

TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros
Almuñécar (Granada, España). 1988

INTRUSION MARINA EN ACUIFEROS DE CANARIAS

Emilio La Moneda González. (IGME).

Ramón Olmedo Villarejo. (ENADIMSA).

RESUMEN

En las Islas Canarias, y especialmente en las de Gran Canaria y Tenerife, existen en los acuíferos de la franja costera, áreas donde se detectan importantes intrusiones del agua del mar. En estas zonas, que presentan dificultades en su control, hay numerosas captaciones abandonadas por la mala calidad de sus aguas, pero se siguen explotando los acuíferos con captaciones situadas más al interior, en las que también se están notado los efectos de la intrusión marina.

INTRODUCCION.

En el Archipiélago Canario, por sus características geográficas, hidrológicas y socioeconómicas, se dan las condiciones apropiadas para que la explotación de acuíferos en zonas costeras entrañen considerables riesgos de intrusión marina.

Esta intrusión se produce, en general, por efecto de la intensa explotación a que se someten los acuíferos situados en zonas en que la franja costera, considerada como tal hasta una cota de unos 200 m., alcanza anchuras superiores a los 2 km.

La generalización y alcance de la intrusión depende de las características hidrogeológicas de la zona, de las que son determinantes la permeabilidad de los materiales y la estructura geológica; y de los sistemas y magnitud de la explotación.

En este sentido, son factores impulsores de los fenómenos de intrusión en estas franjas, la presencia de materiales permeables de series volcánicas recientes y sedimentarios; y la fuerte demanda de agua a que están sometidas estas áreas, por ser zonas preferentes de asentamiento de cultivos y población.

Además de ello, en estas franjas suele haber una pluviometría inferior a los 200 mm/año, sumamente irregular, que limita, prácticamente, sus posibilidades de recarga a las aportaciones de los acuíferos más al interior y a los retornos

de riegos.

Se encuentran en estas condiciones la isla de El Hierro, gran parte de las de Lanzarote y Fuerteventura, los litorales sureste de Tenerife y Gran Canaria y las desembocaduras de los barrancos mayores del Archipiélago.

Así pues, existen áreas en estas franjas, como el Barranco de La Aldea, zonas de Telde y Arinaga, en Gran Canaria, y la zona Güimar a Adeje en Tenerife, en que la intrusión ha obligado prácticamente al abandono de las explotaciones por la calidad del agua.

El IGME, como otros Organismos, consciente de esta problemática inició, en 1979, dentro del Plan de Gestión y Coservación de Acuíferos (PGCA), el establecimiento de redes de control en las islas de Gran Canaria, Tenerife y La Gomera. Este plan, en el cual ha colaborado ENADIMSA, se ha continuado hasta la actualidad.

En la presente comunicación se expone, de un modo general, la metodología de trabajo utilizada, algunas de las conclusiones obtenidas sobre varias de las zonas de trabajo, en que los periodos de observación superan los cinco años; y algunos de los problemas peculiares de la región en relación con los acuíferos costeros.

METODOLOGIA DE TRABAJO

Hemos de señalar que el sistema de trabajo utilizado para establecer las redes de observación, el tipo de observaciones a realizar y las propias observaciones, se han visto seriamente limitados por factores externos a las metodologías de investigación habituales en este tipo de acuíferos.

En primer lugar, cabe destacar, la peculiaridad de las captaciones de la región. Se trata, en la mayor parte de las obras verticales, de pozos de unos 3 m. de diámetro excavados con explosivos hasta profundidades que superan los 300 m.

En estos pozos, en los que es frecuente el bombeo a caudal crítico, conforme se alcanza la zona saturada, es habitual la realización de obras secundarias (galerías, drenes, sondeos de fondo de diámetros muy variables, etc) que, con el descenso de niveles y caudales, se van quedando en tramos "superiores" proporcionando algunos caudales.

El conocimiento de estas obras secundarias, y sobre todo las de fondo, en la mayoría de los casos, es sumamente problemático por su carácter clandestino, ya que la legislación específica de la región, limita las obras por debajo de la cota cero.

Por lo tanto, la información que se puede obtener, de los tramos finales de estas captaciones, referente a materiales atravesados, caudales y calidad del agua es costosa, de difícil obtención y muy limitada e imprecisa.

En el caso de los sondeos, estas limitaciones son todavía mayores por las dificultades que presenta el reconocimiento de este tipo de obras.

Otro factor, limitante de los controles que se pueden establecer, es que muchas de las antiguas obras, en zonas fuertemente afectadas por la intrusión, están abandonadas, encontrándose cerradas o clausuradas, siendo prácticamente inaccesibles a efectos de muestreo.

En cuanto a los regímenes de bombeo, cabe señalar que la electrificación y automatización de las instalaciones, ha añadido inseguridad al conocimiento de las condiciones de muestreo químico, ya que en muchos de los casos se desconocen los tiempos de bombeo, caudales de extracción, etc. Además de ello, estos regímenes, para periodos, mensuales o estacionales, suelen presentar grandes irregularidades por ser dependientes, en muchos casos, de demandas zonales mixtas, lo cual añade una mayor dispersión a las condiciones de muestreo.

