

1. INTRODUCCIÓN

2. USOS Y PARTICULARIDADES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

2.1. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL ABASTECIMIENTO URBANO

2.2. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA AGRICULTURA

2.3. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA INDUSTRIA

3. PROBLEMÁTICA DERIVADA DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

3.1. SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS: DEFINICIÓN Y DISCUSIÓN DEL CONCEPTO. SINTOMÁTICA.

3.2. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

3.3. SALINIZACIÓN DE ACUIFEROS E INTRUSION MARINA

3.4. REDES DE CONTROL DE LOS ACUIFEROS

3.5. PLANIFICACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

3.6. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL MEDIO AMBIENTE. INTRODUCCIÓN

4. SINTESIS FINAL

2. USOS Y PARTICULARIDADES DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Como datos de escala iniciamos este apartado con unas cifras de utilización de **aguas subterráneas** a **nivel mundial** del orden de 600-700 km³/año. En **España** el MIMAM (Libro Blanco, 1998) ha estimado que se extraen anualmente unos 5500 Mm³.

2.1. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL ABASTECIMIENTO URBANO

Aunque las aguas de escorrentía superficial han sido desde el principio el suministro más habitual, se conocen también casos de abastecimientos "de origen subterráneo", especialmente manantiales y fuentes, desde las más antiguas civilizaciones.

Región	Abastecimiento con a. subterráneas (%)	Población abastecida (millones habitantes)
Asia-Pacífico	32	1000-1200
Europa	75	200-500
América Latina	29	150
Estados Unidos	51	135
Australia	15	3
África	ND	ND
Mundo		1500-2000

La explicación de esta realidad podemos encontrarla al analizar las principales ventajas del abastecimiento desde los acuíferos frente al de las aguas superficiales, que se resumen a continuación:

Regularidad y seguridad de los caudales: En general la explotación de los almacenamientos subterráneos ofrece mayor facilidad de regulación de los caudales necesarios, siendo menos sensible a los cambios estacionales, situaciones meteorológicas anómalas (sequías, inundaciones), etc.

Este punto está ligado, evidentemente, al conocimiento del balance del acuífero que se explote.

- **Calidad del agua**
- **Proximidad geográfica respecto a la demanda y competitividad económica**

2.2. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA AGRICULTURA

Las ventajas del riego desde los acuíferos frente al procedente de cursos o almacenamientos superficiales pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- ✓ **Distribución geográfica**
- ✓ **Almacenamiento**

Evidentemente no todo son ventajas en la explotación de las aguas subterráneas para el regadío, que puede derivar en problemas de a veces compleja solución. Tal es el caso de problemas como la contaminación difusa por fertilizantes y productos fitosanitarios, los descensos del nivel piezométrico con el consiguiente encarecimiento del bombeo, etc.

2.3. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y LA INDUSTRIA

Dado que es habitual que el abastecimiento industrial de agua esté integrado en la red de abastecimiento urbano, es difícil cuantificar el orden de magnitud del consumo que esta actividad supone.

Tendencia actual a desligar los núcleos industriales de las áreas urbanas, independizando su abastecimiento (y ahorrando tasas de vertido/depuración) utilizando captaciones de aguas subterráneas.

Sin embargo, se puede estimar que un **5%** del agua subterránea se consume en procesos industriales, aunque otros autores (Sampat, 2000) indican cifras muy superiores, del orden del 19% y con tendencia al crecimiento. En **España** el MIMAM estima en un **3%** la incidencia de los consumos industriales de las aguas subterráneas.

3. PROBLEMÁTICA DERIVADA DE LA EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Los **problemas** que pueden derivarse de la explotación de las aguas podrían clasificarse en dos grandes grupos:

- **Sobreexplotación**: Provoca descensos acumulados se superficie piezométrica, afecciones a cauces/descargas superficiales, subsidencia de terrenos, alteraciones régimen hídrico de humedales, etc. El fenómeno de sobreexplotación se puede presentar a escala regional, en un sistema acuífero concreto, o a escala más puntual por efecto de fuertes extracciones locales.
- **Contaminación**: Implica variaciones sustanciales de la composición química de las aguas subterráneas, y consecuentemente limita o afecta a los usos asociados. El problema puede presentarse a distintas escalas, y tener orígenes antrópicos (contaminación agrícola, industrial), o naturales-inducidos (intrusión marina, movilización y mezcla de aguas del subsuelo de distinta composición).
- Otros problemas: Deterioro captaciones (incrustación)

3.1. SOBREEXPLOTACIÓN DE ACUÍFEROS: DEFINICIÓN Y DISCUSIÓN DEL CONCEPTO. SINTOMÁTICA.

Los efectos no deseados más comunes que pueden presentarse son:

- Disminución o agotamiento de reservas.
- Empeoramiento de la calidad del agua.
- Afecciones a derechos y/o caudales de aguas ya aprovechados por terceros.
- Impactos medioambientales y ecológicos.
- Subsistencia del terreno.

