

# LA INTRUSIÓN MARINA Y SU INCIDENCIA EN LOS ACUÍFEROS ESPAÑOLES

## *Seawater intrusion and its incidence in the Spanish aquifers*

Juan Antonio López-Geta (\*) y Juan de Dios Gómez-Gómez (\*\*)

### RESUMEN

*Una consecuencia inmediata del desarrollo demográfico y económico que se ha producido en las últimas décadas en las zonas costeras, es la necesidad de disponer de recursos hídricos en cuantía y calidad acordes con las exigencias requeridas para cada uso. Por ello los acuíferos costeros han adquirido una importancia estratégica como fuente inmediata y a veces única de estos recursos. Su explotación induce a la aparición del fenómeno de intrusión marina que en ocasiones ponen en peligro su sostenibilidad. Para evitar su aparición es necesaria una adecuada planificación y gestión, acciones que no siempre se han realizado de la manera más correcta. La intrusión marina es un proceso dinámico, donde el frente de agua salada avanza tierra adentro en los periodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga es mayor. Este equilibrio natural puede verse alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, fundamentalmente debido a extracciones por bombeos, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro, lo que origina un deterioro de la calidad del agua y limita su utilización para ciertos usos; su recuperación suele ser lenta y con un coste económico elevado.*

### ABSTRACT

*The necessity to get hydric resources in appropriate quantity and quality to each use is an immediate consequence of the demographic and economic development that has taken place in the last decades in coastal areas. For that reason coastal aquifers have acquired a strategic importance as immediate and sometimes unique source of these resources. Their exploitation induces the occurrence of the phenomenon of seawater intrusion that sometimes puts in danger their sustainability. In order to avoid its appearance it is necessary a suitable planning and management, actions that not always have been made on the most right way. Seawater intrusion is a dynamic process, where the salt water wedge advances inland in the periods of low recharge to the aquifer and backs down towards the sea when the recharge is higher. The natural balance can be consequently altered by the human action when modifying the discharge of fresh water to the sea, mainly by pumping, causing a depletion of the piezometric surface and the encroachment of the marine water wedge inland. This leads to a deterioration of the quality of groundwater and decreases the possibility of exploitation for certain uses. The aquifer recovery is usually slow and very expensive.*

**Palabras claves:** *aguas subterráneas, intrusión marina, sostenibilidad, control aprovechamientos, recuperación de acuíferos.*

**Keywords:** *groundwater, seawater intrusion, sustainability, pumping control, aquifer recovery.*

### INTRODUCCIÓN

A lo largo de nuestras costas continentales e insulares, se sitúan un conjunto de acuíferos, habitualmente de gran importancia por el volumen y carácter estratégico de los recursos hídricos que almacenan. Estos acuíferos se caracterizan tanto por la valiosa utilidad de sus recursos para el ser humano, como por su relación con la presencia de humedales y ecosistemas naturales de gran valor patrimonial, en cuya génesis y preservación juegan a menudo un papel muy importante las aguas subterráneas (López-Geta, 1995).

Las zonas costeras disfrutan generalmente de climas más suaves y benignos que las continentales

interiores de latitudes similares, debido al efecto termorregulador del mar. Ejemplos claros los podemos observar a lo largo de todo el litoral, especialmente del mediterráneo. Como consecuencia de estas características climáticas y de unas mayores posibilidades de comunicación y transporte (vía marítima), el asentamiento humano y la prosperidad socioeconómica se han visto favorecidos, allí donde el relieve y la orografía lo han permitido. Por tanto es frecuente encontrar en estas zonas importantes aglomeraciones que originan una gran presión demográfica. La población residente en los Estados ribereños del Mediterráneo era de 246 millones en 1960, 380 millones en 1990 y actualmente supera los 450 millones. El Plan Azul calcula que esta cifra

(\*) Dr. Ingeniero de Minas. Instituto Geológico y Minero de España. [lopez.geta@igme.es](mailto:lopez.geta@igme.es)

(\*\*) Ingeniero de Minas. Instituto Geológico y Minero de España. [j.dedios@igme.es](mailto:j.dedios@igme.es)

aumentará a 520 ó 570 millones en el año 2030, cerca de 600 millones en 2050 y que se alcancen los 700 millones a finales del siglo XXI. Como ejemplo se puede comentar el caso de España, con más de 8.000 km de costa, y donde sólo en el litoral mediterráneo residía más del 20% de la población del conjunto del Estado en el año 1991, considerando los municipios situados a menos de 5 km de la costa, y más del 30% si se considera una franja de 25 km (MIMAM, 2000). Igualmente se ha desarrollado una actividad agrícola intensa, favorecida además por la fertilidad de los suelos; así mismo la industria ha buscado la proximidad a puertos de mar como una ventaja añadida para dar salida a sus productos y aprovisionamiento de materias primas. Además cabe hacer referencia a la actividad turística en las costas, que en numerosas Comunidades Autónomas se ha constituido como la principal actividad económica.

Una consecuencia inmediata de estas presiones, es la necesidad de disponer de recursos hídricos en cuantía y calidad acordes con las exigencias requeridas para cada uso. Por ello los acuíferos costeros adquieren una importancia estratégica como fuente inmediata y a veces única de estos recursos, cuya explotación intensiva puede inducir a la aparición del fenómeno de intrusión marina que pone en peligro la sostenibilidad de su aprovechamiento.

