, 21 de los cuales referentes a abastecimiento a poblaciones.

Próximamente el Centro Regional del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC), Centro UNESCO Categoría II, publicará el libro titulado *Community water management organizations in LAC*, en el que se estudian las organizaciones comunitarias de servicios de agua y saneamiento (OCSAS) en América Latina y el Caribe, especialmente la gestión del agua en zonas rurales desde una perspectiva técnico-social.



Fuente: Presentación de Aurélien Dumont

2. El conocimiento hidrogeológico del territorio y el abastecimiento urbano. La experiencia española

Juan Antonio López Geta

En España existen unas 1.200 grandes presas, con una capacidad de regulación de 55.000 hm³. En la década de los 50 y 60 del pasado siglo, la población diseminada en núcleos menores de 50 habitantes era el 15% del total del país, y muchos de ellos no tenían suministro de agua potable. Apenas el 40% de las captaciones de aguas subterráneas estaban registradas. Numerosos sondeos resultaban fallidos por el escaso conocimiento hidrogeológico que había de los acuíferos.

A partir de la década de los 70 se puede decir que hubo un giro copernicano en el desarrollo de las aguas subterráneas en España, propiciado en gran medida por el liderazgo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en los Planes Nacionales de Investigación de las Aguas Subterráneas (PIAS) y de Abastecimiento a Núcleos Urbanos (PANU). En ambos, el punto de partida fue el conocimiento geológico del territorio español. Así, el IGME elaboró el Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico de la España peninsular, Baleares y Canarias, y a partir de él, el Mapa de Síntesis de Sistemas Acuíferos de la España peninsular, Baleares y Canarias. Se definieron 76 sistemas acuíferos en la Península Ibérica y 11 en las Islas. Más adelante se mejoró la información con la elaboración de nuevos mapas de geología, litología, permeabilidad, sistemas acuíferos y masas de agua subterránea. Estas últimas ocupaban el 90% de la superficie total peninsular. Este conocimiento permitió estimar los recursos subterráneos de los sistemas acuíferos a partir del Mapa de Lluvia útil o de escorrentía total de la España peninsular e isla de Mallorca, elaborado por el IGME, de las extracciones y de los aforos superficiales.

En paralelo, hubo que hacer un esfuerzo importante en el desarrollo de las técnicas de perforación -percusión, rotación y rotopercusión- y su adecuada aplicación en función del tipo de terreno. Y también en el aspecto científico de la hidrogeología, en el que destacarían dos manuales: *Hidrología Subterránea* (Custodio y Llamas), y *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo* (Villanueva e Iglesias).

Esta semilla dio múltiples frutos en España, entre los que destacan: a) la creación de cátedras de hidrogeología en facultades y escuelas de ingeniería; b) la proliferación de consultorías y empresas especializadas en técnicas geofísicas; c) el surgimiento de cursos de hidrogeología de postgrado; d) la especialización de las empresas de perforación y de aforos; e) la mejora de los equipos de perforación y de aforos del IGME y otras instituciones; f) la mejora de los equipos técnicos y de la cualificación del personal, de las empresas privadas de perforación.

El resultado del Plan Nacional de Abastecimiento a Núcleos Urbanos (PANU), fue el siguiente:

- Población abastecida: 1.766.769 habitantes.
- Número de sondeos: 428.
- Metros lineales de perforación: 53.917.
- Caudal: 7.287 L/s.
- Inversión: 4.600.000 €.
- Número de municipios: 351.

3. Reseña histórica del abastecimiento de agua a la Ciudad de Guatemala 1776-2022, y sobreexplotación de los recursos hídricos.

Edwin A. García Ovalle

3.1. Antecedentes históricos

La ciudad capital se trasladó en 1775 al Valle de la Ermita, después de los terremotos de 1773, denominados de Santa Marta, que destruyeron la Ciudad de Santiago de los Caballeros de Guatemala, denominada hoy Antigua Guatemala, ubicada en el Valle de Panchoy, entre los volcanes de Fuego, Agua y Acatenango. La orden de traslado se decretó el 1 de diciembre de 1775 y el traslado oficial se realizó el 2 de enero de 1776, tomando el nombre de Nueva Guatemala de la Asunción, según el Real Decreto del 23 enero de 1776.

3.2. Selección del lugar para el traslado

En la selección del lugar de ubicación de la nueva ciudad, se dio prioridad a la facilidad de conseguir agua, mencionándose el río Pinula como un buen recurso. Existía un montículo prehispánico que había sido canal de agua para surtir a la ciudad prehispánica de Kaminal Juyú, denominado montículo de *La Culebra* por su forma, utilizando el río Pinula. Es el sitio Maya más antiguo (1.200 a.C. – 900 d.C.) y fue una importante urbe mesoamericana, ubicada a orillas del extinto lago Miraflores. Presentaba canales hidráulicos para irrigación de campos agrícolas. El sistema de la arquitectura hidráulica precolombina estaba constituido por el lago Miraflores y por los canales Miraflores, San Jorge y Mirador.