Dadas estas condiciones, se decidió efectuar, como es habitual en el PGCA, dos campañas anuales de control, procurando efectuar las medidas en épocas coincidentes con el inicio de campaña de bombeo (octubre) y final de campaña (abril), con objeto de encontrar el mayor número de instalaciones abiertas y tener una, relativa, coincidencia con el comienzo y el fin de los bombeos para agricultura por su mayor entidad.

El trabajo habitual consiste en la medida de niveles, muestreo de agua para análisis en laboratorio, determinación de conductividad "in situ" y la toma de datos sobre régimen de bombeo y modificaciones en la obra o instalaciones.

Las redes de control se han establecido en las islas de Gran Canaria, Tenerife y La Gomera.

El control de acuíferos costeros se realiza únicamente en áreas de las islas mayores; ya que, en La Gomera, donde se controlan los nacientes del acuífero central, no existe una red de observación costera específica, se trata de una serie de puntos dispersos en barrancos y con un periodo de observación inferior a los tres años.

La delimitación de zonas de control y de los puntos de las redes, dentro de cada una de estas islas mayores, se ha efectuado en base a información propia o preexistente. Se han tomado como límites la línea de costa, la cota 300 ó 400 m., en función de la topografía y profundidad de las captaciones, y unos límites laterales dependientes de las características

hidrogeológicas, socioeconómicas y geográficas del área.

ZONAS DE CONTROL

GRAN CANARIA

En esta isla se controlan cuatro zonas situadas al Noroeste (Galdar-Guía), Este (Telde-Ingenio y Arinaga-Tirajana) y Sur (Maspalomas). La zona de Telde-Ingenio tiene un periodo de observación de 3 años.

Zona de Galdar-Guía

Se extiende desde el Barranco de Moya hasta el de Galdar con una superficie de unos 40 km², en ella se controlan unos 20 puntos desde 1980.

La zona presenta una costa ácantilada, salvo los dos pequeños aluviales de los barrancos antes mencionados, y tiene una topografía abrupta estando profundamente encajados los barrancos.

Los materiales existentes pertenecen a la Serie Basáltica I, Serie Fonolítica, Series Basálticas Post-Roque Nublo y formaciones sedimentarias, estando constituidos por coladas y piroclastos basálticos, coladas e ignimbritas fonolíticas y materiales detríticos (aluviales, piedemonte, etc.).

El acuífero explotado se sitúa, generalmente, en materiales de la Serie Fonolítica y I Serie Post-Roque Nublo.

Las captaciones únicamente sobrepasan la cota cero en el área de Galdar y en la desembocadura del Barranco de Moya, donde se han encontrado contenidos en cloruros superiores a 1.000 ppm., a distancias de 1.000 m. y 500 m. de la costa, respectivamente, atribuibles a una incipiente intrusión a estas distancias.

En la Figura 1 se ha representado la variación de cloruros y conductividades en los pozos, números 424150026 y 424150005, situados en los barrancos de Galdar y Moya, para el periodo de control.

Como se puede observar, en el primero de ellos, parece existir un ligero aumento del contenido salino, presentando fluctuaciones importantes, que pudieran atribuirse a las condiciones de bombeo en el momento de muestreo.

En el segundo no es deducible un incremento significativo del contenido salino, pese a su proximidad a la costa (500 m.), lo cual podría ser atribuible a la baja permeabilidad de los materiales de la Serie Fonolítica en que se encuentra.