## LOS ACUÍFEROS COSTEROS

De forma sencilla, se puede definir un acuífero costero como aquella formación geológica capaz de almacenar agua y transmitirla, es decir que puede moverse a través del mismo, pero con la característica particular de que está conectado hidráulicamente con el mar, y en una mayoría de casos alguno de sus límites puede estar a su vez relacionado hidráulicamente con otros acuíferos del interior. De esta forma se pueden considerar como el último eslabón en el ciclo natural del agua, en su variante subterránea, puesto que reciben agua de otros acuíferos, de aguas superficiales o de lluvia directamente, para devolverla finalmente al mar.

Considerando la naturaleza de estas formaciones puede hacerse una primera clasificación básica de acuíferos costeros en dos tipos principales: detríticos y carbonatados. Hay otro tipo de acuíferos menos frecuente, constituido por plataformas volcánicas, consistentes en rocas efusivas porosas y permeables con una morfología sensiblemente llana. Entre los acuíferos detríticos costeros podemos distinguir, atendiendo a su morfología, los siguientes (Custodio, 1981): deltas, aluviales costeros, llanuras costeras y piedemontes costeros. Todos ellos están constituidos principalmente por capas alternantes de gravas, arenas, limos y arcillas, con diferente geometría y continuidad espacial.

Un modelo hidrogeológico habitual en los deltas y aluviales costeros consiste en la posibilidad de distinción de dos conjuntos acuíferos, uno superior libre y otro inferior confinado, separados por un paquete arcilloso de media o baja permeabilidad. El espesor de esta capa arcillosa normalmente disminuye hacia los bordes de la cubeta llegando a desaparecer, lo que origina el contacto entre ambas formaciones acuíferas.

Por su parte las llanuras detríticas costeras suelen dar lugar a acuíferos multicapa, libres y/o semi-confinados que yacen, bien sobre materiales de baja permeabilidad que aíslan hidráulicamente el conjunto superior, o bien sobre otras formaciones acuíferas más competentes (acuíferos carbonatados) de las que reciben un aporte de recursos (Fig.1). Éstas a menudo afloran hacia el interior a modo de orla montañosa que limita la llanura y pueden continuar por debajo de la formación detrítica hasta entrar en contacto directo con el mar. Tal es el caso de las planas litorales del Levante español (Gómez-Gómez *et al.* 2003; Benavente y Calvache, 1981; Calvache y Pulido, 1996).

Esas formaciones carbonatadas, con mayor o menor grado de karstificación, constituyen otro tipo de acuíferos costeros. Éstos, salvo alguna excepción presentan un relieve bastante abrupto, lo que limita en muchos casos el desarrollo de una actividad productiva en su propio ámbito, aunque sí pueden ser fuentes de recursos para zonas situadas en sus pro-

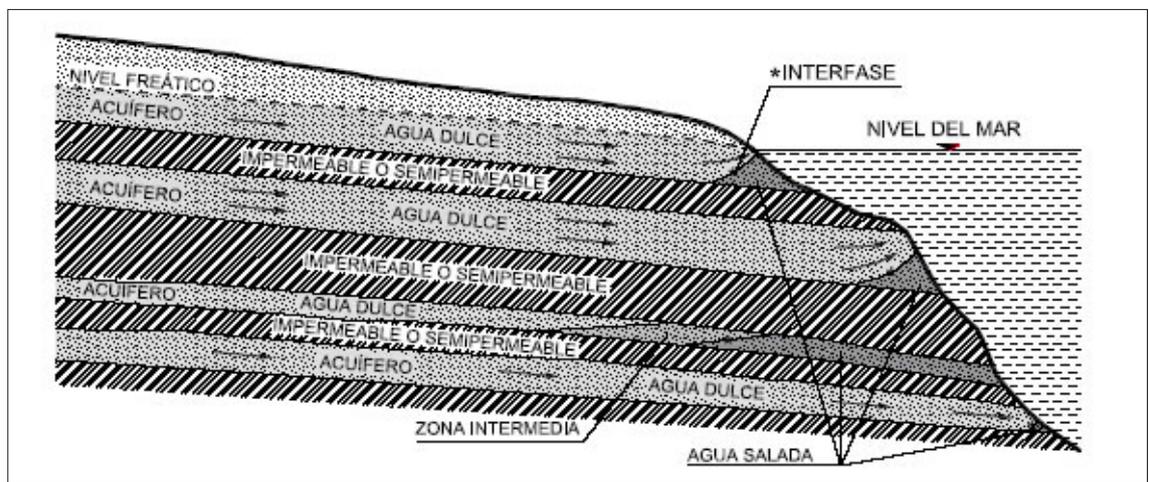


Fig. 1. Acuífero multicapa, con diferentes estados de intrusión salina ( Custodio y Llamas, 1983. Modificado)

ximidades. Estos acuíferos se encuentran representados en muchas partes del mundo, y particularmente tenemos importantes ejemplos en el mediterráneo. Así sólo en el litoral de España, Francia, Italia, Eslovenia, Malta, Croacia, Grecia y Turquía, se han identificado más de 60 acuíferos kársticos (Calafra, 2004).