3.3. Inicios del proyecto del acueducto

El 19 de febrero de 1774, el arquitecto mayor menciona los trabajos necesarios sobre el montículo de *La Culebra* para construir lo que sería el Acueducto de Pínula. En 1775, ya estaban establecidos 5.917 habitantes, alojados en 925 ranchos: 1.900 pobladores trasladados, ubicados en 278 ranchos; 2.400 mestizos, en 378 ranchos; y 1.617 habitantes originales, en 269 ranchos.

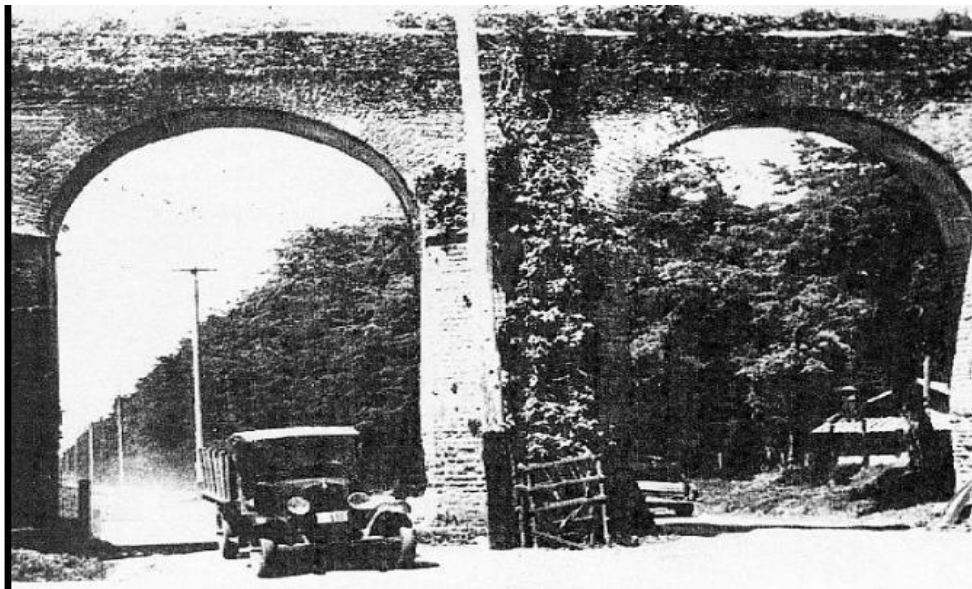
El Acueducto de Pínula fue diseñado cuando la ciudad se trasladó al Valle de la Ermita y tomo el nombre de Nueva Guatemala de la Asunción. Fue diseñado por José Bernardo Ramírez, fontanero y maestro mayor de obras. Se construyó entre 1776 y 1786 y los materiales que se utilizaron fueron ladrillo y argamasa, distribuidos en arcos y contrafuertes (arábigo-romano) a lo largo de 5 km. La población abastecida era de 4.000 habitantes.

3.4. Abastecimiento de agua en 1884

Existían 25 tanques públicos y muchas fuentes. El agua era suministrada por dos acueductos que costaron dos millones de pesos: el Acueducto de Pínula y el Acueducto de Mixco. La población total, en 1884, era de 1.200.000 habitantes.

3.5. Abastecimiento agua a la ciudad de 1938 en adelante

Entre 1917 y 1918 los terremotos destruyeron parte de la estructura del Acueducto de Pínula. En 1938, debido al crecimiento urbano de la ciudad hacia el sur, fue progresivamente desmantelado. Por tanto, el periodo de operación del Acueducto de Pínula fue de 1786 a 1938. Ante esta pérdida, comienzan a surgir empresas privadas de abastecimiento de agua.



Acueducto de Pínula. Fuente: Presentación de Edwin A. García Ovalle

3.6. Compañía de Agua Mariscal

Creada el 1 de agosto del año 1928, mediante contrato de servicios establecido con el Gobierno de Guatemala, por medio de la Asamblea Legislativa de 1928, que más tarde

fue cancelado. Entre 1928 y 1930 se formó la sociedad y se estableció como la primera planta de purificación de servicios de agua potable en Centroamérica. Los materiales de construcción fueron importados de Europa. En 1929 contaba con un depósito de abastecimiento y una red de distribución. El inicio de operaciones tuvo lugar el 1 de enero de 1930, con una capacidad de 15.000 m³/día, y cubría la zona sur-este de la ciudad y la Finca Las Charcas, donde el río Mariscal confluye con el río Molino.