GRAN CANARIA

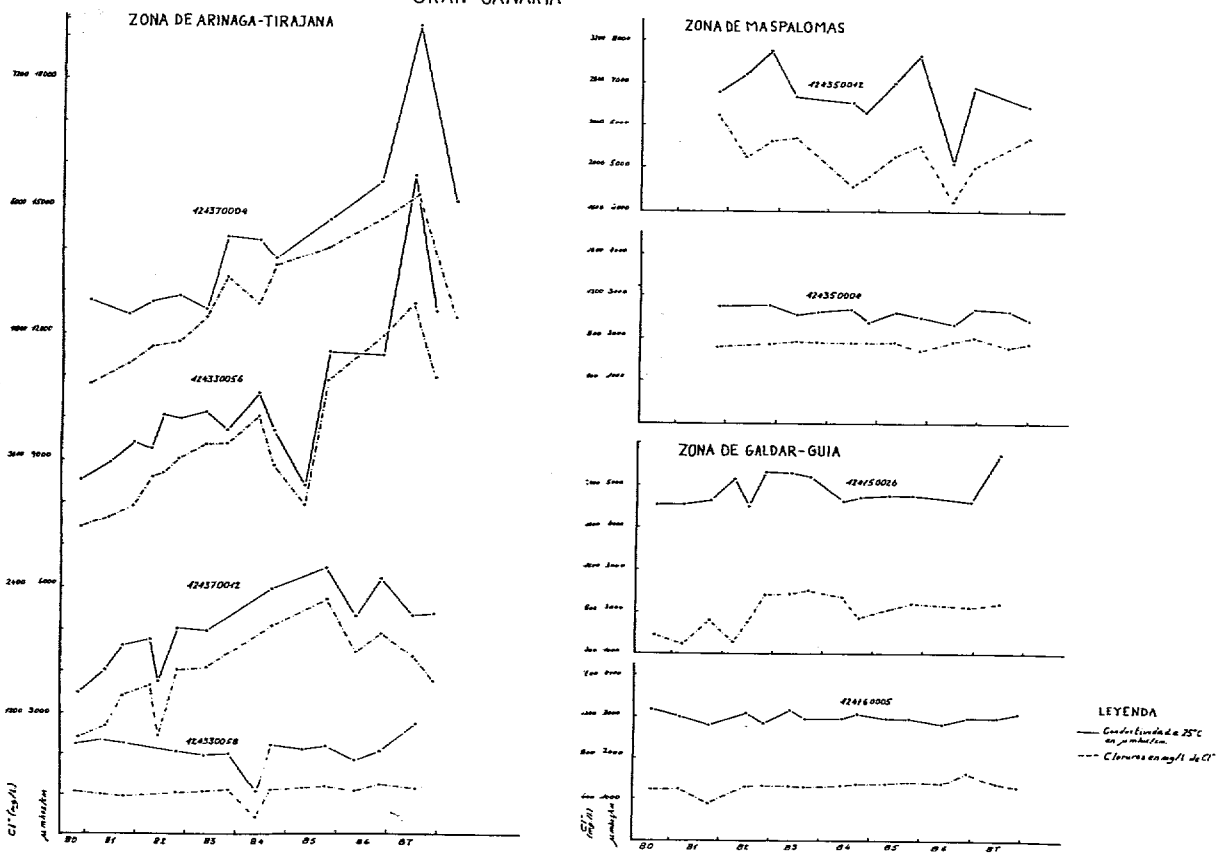


FIGURA 1

TENERIFE

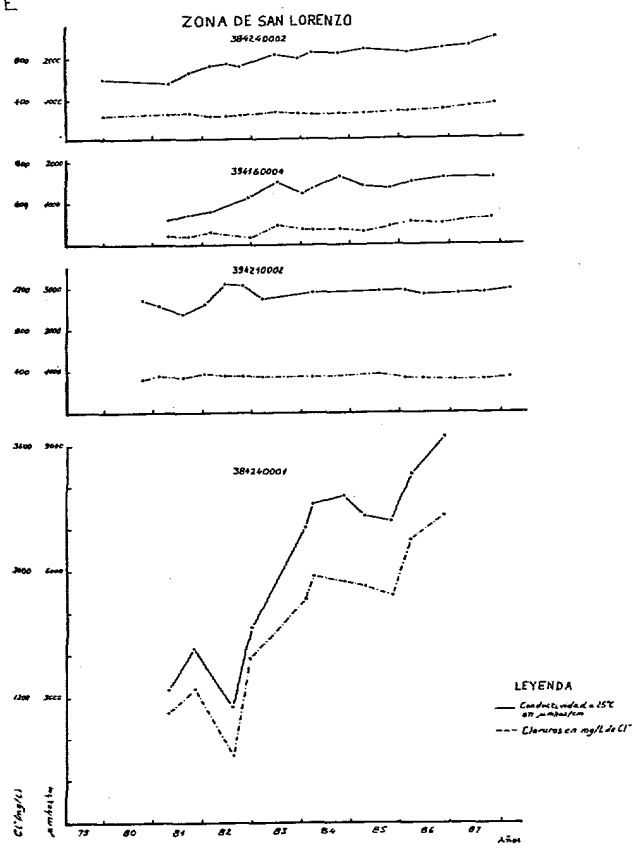
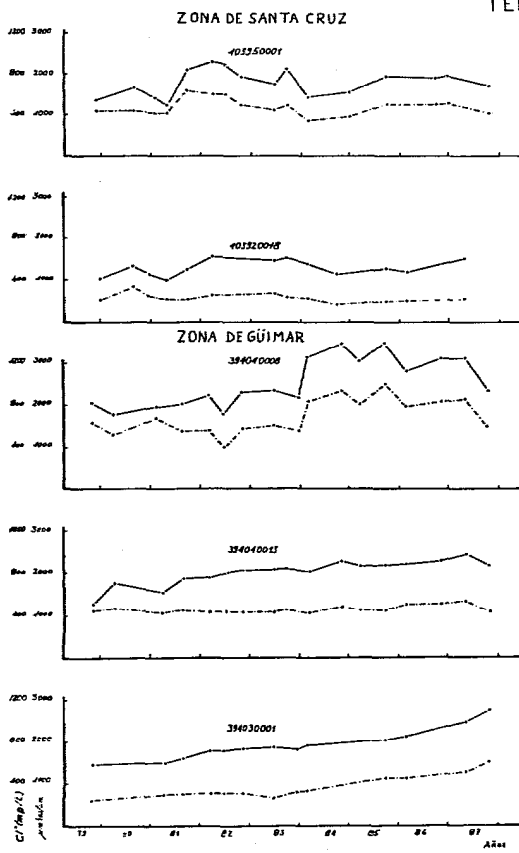


FIGURA 2

Zona Arinaga-Tirajana.

Se extiende entre Juan Grande y el Cruce de Arinaga con una superficie de unos 110 Km², en ella se controlan unos 45 puntos desde 1980.

La zona corresponde al cono de deyección del Barranco de Tirajana y adyacentes, presentando una topografía suave.