## EL FENÓMENO DE LA INTRUSIÓN MARINA

En un acuífero costero, existe una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que pugna por penetrar tierra adentro (Custodio, 1995 y 2004), y que usualmente lo hace en forma de cuña apoyada en la base del acuífero dada su mayor densidad (Fig.2). La penetración de esta cuña dependerá de las características del acuífero: geometría, propiedades hidráulicas (permeabilidad, nivel piezométrico, etc.) y será función inversa del flujo de agua dulce que a lo largo de la costa descarga al mar. La intrusión marina es un proceso dinámico, donde el frente de agua salada avanza tierra adentro en los periodos de menor recarga del acuífero y retrocede hacia el mar cuando la recarga es mayor.

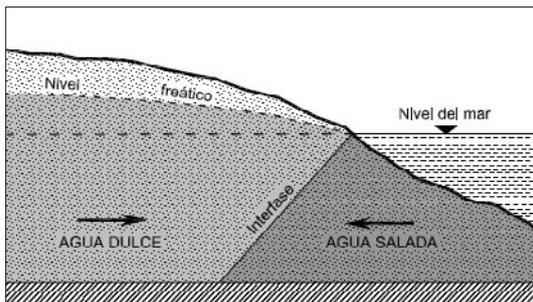


Fig. 2. Equilibrio agua dulce – agua salada.

Este equilibrio natural puede verse alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, fundamentalmente debido a extracciones por bombeos del acuífero, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro. Otras modificaciones del ciclo hidrológico, que alteren las entradas en el acuífero, como por ejemplo la construcción de presas en el cauce de un río que alimente un acuífero, pueden también alterar el equilibrio agua dulce - agua salada. Se puede definir por tanto, la intrusión marina, como el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce, como consecuencia de una disminución del flujo de agua dulce hacia el mar debido a la intervención humana. Esta intrusión provocará el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas con la consiguiente contaminación del acuífero costero y la limitación de su aprovechamiento para determinados usos.

Pero esa invasión de agua marina puede producirse de diferentes formas, siendo las más frecuentes: el avance horizontal de la interfase hacia el in-

terior (general o zonal, según López-Geta, 1995), y el ascenso vertical en forma de cono (“upconing”) de la interfase a favor de pozos o sondeos en los que tiene lugar un bombeo intensivo (Fig.3) (Morrill, 1989).

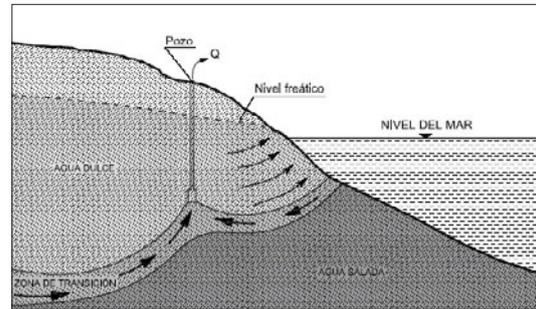


Fig. 3. Cono de intrusión producido por bombeo puntual en una captación.

Existen otros mecanismos de salinización diferentes de la intrusión marina, que pueden producirse individualmente o acompañar a la intrusión, como la disolución de sales y lixiviado de minerales, evaporación, mezcla con otras aguas salinizadas procedentes de pasados procesos de intrusión o presencia de aguas congénitas asociadas a los sedimentos de origen marino, vertidos industriales, etc.

## ESTUDIO DE LA INTRUSIÓN MARINA

El estudio de la intrusión marina se puede abordar de forma simplificada, considerando al agua salada y al agua dulce como dos fluidos inmiscibles en contacto mediante una superficie de separación neta o brusca entre las dos aguas (Fig.2). Esta superficie teórica se denomina interfase. Esta simplificación permite calcular la posición teórica del contacto agua dulce - agua salada de forma sencilla (Tood, 1960).

La forma más realista de abordar este estudio es la de considerar el agua dulce y el agua salada como dos fluidos miscibles, de tal forma que el paso de un fluido a otro se produce a través de una “zona de mezcla” o “zona de transición” (Fig.4). Las características químicas y físicas de esta zona dependerán del grado de mezcla en cada punto y los procesos químicos que se produzcan con la matriz

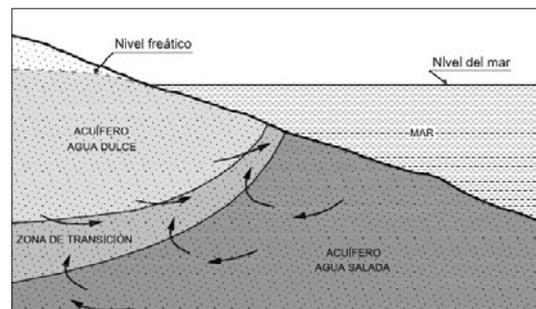


Fig. 4. Zona de transición y flujo del agua subterránea en un proceso de intrusión (Custodio y Lla-mas, 1983. Modificado).

del acuífero; la anchura de la zona de mezcla dependerá de las características hidrodinámicas del medio y de la difusividad y dispersividad del acuífero, y en función del grado de explotación se producirá un mayor o menor avance de la interfase. Por tanto podemos considerar la posición de la interfase como una variable de decisión a tener en cuenta a la hora de gestionar los recursos del acuífero.