3.7. Acueducto Xayá-Pixcayá

En la década de los 60 del siglo pasado, se produjo una crisis de agua. En octubre de 1961, el Gobierno Central, ante la escasez de agua potable, realizó los estudios necesarios para traer el agua de los ríos Xayá y Pixcayá, ubicados en el altiplano.

El Acueducto Xayá-Pixcayá, constituido por el sistema Xayá-Pixcayá y la planta de tratamiento *Lo de Coy*, es un sistema de colección y tratamiento de agua potable para la Ciudad de Guatemala. Construido entre 1971 y 1978, se encuentra en el kilómetro 17,5 de la carretera Interamericana, en Mixco, y tiene una producción diaria de 140.000 m³ de agua potable. Se trata de la obra más grande en materia de abastecimiento de agua en Guatemala, surtiendo a la planta de tratamiento *Lo de Coy*, y produciendo el 39% del agua potable que distribuye la Empresa Municipal de Agua potable (EMPAGUA) en la Ciudad de Guatemala.

3.8. Extracción de aguas subterráneas

En la década de los años 60 del siglo pasado, se inicia la perforación de pozos profundos. En 1964 comenzaron las perforaciones de pozos mecánicos en Guatemala. Estas eran totalmente empíricas. Se contaba con buena maquinaria traída del extranjero, pero no se tenía experiencia suficiente para la realización de un diseño óptimo y una adecuada perforación. En los años 80, EMPAGUA inicia la perforación de pozos para complementar la oferta de agua. En 1978, los mantos acuíferos del Valle de Guatemala gozaban de buena salud. La profundidad de los pozos era, en promedio, de 163 metros. En 2020, la extracción de agua ya requería aumentar la profundidad de los pozos a 270 metros de promedio, según estudios de la Fundación del Agua (Funcagua).

De 1962 a 2022, el suministro de aguas subterráneas ha ido creciendo hasta alcanzar el 50% de la oferta total de agua. Pese a este incremento, no existe un control de la extracción de agua subterránea, ni tampoco una ley de Aguas que regule la gestión integral del recurso hídrico. Aunque cada vez hay un interés mayor en la utilización de las aguas pluviales y en la recarga artificial de acuíferos, en la actualidad apenas se utilizan.

4. Acuífero costero de Manglaralto, una zona semiárida del suroeste del Ecuador.

Paul C. Carrión Mero

4.1. Introducción

En Santa Elena, cerca de 144.076 habitantes viven en la zona rural. La parroquia rural de Manglaralto está ubicada al norte de Santa Elena, en una de las zonas más áridas del Ecuador. En esta zona, existe un acuífero costero poco profundo en el que se han construido 15 pozos (11 activos) para abastecer de agua a seis comunas a través de la gestión de la Junta Administradora del Agua Potable Regional de Manglaralto (JAAPMAN), que proporciona agua aproximadamente a 43.000 personas.



Edificio sede de la JAAPMAN. Presentación de Paul C. Carrión

JAAPMAN es un sistema multicomunitario que nace el 29 de marzo de 1979, y realiza las siguientes acciones:

- Captación de fuentes subterráneas mediante pozos de bombeo.
- Utilización de presas para recargar el acuífero.
- Tanques de almacenamiento.



Tanques de almacenamiento en Manglaralto. Presentación de Paul C. Carrión



Presa 1 en la parroquia de Manglaralto. Presentación de Paul C. Carrión

Desde 2007 se lanzaron Proyectos de Cooperación Técnica para evaluar mejor los recursos de agua subterránea en el área, e investigar si los acuíferos en el área de Santa Elena, en el suroeste de Ecuador, están afectados por la intrusión marina.

4.2. Principales problemas

¿Cuáles son los principales problemas de Manglaralto?

- Los servicios de AGUAPEN tienen una cobertura limitada.
- Falta de un sistema de tratamiento de aguas residuales.
- Crecimiento de la población y demanda turística.
- La evapotranspiración es mayor que la precipitación.

4.3. Objetivos

Los objetivos de los Proyectos de Cooperación Técnica han consistido en desarrollar prácticas para la gestión integral del agua mediante aprovechamiento del agua subterránea, manejo de las aguas residuales y estudios para la implementación de filtros verdes, para el establecimiento de mejores condiciones socioambientales de la comunidad en un contexto de sostenibilidad. Para llevarlos a cabo, se ha procurado el fortalecimiento de capacidades comunitarias para el Desarrollo Sostenible del Cantón Santa Elena.