3.1.1. Efectos cuantitativos de la sobreexplotación

3.1.2. Efectos cualitativos de la sobreexplotación

3.1.3. Efectos socio-económicos

3.1.4. Efectos medio-ambientales

3.1.5. Otros efectos

- SISTEMAS DE DETECCIÓN Y CONTROL DE SOBREEXPLOTACION
 - La detección tendrá que basarse en el análisis y seguimiento de los síntomas.
 - Importancia de las redes de control de piezometría.

CORRECCION DE EFECTOS DE LA SOBREEXPLOTACION

Debe basarse en la identificación de sus causas actuando tanto sobre las mismas como reforzando la alimentación de los acuíferos afectados.

- Limitación de la explotación: gestión técnica (actuaciones para corrección cuanti y cualitativa de las extracciones) y gestión administrativa (planificación).
- Incremento de recursos. Recarga artificial y gestión integral de los recursos.

3.2. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se habla de contaminación cuando:

- Se detectan concentraciones anómalas de uno o varios de sus constituyentes originales, o aparición de constituyentes alóctonos.
- La variación de las características físico-químicas que supone un perjuicio o limitación para los usos a los que estaban destinadas

La contaminación puede tener origen natural, natural-inducida o antrópica

Problemas de fondo: Dificultad de detectar los problemas por el desfase temporal entre causa y efecto (tasa media renovación aguas superficiales 20 días, aguas subterráneas 1400 años). Sobrevaloración de la capacidad “autodepurante” de los acuíferos. Desconocimiento generalizado de los procesos.

3.2. CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

3.2.1. Conceptos y generalidades

3.2.2. Tipos y orígenes de la contaminación

Respecto al origen naturales y antrópicas. En base a las causas en sí de la contaminación, destacando las siguientes:

- 1.- Actividades domésticas
- 2.- Actividades agrícolas:
- 3.- Actividades ganaderas
- 4.- Contaminación desde aguas superficiales
- 5.- Salinización
- 6.- Contaminación por actividades mineras
- 7.- Contaminación industrial
- 8.- Contaminación urbana
- 9.- Contaminación radiactiva
- 10.- Contaminación por inyección directa en sondeos

3.2.3. Lucha contra la contaminación

Las medidas contra la contaminación de las aguas subterráneas tienen una doble vertiente: la prevención y la corrección.

LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

- **Actuaciones en prevención:**
 - Estudios de vulnerabilidad de acuíferos
 - Ordenamiento legal de los usos del suelo
 - Inventario, localización y caracterización de posibles focos contaminantes
 - Estudios de nivel de contaminación de tipo difuso
 - Redes de vigilancia y control
 - Obras (cementaciones de sondeos, sellado de vertederos, etc)
 - Campañas de información y formación sobre la vulnerabilidad de los acuíferos
- **Actuaciones en corrección:**
 - Identificación y control de los focos y fuentes contaminantes
 - Trabajos de descontaminación: regeneración de suelos y acuíferos mediante técnicas de estimulación de los procesos naturales, extracción por bombeos, dilución por inyección, bioremediación, barreras físicas o dinámicas, etc

3.3. SALINIZACIÓN DE ACUÍFEROS E INTRUSIÓN MARINA

3.3.1. Definición de conceptos. Orígenes

CUSTODIO (1994) sintetiza las principales causas de la salinización en los siguientes puntos:

- Penetración de agua marina moderna.
- Existencia de agua marina antigua no expulsada por flujo muy lento o falta de gradiente hidráulico en formaciones poco permeables.
- Aspersión marina en franjas ventosas próximas al litoral.
- Concentración del agua de lluvia por evaporación en la superficie del terreno o en la parte superior del suelo, cuando el clima es árido.
- Evaporación del agua subterránea en zonas de descarga encharcadizas (humedales), sometidas a intensa evaporación.
- Disolución de sales evaporíticas existentes en las formaciones acuíferas, que más comúnmente son yesos y las sales asociadas.
- Desplazamiento de aguas subterráneas salinas existentes en ciertas formaciones profundas, bien sea de forma natural o inducida por la explotación de agua subterránea.
- Infiltración de excedentes de riego, en clima árido o cuando se utilizan aguas con elevada salinidad.
- Procesos de contaminación que producen salinidad como:
 - * aguas de drenaje y agotamiento de minas, en especial de sal y potasa
 - * aguas de lavado de escombreras salinas
 - * fugas de sistemas de refrigeración con agua salina
 - * fugas de procesos que usan aguas salinas

3.3.2. Intrusión marina: modelos

PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	PESO ESPECÍFICO	VISCOSIDAD	SALINIDAD
AGUA DULCE	Se considera de 1.000 g/cm ³		Valor medio del Cl ⁻ entre 0,3 y 3 ppm
AGUA SALADA	Entre 1.200 y 1.030 g/cm ³	Para igual temperatura, el agua del mar tiene una viscosidad del 30% superior a la dulce.	Agua del mar (Mediterráneo) 34-35 gr/l. En salmueras hasta 300 gr/l

3.3.3. Sistemas de detección y evaluación de salinización de acuíferos

El objetivo esencial perseguido en un estudio de intrusión será definir la penetración de la cuña salina, así como la profundidad y morfología de su superficie o interfase.