Fueron Ghyben (1889) y Herzberg (1901) los primeros que establecieron una fórmula para estimar la profundidad de la interfase salina. Para ello consideraban al agua dulce y salada como dos fluidos de diferente densidad separados por una interfase neta (Fig.5). Para su cálculo se consideran las siguientes simplificaciones: 1°. Existencia de un equilibrio hidrostático entre los fluidos; 2°. La superficie de separación entre el agua dulce-salada es plana; 3°. No existen gradientes verticales de carga, y 4°. No existen pérdidas de carga del agua de mar en su avance tierra adentro. Con estos condicionantes, el equilibrio entre los dos fluidos se produce cuando:

$$\gamma_d (H+z) = \gamma_s z$$

siendo:

$\gamma_d$  = densidad del agua dulce ( $\approx 1,000 \text{ gr/cm}^3$ ).

$\gamma_s$  = densidad del agua salada ( $\approx 1,025 \text{ gr/cm}^3$ ).

H = altura del nivel piezométrico sobre el nivel del mar.

z = profundidad de la interfaz respecto al nivel del mar.

Por tanto:

$$z = 1 / 0,025 \cdot H$$

$$z = 40 H$$

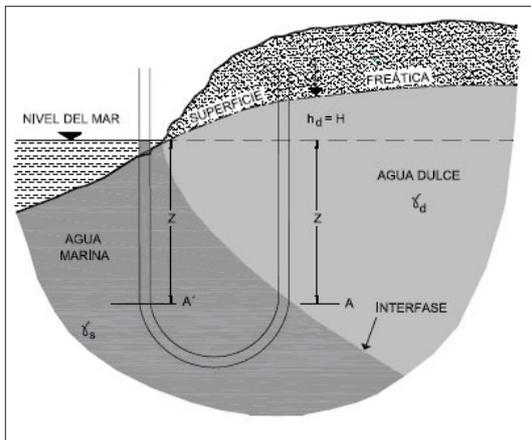


Fig. 5. Posición de equilibrio de la interfase según Ghyben-Herzberg.

Es decir, por cada metro de agua dulce (representados por la superficie piezométrica) sobre el nivel de mar en un determinado punto, la interfase se sitúa a una profundidad de 40 metros. Este valor es aproximado y varía entre 50 y 33 metros para densidades del agua de mar comprendidas entre 1,020

y 1,030. Esta ley de Ghyben-Herzberg se cumple de forma más satisfactoria en las zonas alejadas de la costa. En las zonas cercanas a la costa se obtienen profundidades menores a las reales.

Posteriormente Hubbert (1940 y 1953) considera el fenómeno de intrusión desde el punto de vista dinámico. No considera al flujo horizontal como Ghyben-Herzberg, debido a que en las proximidades de la costa existe un estrechamiento de la descarga de agua dulce al mar (morfología de cuña), que produce un incremento de la velocidad y por tanto un gradiente en cota superior al deducido para el flujo horizontal (Fig.6).

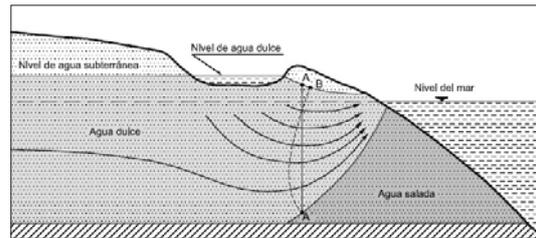


Fig. 6. Flujo del agua en la zona próxima al contacto con el mar (Custodio y Llamas 1983. Modificado).

En cuanto a la calidad del agua, la mezcla de agua dulce y agua de mar produce un incremento en la salinidad del agua subterránea. Por otro lado, esta agua de mezcla reaccionará con la matriz del acuífero. Estos procesos modificarán la composición química del agua. Existen también otros procesos de salinización que pueden acompañar a la intrusión marina, siendo interesante discriminar en que medida actúa cada proceso.

Por otra parte se pueden producir en los acuíferos otros procesos de salinización diferentes a la intrusión marina. Aguas salinas de diferentes orígenes pueden mezclarse con el agua dulce. Estas aguas pueden ser *salmueras* provenientes de la evaporación directa del agua del mar, *aguas connatas* o de *formación*, *aguas fósiles*, *aguas volcánicas* y *aguas termales* con unas facies químicas características, que también pueden aumentar la salinidad del acuífero.

## SITUACIÓN DE LA INTRUSIÓN MARINA EN ESPAÑA.

### Situación general

La contaminación debida a la intrusión de agua de mar en los acuíferos costeros por causas antrópicas, conjuntamente con la originada por el exceso de uso de fertilizantes nitrogenados en las labores agrícolas, constituyen los dos problemas de contaminación de las aguas subterráneas más importantes. En el primero de los casos la situación se puede considerar como grave, ya que una gran mayoría de los acuíferos del litoral mediterráneo, incluido el archipiélago Balear, y una parte importante de las costas de las islas Canarias, presentan altos contenidos de cloruros. En unas ocasiones la intru-

sión se produce de forma general en todo el acuífero, en otras sólo es invadido zonalmente y en un tercer grupo se produce de forma más local en forma de conos. En la figura 7, puede observarse la situación del litoral en función de estas tipologías.