Los materiales existentes pertenecen a la Serie Basáltica I, Serie Traquisienítica, Serie Fonolítica, Serie Roque Nublo, Series Basálticas Post-Roque Nublo y diversas formaciones sedimentarias, estando constituidos por coladas y piroclastos basálticos, coladas e ignimbritas de composición fonolítica y traquisienítica y materiales detríticos de origen diverso (aluviales, terrazas, piedemontes, etc.).

El acuífero regional explotado actualmente se sitúa en materiales de la Serie Basáltica I y coladas fonolíticas de la Serie Fonolítica, existiendo algunos niveles asociados a los depósitos sedimentarios y materiales volcánicos recientes. En la costa, los depósitos sedimentarios ganan espesor, y teniendo buena permeabilidad, están saturados, presentando aguas de muy mala calidad por su contacto directo con el mar.

La mayoría de los pozos en explotación sobrepasan la cota cero, alcanzándose en algunos casos más de 150 m. bajo el nivel del mar, existiendo amplios sectores deprimidos por bombeos durante gran parte del año en donde se dan isopiezas de - 60 m.

Se encuentran contenidos en cloruros superiores a las 1.000 ppm. en distancias a la costa, comprendidas entre los 1.000 m. y 7.000 m., que presentan una distribución irregular, atribuible a la presencia de materiales, de muy baja permeabilidad, de las series Traquisienítica y Fonolítica subyacentes, los cuales deben actuar de pantalla.

Los contenidos máximos en cloruros, observados en los puntos de la red, se sitúan en torno a las 3.000 a 5.000 ppm. para distancias de hasta 6.000 m. de la costa.

En la Figura 1 se ha representado la variación de cloruros y conductividad, para el periodo de observación, de cuatro puntos de la zona, situados en el Barranco de Tirajana cuyas distancias a la costa son las siguientes:

<u>Nº de Inventario</u>	<u>Distancia (m.)</u>
424370012	3.000
424370004	3.500
424330058	5.400
424330056	6.500

Como se puede observar, existen claros incrementos del contenido de cloruros en tres de ellos, comprendidos entre 1.000 y 2.000 ppm. En el 424330058 no existe prácticamente variación pese a su distancia a la costa, lo cual puede ser atribuible al posible efecto de barrera impermeable antes apuntado.

Zona de Maspalomas.

Se extiende entre los barrancos de Arguineguín y Fataga con una superficie de unos 125 km², en ella se controlan unos 20 puntos.

La zona presenta una topografía relativamente abrupta en la que se encajan fuertemente los barrancos, los cuales tienen aluviales más o menos desarrollados, que en su desembocadura dan paso a abanicos de cierta entidad.

Los materiales existentes pertenecen a la Serie Basáltica I, Serie Traquisienítica, Serie Fonolítica, Serie Roque Nublo, primeros episodios de las Series Post-Roque Nublo y formaciones sedimentarias de origen diverso, estando constituidos por coladas y piroclastos basálticos y fonolíticos, ignimbritas y materiales detríticos (aluviales, terrazas, conos de deyección, etc).

El acuífero explotado se sitúa en materiales de la Serie Basáltica I y Serie Fonolítica, cuya permeabilidad es reducida.

La mayoría de los pozos se sitúan en el fondo de los barrancos y sobrepasan la cota cero alcanzando, en general, profundidades considerables, más de 100 m. en algunos casos, por debajo del nivel del mar. Sin embargo, se ha observado únicamente la existencia de depresiones puntuales (hasta -60 m.) debidas a bombeos.

Los contenidos en cloruros superiores a las 1.000 ppm. quedan relegados a las desembocaduras de los barrancos principales (Arguineguín, Ayagaures, etc.), en las que se encuentran a unos 3.000 a 5.000 m. de la línea de costa, pareciendo estar más en relación con intrusiones en los acuíferos de los materiales sedimentarios, que con el regional.

En la Figura 1 se han representado las variaciones de cloruros y conductividad, para el periodo de observación, de dos de los puntos de la zona, situados a unos 3.500 m. de la costa, aunque su distancia a través del aluvial es mayor.

Como se puede observar en ambos, no existen tendencias claras de variación en los contenidos que sean atribuibles a la intrusión marina.

aunque su distancia a través del aluvial es mayor.

Como se puede observar en ambos, no existen tendencias claras de variación en los contenidos que sean atribuibles a la intrusión marina.

TENERIFE

En esta isla se controlan seis zonas situadas al Noreste (Santa Cruz), Este (Güímar), Sur (Valle de San Lorenzo - Adeje), Oeste (Guía de Isora) y Norte (Buena Vista-Punta del Hidalgo). En la presente comunicación por diversos motivos se han excluido las zonas situadas al Norte y Oeste.

Zona de Santa Cruz

Se extiende al Norte de Santa Cruz desde el Barranco Igueste al de Tahodio con una superficie de unos 30 km². En ella se controlan unos 15 puntos de desde 1979.

La zona presenta una costa muy abrupta, con grandes acantilados, en la que se abren paso diversos barrancos. La topografía continúa en las mismas condiciones hacia el interior y se alcanzan cotas de 1.000 m. a 6 km. de la línea de costa.