Entre las técnicas de estudio aplicables al análisis de la intrusión podemos distinguir entre métodos directos e indirectos. Entre los primeros se incluirían los basados en la analítica directa de las aguas en sondeos, mientras que los segundos serían aquellos en que se deducen los cambios a partir de datos indirectos, especialmente de medidas geofísicas.

3.3.4. Corrección y lucha contra la intrusión marina

Cualquier actuación correctora de los procesos de intrusión tendrá que orientarse hacia la búsqueda de una situación de equilibrio aceptable para el uso del acuífero, evitando su invasión por aguas salinas. En este grupo incluiríamos aquellas medidas orientadas a la explotación racional y controlada del acuífero, como la redistribución temporal y espacial de las extracciones, y la recarga artificial.

Otro grupo de medidas serían las obras destinadas al control físico y/o hidráulico de la intrusión, como las barreras físicas, y las barreras hidráulicas, que pueden ser de bombeo o de inyección.

3.4. REDES DE CONTROL DE LOS ACUÍFEROS

3.4.1. Objetivos de las redes de control

3.4.2. Diseño y operación de las redes de control

Una vez indicados los objetivos esenciales de las redes de control de las aguas subterráneas, vamos a repasar los criterios con que deben diseñarse y manejarse. Dividiremos estos criterios en los siguientes grupos:

- * Criterios de diseño de la red
- * Criterios de elección y/o construcción de los sondeos
- * Criterios de operación de la red

3.5. PLANIFICACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La conciencia sobre la vulnerabilidad de las aguas y particularmente en su fase subterránea, tiene un cada vez más comprometido reflejo en la legislación europea. Así, en la “Reunión interministerial de La Haya, 1991” se redactó el primer documento específico sobre la problemática de las aguas subterráneas, con los siguientes compromisos:

- Establecer un programa de acción en aguas subterráneas a niveles nacional y comunitario, con el horizonte del año 2000.
- Conseguir un programa de protección y uso sostenible de este recurso.
- Evitar el progresivo deterioro de la calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos contaminados.
- Aplicar la mejor tecnología disponible y las mejores prácticas medioambientales.
- Desarrollar la participación de los usuarios en los planes gestores.

Avanzando sobre los objetivos marcados en La Haya, la *Directiva 2000/60/CE* (Parlamento europeo, 2000), más conocida como **Directiva del Agua**, se constituye como el documento de referencia en materia de política de aguas, para las próximas décadas.

DIRECTIVA 2000/60/CE DEL AGUA

Es el documento de referencia para la política de aguas de las próximas décadas.

- Manifiesta una preocupación insistente sobre la protección de la calidad de las aguas subterráneas, como recurso estratégico de abastecimiento y por sus implicaciones medioambientales.
- Exige a los estados una profundización en el conocimiento y caracterización de los acuíferos y la fijación de los objetivos medioambientales (Art. 6):
 - *Los Estados miembros habrán de aplicar las medidas necesarias para evitar o limitar la entrada de contaminantes en las aguas subterráneas, ...*
 - *Los Estados miembros habrán de proteger, mejorar y regenerar todas las masas de aguas subterráneas y garantizar un equilibrio entre la extracción y la alimentación de dichas aguas con objeto de alcanzar un buen estado de las aguas subterráneas ...*
 - *Los Estados miembros habrán de aplicar las medidas necesarias para invertir toda tendencia significativa y sostenida al aumento de concentración de cualquier contaminante debida a las repercusiones de la actividad humana, con el fin de reducir progresivamente la contaminación de las aguas subterráneas...*

DIRECTIVA 2000/60/CE DEL AGUA

La DMA establece unas líneas estratégicas para la prevención y contaminación de las aguas subterráneas, basada en los siguientes criterios:

- Caracterización inicial de todas las masas de agua subterránea para poder evaluar su utilización y la medida en que dichas aguas podrían dejar de ajustarse a los objetivos marcados en la Directiva. Básicamente implicaría la delimitación y conocimiento de las características hidrogeológicas de los acuíferos, el análisis de las presiones a que están sometidas (fuentes de contaminación puntuales y difusas, extracciones, recarga).
- Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en que en la primera fase se hayan detectado riesgos específicos. Implicarán estudios hidrogeológicos mucho más detallados, hasta alcanzar un conocimiento preciso de sus parámetros hidrogeológicos, balances, características hidrogeoquímicas, conexiones y relaciones con otras masas de aguas subterráneas y superficiales, etc.
- Examen de la incidencia de la actividad humana en las aguas subterráneas. con inventario de captaciones, evaluación de extracciones, control de calidad, localización y control de puntos de recarga artificial, etc
- Examen de la incidencia de los cambios en los niveles de las aguas subterráneas. y sus repercusiones en las aguas superficiales y ecosistemas terrestres asociados, la regulación hidrológica (protección contra inundaciones y drenaje de tierras), y el propio desarrollo humano.
- Examen de la incidencia de la contaminación en la calidad de las aguas subterráneas. Referidos a la identificación y caracterización de aquellas masas de agua subterránea con niveles de contaminación tan altos que resulte inviable o desproporcionadamente costosa la aplicación de las medidas generales de la Directiva.

HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA: USOS DEL AGUA Y PROBLEMAS ASOCIADOS

En nuestro país, destacamos la importancia que tuvo la presentación del "*Libro blanco de las aguas subterráneas*" (1994). Este documento contemplaba el estado actual y problemática específica de los recursos hídricos subterráneos en España, y establecía el plan director de actuaciones en esta materia, distribuido en los siguientes programas:

- o Programa 1: Actualización del inventario de recursos naturales de aguas subterráneas.
- o Programa 2: Diseño y establecimiento de una red oficial de control de piezometría y calidad.
- o Programa 3: Censo de aprovechamientos.
- o Programa 4: Estudio de acuíferos con problemas de sobreexplotación o salinización.
- o Programa 5: Normas para otorgamiento de nuevas explotaciones. Asignación de recursos.
- o Programa 6: Directrices para la ordenación de los vertidos potencialmente contaminantes.
- o Programa 7: Perímetros de protección para captaciones de agua potable.
- o Programa 8: Protección de zonas húmedas y otros espacios naturales relacionados con las aguas subterráneas.
- o Programa 9: Emplazamiento de residuos sólidos urbanos.
- o Programa 10: Prevención y corrección de la contaminación por actividades industriales.
- o Programa 11: Control y corrección de la contaminación producida por nitratos.
- o Programa 12: Control y corrección de la contaminación producida por pesticidas.
- o Programa 13: Infraestructuras para captación en periodos de sequía.
- o Programa 14: Abastecimientos a núcleos urbanos.
- o Programa 15: Recarga artificial de acuíferos.
- o Programa 16: Integración de las unidades hidrogeológicas en los sistemas de explotación.

3.6. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL MEDIO AMBIENTE. INTRODUCCIÓN

3.6.1. Afecciones medioambientales a espacios naturales de alto valor ecológico: El caso de los humedales

Los factores que determinan las condiciones de estabilidad hidrológica de los humedales pueden agruparse en climatológicos (precipitaciones, temperaturas, evapotranspiración, etc), fisiográficos (topografía), hidrológico-superficiales (red hidrológica), biológicos (vegetación), geológicos (formaciones geológicas), edáficos (desarrollo y tipo de suelos), y evidentemente los factores hidrológico-subterráneos.

3.6.2. Otras afecciones medioambientales

3.6.3. Actuaciones correctoras y prevención de las afecciones medioambientales

COMENTARIOS FINALES

- En amplias zonas del mundo, y de nuestro país, la captación y explotación de los recursos hídricos subterráneos ha posibilitado un desarrollo socio-económico, que con la sola dependencia de las aguas superficiales y de la meteorología no se habrían alcanzado.
- Por otra parte, es evidente que la actividad humana, y de forma particular, aquellas que implican el manejo del medio natural (agricultura, ganadería, silvicultura, etc) impactan sobre amplias zonas, introduciendo modificaciones de gran envergadura y extensión, que alteran el soporte de los ecosistemas.
- Uniendo las anteriores observaciones, nos encontramos que a lo largo esencialmente de la segunda mitad del siglo XX, la captación de las aguas subterráneas, apoyada por una política agraria desarrollista, ha generado interferencias en el ciclo del agua, tanto a nivel de su disponibilidad en el espacio y en el tiempo (afecciones a descargas naturales y al caudal de base de los cursos superficiales, descensos piezométricos, etc), como a la calidad del recurso (salinización inducida, intrusión, contaminación difusa, etc).
- Por otro lado, en defensa de la explotación de las aguas subterráneas, también hay numerosos argumentos que justifican que su uso racional y controlado es una alternativa perfectamente válida. Así, hay suficientes datos que demuestran que, en nuestro país, la rentabilidad/productividad de las dotaciones de riego con aguas subterráneas son sensiblemente superiores a las obtenidas en los regadíos tradicionales con aguas superficiales.