A lo largo del litoral se han definido un total de 95 unidades hidrogeológicas (UH), lo que supone el 25 % del total de unidades en España (considerando en Canarias cada isla como unidad). Cada una de ellas puede comprender uno o varios acuíferos. 72 de esas unidades corresponden al litoral mediterráneo (49 en la Península y 23 en las Islas Baleares). El archipiélago de Baleares es el que tiene un mayor número de unidades costeras definidas (23 UHs), seguido de la cuenca hidrográfica del Sur con 19 y de las cuencas internas de Cataluña con 13. Sin embargo en cuanto a la superficie ocupada por estas unidades la mayor es la cuenca del Júcar con 5.286 km<sup>2</sup>, seguida de la Norte con 5.230 km<sup>2</sup> y Sur con 5.224 km<sup>2</sup>, además de Canarias donde se ha considerado la superficie total de las islas.

Cuenca	Nº UH costeras	Sin intrusión	Int. Local	Int. Zonal	Int. General
Norte	10	10	0	0	0
Guadiana	1	0	0	1	0
Guadalquivir	5	2	0	2	1
Sur	19	9	4	4	2
Segura	6	2	2	1	1
Jucar	10	0	1	7	2
Ebro	1	0	0	1	0
Cataluña	13	2	4	1	6
Baleares	23	14	0	5	4
Canarias	7	0	0	7	0
<b>Total</b>	<b>95</b>	<b>39</b>	<b>11</b>	<b>29</b>	<b>16</b>

Tabla 1. Grado de intrusión en UH costeras.



Fig. 7. Distribución de la intrusión marina en los acuíferos costeros españoles.

Los principales problemas se localizan a lo largo de la costa mediterránea de la Península Ibérica, junto con las Islas Baleares (tabla 1). Estas áreas suman una longitud de costa de aproximadamente 2.583 km, el 42% del total de costa española, distribuidos en cinco Comunidades Autónomas: Andalucía, Murcia, Comunidad Valenciana, Cataluña e Islas Baleares. Cataluña y Baleares presentan el mayor número de unidades con intrusión general, 6 y 4 respectivamente, seguidas en grado de afectación por las cuencas del Júcar y Canarias con predominio de la intrusión zonal. En el extremo opuesto la cuenca Norte no presenta salinización conocida en ninguna unidad.

## GESTIÓN

La gestión de un acuífero implica un conjunto de acciones legales, administrativas y técnicas encaminadas a la consecución del uso correcto del territorio y de los recursos hídricos subterráneos (Tulipano, 2003). Su objetivo final es permitir el uso racional del agua subterránea evitando una afectación importante a la calidad del recurso y a los ecosistemas asociados, cuando sea el caso.

Para un acuífero costero debe plantearse desde la particularidad que presentan estos, teniendo siempre en cuenta su conexión con el mar y el avance descontrolado cuando se cambian las condiciones de equilibrio natural. En su gestión hay que tener en cuenta que estos acuíferos juegan un papel muy importante en la regulación de las aportaciones que se producen en las zonas costeras, aportaciones propias y ajenas: entradas laterales, infiltración procedente de cauces superficiales, retornos de regadíos, etc. Esta relevancia es mayor por el hecho de que la regulación con sistemas superficiales suele ser difícil en estas áreas, al no existir condiciones favorables para este tipo de infraestructuras. Se puede decir por tanto, que los acuíferos costeros son colectores de recursos ajenos, aportaciones hídricas que de no existir estas formaciones litorales, con su capacidad de almacenamiento, se drenarían directamente al mar, sin ningún tipo de aprovechamiento.

Cualquier actuación que se realice en un acuífero costero tiene que conjugar explotación con conservación de la calidad del agua en condiciones óptimas para su aprovechamiento. Con esa premisa, la explotación del mismo va a producir una modificación de la interfase agua dulce-agua salada, lo que origina una modificación de la composición natural del agua. Es por tanto necesario, conocer la situación espacial y la forma de la interfase, que está impuesta por la distribución de los potenciales del agua dulce sobre la salada.

Pero para que la gestión sea realmente eficaz es importante que se realice desde el enfoque de la gestión integral de los recursos hídricos, considerando tanto las aguas superficiales como las subterráneas y las interacciones entre ambas, así como la disponibilidad de recursos alternativos no convencionales, como las aguas residuales depuradas o la

desalación. Sólo desde este planteamiento se tendrá una visión global del sistema hídrico analizado, sus necesidades y los recursos disponibles, de modo que se pueda establecer una asignación de recursos de la manera más racional posible, que permita garantizar la sostenibilidad del conjunto del sistema a largo plazo.

### Protección y control

El objetivo de la protección de un acuífero costero, al igual que la de cualquier otro acuífero, es conservarlo como fuente sostenible de recursos hídricos. Pero para su conservación es necesario un conocimiento previo de su funcionamiento hidrogeológico, así como una evaluación de sus recursos. Una vez conocido su comportamiento, los procesos de contaminación que le pueden afectar, y los recursos disponibles, la protección del acuífero se debe fundamentar en una adecuada planificación de las actividades humanas, una correcta y eficaz gestión de los recursos, y un control permanente de la calidad del agua y de las extracciones.