Los materiales existentes pertenecen a la Serie Basáltica Antigua, estando constituidos por coladas y piroclastos basálticos, algunas coladas fonolíticas, frecuentes diques que intruyen en esta formación y materiales detríticos (aluviales, piedemontes, etc).

El acuífero explotado se sitúa en materiales de la Serie Basáltica Antigua, de baja permeabilidad.

Las captaciones, emboquilladas en los aluviales, alcanzan, en los materiales basálticos, la cota cero o la sobrepasan en unos pocos metros.

En los puntos controlados, se ha observado que para distancias de 500 a 1.500 m. del mar (las menores), los contenidos en ión cloruro oscilan entre 200 y 900 ppm. y las conductividades son de 1.000 a 2.500 $\mu\text{mhos/cm}$, sin que se hayan podido apreciar variaciones en la calidad del agua atribuibles a efectos de intrusión marina.

En la Figura 2 se han representado las variaciones de estos parámetros en dos puntos de la zona.

Como se puede observar, existen fluctuaciones importantes en la calidad, las cuales son atribuibles a los regímenes de bombeo y condiciones de muestreo.

Zona de Güimar

Se extiende desde Barranco Hondo hasta La Ladera, al Sur de Güimar, con una superficie de unos 35 km², controlándose unos 15 puntos.

La zona presenta una topografía en cuesta, que se inicia en una costa acantilada excepto en la desembocadura del Barranco del Fregenal.

Los materiales existentes pertenecen a formaciones que van desde la Serie Basáltica Antigua hasta las series basálticas recientes, existiendo formaciones detríticas. Litológicamente están constituidos por coladas y piroclastos basálticos y fonolíticos, aglomerados, tobas, pumitas, etc. y materiales sedimentarios (aluviales, terrazas, etc.).

Los acuíferos de la zona se sitúan en los materiales de la Serie Basáltica II y Serie Basáltica I, estando separados por una formación aglomerática de baja permeabilidad ("Mortalón").

El acuífero inferior, situado en la Serie I, presenta características de semiconfinamiento y aguas de buena calidad. El acuífero superior, situado en la Serie II, es libre y está en contacto con el mar y presenta aguas de peor calidad.

Las captaciones, emboquilladas en el acuífero superior, alcanzan la cota cero o la sobrepasan en algunos metros dentro de este acuífero. Algunas de ellas, en general mediante obras secundarias, atraviesan el "Mortalón" y alcanzan el acuífero inferior a cotas inferiores a los -30 m.

En La Figura 2 se han representado las variaciones de conductividad y cloruros, para el periodo de observación, de tres de estas captaciones situadas a unos 1.500 m. de la costa, estando comprendidas entre los 200 y 800 ppm. de Cl⁻ y los 1.500 a 3.500 µmhos/cm.

Como se pueden observar, existe una cierta intrusión en este acuífero a esta distancia del mar y algunas captaciones, más próximas, ya se han abandonado por su salinidad.

Sin embargo, hemos de señalar que las captaciones que por medio de obras secundarias alcanzan el acuífero inferior, a pesar de encontrarlo en ocasiones a profundidades superiores a los 50 m. bajo el nivel del mar, éste presenta, en general, en las muestreos efectuados en fondo de pozo, aguas de buena calidad con 300 µmhos/cm de conductividad.

Zona de Valle de San Lorenzo.

Se extiende desde el Barranco del Río hasta el del Infierno con una superficie de unos 200 km², controlándose en ella unos

20 puntos de agua.

Los materiales existentes, como en la zona anterior, pertenecen a formaciones que van desde la Serie Basáltica Antigua a las series basálticas recientes existiendo formaciones sedimentarias. Estos materiales están constituidos por coladas y piroclastos basálticos y fonolíticos, aglomerados, tobas, pumitas, etc., traquifonolíticas y materiales detríticos (aluviales, terrazas, dunas, etc).

El acuífero regional se sitúa en materiales de la Serie Antigua y Serie Cañadas.

Las captaciones que explotan este acuífero alcanzan en su totalidad la cota cero, sobrepasándola frecuentemente en algunos metros.

Los contenidos en cloruros superiores a los 1.000 ppm., en la actualidad, se encuentran a distancias de 4.000 a 6.000 m. de la costa (aproximadamente, la cota 200 m.), habiéndose abandonado la mayoría de los pozos situados en esta franja.

Hemos de señalar, que en esta franja la mayoría de los pozos presentaban fluctuaciones estacionales del contenido en ión cloruro, de costa hacia el interior, de unas 750 a 100 ppm., que son atribuibles a las recargas de "aguas arriba" y regímenes de bombeo.

En la Figura 2 se han representado las variaciones de conductividad y cloruros de cuatro puntos de esta zona para el periodo de control.

Como se puede observar, en uno de ellos, 384240001, existe un progresivo aumento del contenido en ambos parámetros. Esta captación se encuentra situada en la franja antes definida y a unos 3.000 m. de la costa.

Las otras tres captaciones, situadas más al interior de la franja (de 5.000 a 8.000 m. de la costa), presentan fluctuaciones muy reducidas y un aumento moderado, y progresivo, de salinidad en dos casos (384240002 y 394160004), mientras que en la restante (394210002), la variación es inapreciable.