4.4. Resultados

Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

- Investigaciones hidrogeológicas:
 - ✓ Inventario de pozos.
 - ✓ Prospección geoelectrica.
 - ✓ Mediciones de nivel de agua y profundidad de pozo.
 - ✓ Análisis *in situ*: pH, temperatura, STD, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto.
 - ✓ Topografía y SIG.
- Estudios técnicos y monitoreo del acuífero. Gestión integral del agua:
 - ✓ Control de la sobreexplotación y contaminación del acuífero.
 - ✓ Modelo numérico de flujo.
 - ✓ Modelo numérico de transporte.
 - ✓ Esquema hidrogeológico de Manglaralto.
 - ✓ Evaluación del estado de las lagunas de estabilización.
- Aplicación de técnicas para el manejo del agua:
 - ✓ Soluciones al problema de escasez del agua: recarga artificial del acuífero mediante diques de retención.
 - ✓ Tratamiento y control de la calidad del agua: filtro natural para eliminar la contaminación de las aguas residuales urbanas y evaluación del estado de las lagunas de estabilización.

- Talleres y encuestas socioeconómicas para concienciar y sensibilizar a la comunidad sobre el uso del agua, y transferencia de conocimientos técnicos sobre el manejo integrado del recurso hídrico: sitio web y redes sociales JAAPMAN-CIPAT; modelo 3D del funcionamiento de un filtro verde.
- Investigación y proyectos de graduación: brindan soporte científico en los informes presentados por la Junta ante el organismo de control.
- Vínculos de Pasantías con la Universidad de Purdue-ESPOL: propuestas de diseño de un dispositivo de desalinización de bajo costo, a pequeña escala y alimentado por energía solar.

Como consecuencia de estos proyectos, Manglaralto cuenta con las siguientes infraestructuras: 15 pozos; 3 diques (2 de tierra y 1 de hormigón); 6 reservorios (4 en Manglaralto y 2 en Montañita); 1 red de distribución; y un edificio como sede de JAAPMAN.

4.5. Conclusiones

La experiencia de Manglaralto y, en general, de los proyectos de servicios comunitarios, brindan un escenario único para la transferencia de conocimientos, pragmatismo y lecciones de campo que permiten al alumno practicar y aprender técnicas sostenibles, algunas de las cuales provienen de saberes ancestrales. La vinculación con la sociedad favorece la generación de espacios para articular la docencia y la investigación.

La interacción comunidad-universidad es bidireccional, cada una de las partes tiene un beneficio mutuo, y se basa en:

- Estudiantes e investigadores: se involucran con el entorno, trabajan en un equipo multidisciplinar, desarrollan y aplican el aprendizaje y evalúan soluciones de ingeniería.
- Comunidad: sus miembros adquieren todos los conocimientos técnicos, y obtienen soluciones a sus problemas.

Anexo II: Bibliografía a disposición de los participantes

En la Plataforma Moodle, se “colgaron” los siguientes 19 documentos para ser descargados por los participantes del curso online:

1. Utilización de acuíferos costeros para abastecimiento (Bocanegra y Custodio). 1994.
2. Consideraciones sobre la legislación de aguas subterráneas (Fundación Botín). 2001.
3. Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo (López Geta, Fornés, Ramos y Villarroya). 2009.
4. Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos. Estudios y actuaciones realizadas en la provincia de Alicante (Murillo, López Geta y Rodríguez, eds.). 2010.
5. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas (Sahuquillo, Cassiraga, Solera y Murillo, eds.). 2010.
6. Groundwater around the World (Margat and Van der Gun). 2013.
7. Urban water, an essential part of integrated water resources management (Cabrera y Custodio). 2014.
8. Decenio 2005-2015. El agua, fuente de vida (Naciones Unidas). 2015.
9. Universalización de servicios de agua potable y saneamiento (VII Foro Mundial del Agua). 2015.
10. Minería del agua subterránea en España (Custodio). 2017.
11. Salinización de las aguas subterráneas (Custodio). 2017.
12. Indicadores de desempeño para servicios de abastecimiento de agua (IWA Publishing). 2018.
13. Las aguas subterráneas en la legislación iberoamericana (Fornés). 2019.
14. Recarga natural a los acuíferos (Custodio). 2019.
15. Educación y ciencia para salvaguardar el derecho humano al agua: papel de las aguas subterráneas (Custodio). 2020.
16. Hidrogeología y recursos de agua subterránea en formaciones e islas volcánicas (Custodio). 2020.
17. Improving water quantity and quality supply security by managed artificial recharge technologies in the Lower Llobregat aquifers integrated into a conjunctive surface and groundwater management scheme for Barcelona, Spain (Queralt, Bernat y Custodio). 2020.
18. Aguas Subterráneas. Exploración, evaluación, caracterización y gestión (Iglesias, Ortiz, Rodríguez y Minga). 2021.
19. Waterwells how can we make legality more attractive (Foster, Hirata y Custodio). 2021.

Madrid, 30 de junio de 2022

Dr. Juan María Fornés Azcoiti
Coordinador del Curso
Científico titular
Instituto Geológico y Minero de España (IGME)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)