Con relación a la planificación, el desarrollo de modelos de uso conjunto de recursos hídricos se perfila como una herramienta muy útil para el gestor. Permite la simulación de diferentes escenarios de gestión, de cara a la optimización del aprovechamiento de los recursos disponibles en el conjunto del sistema hídrico considerado. Así mismo facilita el análisis de las garantías de abastecimiento a las diferentes demandas incluidas en el sistema, y permite sacar conclusiones sobre la sostenibilidad de los esquemas planteados.

Como herramientas preventivas, los planificadores y gestores pueden valerse además de mapas de vulnerabilidad y riesgo de salinización, que ayudan a la ordenación del territorio y de las actividades antrópicas. Finalmente deberán establecer las medidas y figuras legales y administrativas oportunas para asegurar el correcto aprovechamiento de los recursos por parte de los usuarios, mediante normas, concesiones, autorizaciones, restricciones de uso, etc.

Como se ha comentado anteriormente, la explotación de un acuífero costero supone modificar la situación natural de la interfase agua dulce-agua salada. Por lo tanto es necesario su control. Para ello se requiere, por una parte evaluar con fiabilidad las extracciones que del mismo se llevan a cabo, si es posible con contadores, y por otra controlar las variaciones de niveles piezométricos y de la calidad del agua subterránea. Para ello es necesario disponer de una red de sondeos diseñados y equipados correctamente para el objetivo que persiguen. Deben tener las características adecuadas de representatividad, ubicación, profundidad, penetración en el acuífero, distribución de tramos de entubación ranurada, y aislamientos, etc, para controlar el acuífero que se pretende. El control de la calidad de agua (conductividad eléctrica) a lo largo de los sondeos que atraviesen la interfase, permite establecer perfiles que sitúan perfectamente la posición de la zona de mezcla, definen su amplitud y su evolución temporal.

### Recuperación

Existen diferentes metodologías alternativas para inducir el retroceso de la intrusión y la reocupación del acuífero por parte del agua dulce (Maas, 1991). Las más frecuentes son: disminución y redistribución del bombeo, recarga artificial, y barreras de depresión, de inyección o de impermeabilización, entre otros sistemas.

La **disminución del bombeo** de extracción de aguas subterráneas producirá una mayor descarga de agua dulce al mar reduciendo la penetración del frente salino. Es la solución más inmediata aunque no siempre es posible, ya que a menudo no se disponen de recursos alternativos al bombeo. Por otro lado el proceso de retirada es lento y finalmente se puede perder el agua no bombeada por descarga al mar.

Otra posibilidad de mayor aplicación práctica es la **redistribución del bombeo** existente. La concentración de bombeos profundos en zonas cercanas a la costa, provoca la aparición de fuertes depresiones del nivel piezométrico, en muchos casos por debajo del nivel del mar, y la ascensión de grandes conos salinos, siendo vías preferenciales de intrusión marina en el área. Este fenómeno de “up-coning” tiene lugar aunque el volumen bombeado no sea significativo respecto al total de recursos del acuífero, debido a la concentración de las extracciones. Al distribuir estos bombeos en otros de menor cuantía y más alejados de la costa, se puede reducir la intrusión marina sin disminuir el volumen total de agua extraída del acuífero. Es muy interesante reproducir los efectos de estas redistribuciones en modelos matemáticos del acuífero para predecir el comportamiento y la evolución de la intrusión ante la medida correctora. Padilla *et al.* (1997), simulan en un modelo matemático la sustitución de la explotación de aguas subterráneas mediante bombeo en pozos, por una serie de captaciones poco profundas próximas a la línea de costa en el acuífero del Río Verde (Almuñécar, Granada). Los autores concluyen que el avance de la interfase se puede reducir de manera muy importante, sin modificar los balances totales de agua dulce del acuífero, con la simple sustitución de las explotaciones actuales por unas captaciones más someras.

El concepto de “**colectores costeros**” (Mercado, 1988) es el de interceptar el flujo de agua dulce que descarga al mar necesario para mantener el equilibrio con la interfase, una vez que este flujo haya cumplido su función de estabilizar la interfase. Estos colectores consistirían en pozos de bombeos superficiales situados paralelamente y próximos a la costa.

Otro método para combatir el avance de la intrusión es la **recarga artificial**. El fundamento de esta técnica consiste en la formación y mantenimiento de una cresta de presión de agua dulce, adyacente y paralelamente a la costa, a suficiente altura sobre el nivel de mar para rechazar la entrada de agua marina. Se requiere disponer de agua y con un precio que haga factible la operación. En la actuali-

dad se utilizan las aguas residuales urbanas una vez depuradas o aguas superficiales no reguladas que van a parar al mar.