CONCLUSIONES.

Del conjunto de las zonas observadas se puede deducir que:

- Existen zonas en la franja costera de Gran Canaria y Tenerife, que alcanzan anchuras de hasta 5 ó 6 km, en donde por efecto de la intrusión marina, las aguas presentan calidades que las hacen de difícil utilización.

- La amplitud de estas franjas depende de la topografía.

permeabilidad y estructura de los materiales subyacentes y de los regímenes de bombeo a que han estado sometidas.

- No se aprecian disminuciones generalizadas en la intrusión atribuibles a recargas por lluvia de carácter anual o interanual. Sin embargo, se aprecian fluctuaciones dependientes de los regímenes de bombeo, que serían indicativas de la existencia de recargas continuas de "aguas arriba", por efecto del flujo de descarga radial, cuya entidad depende de las características hidrogeológicas de la zona.

- Se presentan problemas en la determinación de las condiciones puntuales de muestreo químico, por lo que sería aconsejable la utilización de puntos de control específicos.

- Existen zonas donde el deterioro de la calidad es progresivo y continuo. En estas zonas es deseable la limitación de su explotación e implantación de regímenes de bombeo no dependientes de las puntas de la demanda de agua,

- En las zonas en donde la degradación de la calidad del agua es suficientemente importante, sería aconsejable la utilización de recursos no convencionales para su mejora mediante recarga artificial y creación, en caso de su posibilidad, de barreras.

Finalmente, dada la proliferación de la utilización de captaciones, en zonas ya intruidas, para potabilización, sería deseable el estricto control de su implantación, ya que son elementos que favorecen la persistencia y generalización de la intrusión.

BIBLIOGRAFIA

Estudio Científico de los Recursos de Agua en las Islas Canarias. (SPA/69/515). UNESCO-MOP. 1974.

Proyecto MAC-21. Comisión Interministerial Coordinadora de las Actuaciones del Estado en Materia de Aguas en las Islas Canarias. 1979.

Plan de Gestión y Conservación de Acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España. 1979-1988. (Varios informes).

Proyectos para estudios de asesoramiento técnico en materia de aguas subterráneas a las Administraciones Públicas. Instituto Geológico y Minero de España. 1983-1988. (Varios informes).

Plan de Abastecimientos a Núcleos Urbanos mediante aguas subterráneas. (PANU). Instituto Geológico y Minero de España. 1981-1986. (Varios informes).

Control piezométrico y de calidad de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros de la isla de Gran Canaria. Análisis periodo 1979-1983. IGME, 1984.

TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros
Almuñécar (Granada, España). 1988

INTRUSION MARINA EN ACUIFEROS KARSTICOS COSTEROS : APLICACION
AL LITORAL ESPAÑOL

Francisco Javier BURILLO PANIVINO. Geólogo.
Juan José DURAN VALSERO. Inst. Geológico y Minero de España.
Tomás PEINADO PARRA. Instituto Geológico y Minero de España.

"Algunos piensan que la tierra recupera el agua que vierte y que el mar no aumenta de caudal, porque no se lo apropia sino que devuelve inmediatamente el que recibe.

El agua entra en la tierra por caminos secretos; sale en pleno día, pero retorna secretamente. Es filtrada en su paso desde el mar, pues azotada por muchas tierras y piedras en su trayecto, deja la sal y en la inmensidad del suelo atravesado abandona su mal sabor y recobra su pureza".

L. ANNEUS SENECA

Naturales Quaestiones. Libro I: De las aguas (terrestres), Capítulo V. (Años 62 y 63 de n.E.).

RESUMEN

Los acuíferos kársticos costeros pueden presentar, al igual que los detriticos, procesos de intrusión marina, con peculiaridades hidrodinámicas e hidroquímicas propias. Las características arquitecturales heredadas ("paleoniveles" y "paleoconductos"), la heterogeneidad direccional del macizo kárstico y el propio carácter dinámico de los procesos físico-químicos en el karst costero, otorgan un especial interés a estos fenómenos, puntualmente importantes en algunas zonas del litoral mediterráneo español.

1. INTRODUCCION.-

De todos es sabido que la intrusión marina en acuíferos costeros es uno de los mayores problemas de contaminación de aguas subterráneas. En la mayoría de las ocasiones, la salinización es consecuencia de la sobreexplotación de estos acuífe-

ros, produciendo una ruptura del equilibrio agua dulce/agua salada que promueve un desplazamiento del límite entre ambas hacia el interior del continente, en función de cómo se sitúen los puntos de extracción. Este es un fenómeno relativamente bien conocido en acuíferos detríticos ya que ha sido objeto de numerosos estudios.

Las relaciones agua dulce/agua salada en macizos calcáreos karstificados presentan grandes dificultades en cuanto a su interpretación dada la heterogeneidad del medio. Por otro lado, España es un país kárstico por excelencia con gran parte de su superficie cubierta por materiales karstificables (I.G.M.E., 1986). Algunos sectores costeros españoles presentan acuíferos kársticos salinizados por la invasión del agua del mar. Estas zonas se localizan, esencialmente, a lo largo del litoral mediterráneo peninsular e insular, donde la demanda de aguas subterráneas es alta y los recursos escasos.