La **barrera de inyección** es un caso particular de recarga artificial. Consiste en establecer y mantener una recarga a lo largo de la costa de tal forma que se tenga una elevación del nivel piezométrico superior al potencial de agua dulce necesario para evitar que el agua marina fluya hacia el interior del acuífero. En un acuífero libre, la barrera de inyección puede hacerse mediante canales o zanjas paralelas a la costa. La separación entre los puntos de inyección es una optimización entre los costes de ejecución y mantenimiento y el mayor consumo de agua necesaria para mantener el nivel mínimo entre ellos, que es mayor cuanto mayor es la separación. Esta técnica se ha aplicado por ejemplo en la llanura costera de Los Ángeles (California) desde los años 60, con la construcción de varias líneas de sondeos de inyección para mantener una barrera hidráulica contra la intrusión (Foreman, 2003). El agua inyectada era inicialmente agua residual depurada, pero se ha ido sustituyendo por agua superficial importada, a la vez que se ha mejorado la eficacia y se han reducido los costes de operación paulatinamente. Las desventajas de la técnica son el coste de los pozos de inyección y la cantidad de agua utilizada.

En acuíferos relativamente superficiales, la construcción de **barreras impermeables** como pantallas de arcillas u otro material de baja permeabilidad, reducen la posibilidad de intercambio de flujo con el agua de mar. En acuíferos más profundos se puede realizar la barrera mediante la inyección en pozos de bentonita-cemento. La mayor ventaja del método es la de permitir una explotación intensa del acuífero con bajo riesgo de salinización,

si la impermeabilización ha sido efectiva. La principal desventaja del método es su elevado coste y la dificultad para conseguir la efectividad en la impermeabilización (Fig.8).

### Resumen y consideraciones finales

La importante demanda de agua en las áreas costeras, asociadas a condiciones favorables para el asentamiento humano y el desarrollo socioeconómico, supone con frecuencia una intensa explotación de los acuíferos, induciendo la aparición del fenómeno de intrusión marina que pone en peligro la sostenibilidad de su aprovechamiento. Esas condiciones favorables para el asentamiento se dan preferentemente en los acuíferos detríticos costeros, mientras que los cársticos, salvo excepciones, suelen presentar relieves abruptos, lo que limita en muchos casos el desarrollo de una actividad productiva en su propio ámbito, aunque sí pueden ser fuentes de recursos para zonas situadas en sus proximidades.

La explotación de estos acuíferos va a crear un cambio en las condiciones de equilibrio natural entre el agua dulce y salada, y en función de ese grado de explotación se producirá un mayor o menor avance de la interfase. En cierto modo, se puede considerar la posición de la interfase como una variable de decisión a tener en cuenta a la hora de gestionar los recursos del acuífero.

Pero para que una gestión sea realmente eficaz es importante que se realice desde el enfoque de la gestión integral de los recursos hídricos, considerando tanto las aguas superficiales como las subterráneas y las interacciones entre ambas, así como la disponibilidad de recursos alternativos no convencionales, como las aguas residuales depuradas o la desalación. Sólo desde este planteamiento se tendrá una visión

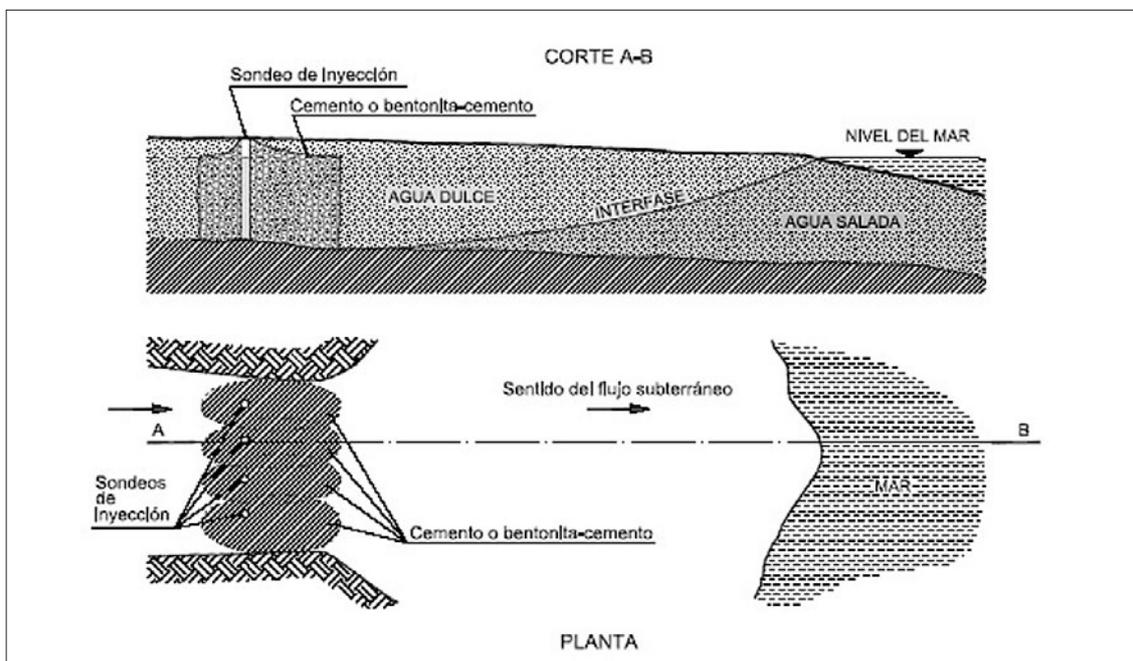


Fig. 8. Esquema de experiencia piloto de formación de barrera bentonita-cemento en la desembocadura del río Velez ( Málaga).

global del sistema hídrico analizado, sus necesidades y los recursos disponibles, de modo que se pueda establecer una asignación de recursos de la manera más racional posible, que permita garantizar la sostenibilidad del conjunto del sistema a largo plazo.