2. HIDRODINAMICA DEL KARST COSTERO.-

2.1. Aspectos generales.-

En los aspectos fundamentales, el funcionamiento hidrodinámico de un karst costero es como el de cualquier karst continental, con una circulación de agua a favor de conductos o zonas de permeabilidad preferente ligadas a la disolución de los materiales a través de las discontinuidades del macizo rocoso. Es evidente que esas discontinuidades condicionan un medio anisótropo, con diferentes respuestas según las porciones analizadas.

La evolución natural del karst conlleva una jerarquización progresiva de los conductos, concentrando, más o menos puntualmente, la descarga de aguas infiltradas a nivel superficial a través de las típicas formas de absorción, o procedente de otros acuíferos anexos.

El karst se desarrolla con respecto a un nivel de base que puede generalizarse para todo el sistema o tomar ciertas componentes locales en función de la litoestratigrafía y estructura del macizo, e incluso de la acción del hombre.

En el caso del acuífero kárstico costero, el nivel de base esencial es, en principio, el del mar, aunque, como veremos más adelante, determinados aspectos tectónicos y climáticos pueden alterar el sistema de acuerdo con la variación del nivel de referencia marino. Así se constata la existencia de surgencias kársticas submarinas, según conductos ("paleoconductos" funcionales o activos) que constituyen niveles de base heredados ("paleoniveles" de karstificación).

A partir de un equilibrio supuesto para la interrelación acuífero costero/mar, la reducción del flujo de agua dulce hacia el mar (natural o inducida), provocará una invasión de agua salada en busca de un nuevo equilibrio. En acuíferos detríticos libres la invasión se puede calificar de "general". La anisotropía, esencialmente vertical, existente en un acuífero multicapa hace que la contaminación se dirija hacia los niveles explotados (esto constituye un factor importante a la hora de decidir la profundidad de los pozos o sondeos y su

explotación racional). El acuífero kárstico es anisótropo por excelencia, y la invasión marina va en relación con los conductos afectados por la explotación y las zonas "capacitivas" adyacentes a éstos, de acuerdo con el modelo conceptual de MANGIN (1975). En determinados casos, con un alto grado de fisuración y kárstificación del medio, se establece un cierto grado de "homogeneidad" en el conjunto, a escala de macizo.

La intrusión marina en un medio kárstico costero es un fenómeno relativamente rápido dada la alta permeabilidad de los conductos en cuestión. Así, algunas explotaciones relativamente retiradas del mar, sufren de salinización en cuestión de pocas horas o días una vez en funcionamiento. Haciendo nuevamente referencia al modelo de MANGIN (1975), podemos distinguir dentro del karst una serie de bloques capaces de almacenar agua según una microfisuración, y una red de conductos que, en función de su "nivel de aguas", se comportan como receptores o donantes de agua con respecto a las unidades capacitivas. Estas últimas tienen siempre una respuesta bastante más lenta que la de los "canales", dotando de una "memoria" y de la necesaria capacidad de almacenamiento al acuífero para que éste se constituya como tal. Es ésta una cuestión importante a considerar de cara a cualquier tipo de contaminación, ya que será siempre más difícil "limpiar" el acuífero si sus unidades capacitivas han sido afectadas.

Los estudios llevados a cabo sobre algunos casos españoles (p.e. CUSTODIO, 1975) demuestran que incluso los medios kársticos se atienen de manera bastante aceptable, mientras no son alterados, a la conocida ley de GHYBEN-HERZBERG, según la cual "la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a cuarenta veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto", aunque con frecuencia la interfase no es una superficie nítida, sino una espesa zona de mezcla que ocupa una amplia porción del acuífero y que se extiende, con las irregularidades propias del medio kárstico, por encima y por debajo de la teórica línea de GHYBEN-HERZBERG (CUSTODIO, 1983). Los conductos más permeables pueden concentrar el flujo de agua dulce incluso en esa zona, pero también pueden tomar una cierta cantidad de agua salina del entorno capacitivo si ese flujo no es lo suficientemente importante; esto puede servir de explicación para algunas surgencias de agua salobre que a primera vista resultarían incongruentes.

2.2. Aspectos geológicos y climáticos.-

Como ya habíamos comentado anteriormente, estructura y estratigrafía geológica son los principales factores que condicionan la geometría y circulación hídrica de un acuífero. En cuanto al clima, éste establece la disponibilidad de agua. Esto es generalizable tanto para un acuífero por porosidad primaria como para otro por fisuración y/o disolución.

La tectónica de fractura es determinante esencial de las redes de kárstificación. La circulación de aguas, y por tanto la disolución de la roca, se produce preferentemente a favor de las discontinuidades existentes y en especial de las ten-

sionales por su mayor disposición a estar abiertas. Esto nos hace entender la gran importancia del estudio de la fracturación y de la historia tectónica de un macizo rocoso cuando queremos determinar las direcciones de drenaje en el subsuelo, sin olvidar el importante papel de los movimientos neotectónicos, que nos ayudarán a determinar el régimen de esfuerzos actual o reciente que soportan las rocas.