Por otra parte, la protección de los acuíferos costeros requiere un conocimiento previo de su funcionamiento hidrogeológico, así como una evaluación de sus recursos. Una vez conocido su comportamiento, los procesos de contaminación que les pueden afectar, y los recursos disponibles, la protección del acuífero se debe fundamentar en una adecuada planificación de las actividades humanas, una correcta y eficaz gestión de los recursos, y un control permanente de la calidad del agua y de las extracciones.

Cuando la intrusión ya es un hecho, las técnicas clásicas más utilizadas para frenarla o incluso hacer que se invierta, provocando un retroceso y una reocupación del acuífero por parte del agua dulce son: disminución y redistribución del bombeo; recarga artificial; y barreras hidráulicas de inyección y de depresión. A ellas habría que añadir el uso conjunto de recursos hídricos, superficiales, subterráneos y no convencionales, como herramienta de gestión útil para la solución de los problemas de explotación de los acuíferos costeros.

## BIBLIOGRAFÍA

- Benavente J. y Calvache, A. (1981). *Aspectos hidroquímicos de algunos acuíferos detríticos costeros de la provincia de Granada*. Simposio sobre el agua en Andalucía. Vol. II. 731-753. Granada.
- Calaforra, J.M. (2004). The main coastal karstic aquifers of southern Europe. COST-621 Action "Groundwater management of coastal karstic aquifers". Bruselas. 121 pp.
- Calvache, M.L y Pulido, A. (1996). *Condicionantes sobre la intrusión marina en acuíferos detríticos: ejemplos de la costa sur mediterránea*. IV Simposio sobre el agua en Andalucía (Almería). Vol.II.239-249.
- Custodio, E. (1981). *Evaluación y causas de la contaminación por invasión de agua marina en los acuíferos de la costa peninsular y en las áreas insulares*. Jornadas sobre análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas en España.. CIHS/AIH-E. Barcelona. 447-503.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ed. Omega. Barcelona. 2ª Edición.
- Custodio, E. (1995). *La gestión de los acuíferos costeros como fuente de un recurso importante y estratégico: progreso y futuro. Punto de vista del usuario*. En: Las aguas subterráneas en la Ley de aguas española: un decenio de experiencia. AIH. Madrid. 239-251.
- Custodio, E. (2004). *Myths about seawater intrusion in coastal aquifers*. Groundwater and saline intrusion. 18 SWIM, Cartagena 2004. IGME. Madrid. 599-608.
- Foreman, T.L. (2003). *Management of seawater intrusion in the Los Angeles coastal basin, California: an evolution of practice*. En: Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Tomo II. IGME. Madrid. 137-148.
- Ghyben, W. (1889). Nota in verband met de voorgenoemen put boring nabij Amsterdam. The Hague. K.Inst.Ing.Tydschrift.8-22.
- Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (Almuñécar, Granada).
- Gómez Gómez, J.D., López Geta, J.A. & Garrido Schneider, E. (2003). *The state of seawater intrusion in Spain*. En: Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Tomo II. IGME. Madrid. 169-185.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder Jour.Gasbeleuchtung und Wasserversorgung. 44.Munich.815-819, 842-844.
- Hubbert, M.K. (1940). The theory of ground-water motion. Journal of geology. Vol.48, nº.8. 785-944.
- Hubbert, M.K. (1953). Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. Am. Assoc.Petroleum Geologists Bull., vol.37, nº 8.1954-2026.
- López-Geta, J.A.(1995). *La gestión de los acuíferos costeros como fuente de un recurso importante y estratégico: progreso y futuro*. En: Las aguas subterráneas en la Ley de aguas española: un decenio de experiencia. AIH. Madrid. 221-237.
- Maas, K. (1991). *A seepage barrier against salt-water intrusion. Hydrogeology of Salt Water Intrusion*. A Selection of SWIM Papers. IAH.
- Mercado, A.(1988). *Intrusión marina-Factor determinante en la gestión de los acuíferos costeros*. Tiac'88. Tecnología de la intrusión en acuíferos costeros (Almuñécar. Granada). En: Tomo I. Estado del arte a nivel Nacional e Internacional. IGME. Madrid. 315-349.
- MIMAM, (2000). *Libro Blanco del agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente. 637 pp.
- Morell, I. (1989). *Salinización por Intrusión Marina. Aspectos teóricos y metodológicos. Aplicación a los acuíferos costeros de la provincia de Castellón*. Diputación de Castellón. Castellón. 211 pp.
- Padilla, F. et al. (1997). *Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero costero de río Verde (Almuñécar, Granada)*. Estudios Geológicos, 53. 173-182.
- Tood, (1960). *Ground Water Hydrology*, John Wiley. 336 pp.
- Tulipano, L. (2003). *Overexploitation consequences and management criteria in coastal karstic aquifers*. En: Tecnología de la Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros: Países Mediterráneos. Tomo II. IGME. Madrid. 113-126. ■

*Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 17 de octubre de 2007 y aceptado definitivamente para su publicación el 9 de junio de 2008.*