Las variaciones relativas del nivel de los océanos con respecto a los continentes, unas veces por motivos tectónicos y otras climáticos (movimientos glacioeustáticos), han dado lugar a distintos niveles de karstificación, apareciendo en la actualidad surgencias activas a distintas profundidades en el mar, llegando a alcanzar varias decenas de metros bajo su nivel actual. Estas surgencias, constituyen paleoniveles de base heredados, que han condicionado la evolución de la arquitectura kárstica y condicionan su dinámica actual. Naturalmente, las antiguas cavidades pueden estar rellenas de sedimentos o simplemente exentas de funcionamiento. El fenómeno en su conjunto es un tema esencial a contemplar en la distribución y relaciones entre las fases de agua dulce y salada que hoy encontramos, a veces, un tanto curiosas (ver CUSTODIO, 1983).

Es también importante la posible relación entre acuíferos kársticos y detríticos; así por ejemplo, la existencia de una zona karstificada infrayacente con respecto al acuífero detrítico puede facilitar y acelerar el proceso de contaminación salina de éste último, debido a la rápida evolución lateral de la salinización por el karst (CUSTODIO, 1983).

El elevado número de variables que introduce la geología y la fenomenología kárstica en sí, hace de cada caso un problema particular que deberá ser estudiado detenidamente como tal, con planteamientos *ad hoc*.

3. ASPECTOS HIDROQUÍMICOS.-

El mejor indicador de la intrusión salina es el ión Cl^- , aunque en ocasiones su origen es distinto al marino (esto suele ser fácilmente detectable por criterios geológicos); en todo caso, tiene la ventaja de no alterarse en su recorrido por el terreno.

Por otra parte, encontramos como indicador muy apropiado la relación rCl^-/rCO_3H^- ($r=meq/l$), puesto que el agua marina, al contrario que la continental, no aporta cantidades significativas de CO_3H^- y sí de Cl^- . Relaciones como rMg^{++}/rCa^{++} pierden fiabilidad dados los procesos de cambio iónico que se pueden dar entre el terreno y el agua salinizada (dolomitización de la caliza en determinadas condiciones) (CUSTODIO, 1986).

La capacidad de cambio iónico es mayor en calizas arenosas o con cierta proporción arcillosa que en calizas muy puras (CUSTODIO, 1986). Los procesos de cambio iónico que nos interesan, así como sus consecuencias, los podemos resumir como siguen (CUSTODIO, 1986):

- Invasión del agua salada: Adsorción de Na^+ y cesión de Ca^{++} y Mg^{++} por el terreno. Menor capacidad para solución

de carbonatos en el agua. Floculación de arcillas.

- Retirada del agua salada: Adsorción de Ca^{++} y Mg^{++} y cesión de Na^+ por el terreno. Mayor capacidad para solución de carbonatos en el agua. Defloculación de arcillas (posibilidad de removilización y obstrucción de poros).

Sin embargo, no son los procesos de cambio iónico los únicos que actúan en la relación del terreno con las aguas mezcladas. La zona de mezcla constituye un cuerpo con distintas características físicas y químicas que las dos fases que la componen. Dado que la relación entre esas características físicas y químicas (fuerza iónica, presión parcial de CO_2 , temperatura, etc...) y el contenido del agua en carbonatos no es lineal, surgen posibilidades de mezcla (incluso a partir de aguas en teórico equilibrio), en las que el resultado es un agua agresiva capaz de disolver carbonatos, o sobresaturada, originando la precipitación de éstos (HANSHAW and BACK, 1979).

En general, el balance global suele estar a favor de la disolución según demuestra la práctica, y así sucede que la intrusión marina suele significar una mayor capacidad de karstificación en la zona de mezcla (HANSHAW and BACK, 1979 y BACK and HANSHAW, 1983). En el archipiélago Balear se ha comprobado recientemente la activación de la espeleogénesis en la zona de mezcla por HERMAN, BACK and POMAR (1986).

Existen modelos teóricos basados en los balances de masa que, a partir de los datos comparados de campo y laboratorio, permiten establecer la posible evolución del agua en el acuífero cuestionado, siendo estos modelos una herramienta fundamental para el estudio de la cinética de los acuíferos carbonatados kársticos (MERCADO, 1977).

4. PROBLEMATICA EN LOS ACUIFEROS KARSTICOS COSTEROS ESPAÑOL.-

El problema de acuíferos kársticos con intrusión marina por sobreexplotación no es demasiado abundante en España, al contrario de lo que sucede con los acuíferos detríticos. Los casos se concentran en el litoral mediterráneo y en las islas Baleares, y más concretamente en las zonas donde coinciden las formaciones carbonatadas karstificadas con una importante demanda de agua.

Los puntos afectados más notables son los siguientes, la mayoría de los cuales ya fueron citados por CUSTODIO (1981):

- Macizo de Garraf (Barcelona): Constituye uno de los casos más importantes de contaminación salina en el litoral kárstico español, estudiado por CUSTODIO (1975), CUSTODIO (1981), PASCUAL et al. (1986 b); en cuestión de una decena de años la sobreexplotación del acuífero ha llevado a niveles de salinización que alcanzan los 5-6 gr/l de cloruros en la zona costera (I.G.M.E., 1985). Se trata de una potente formación mesozóica carbonatada que constituye un acuífero inter-

medio fisurado, karstificado de tipo mixto abierto costero según la clasificación tipológica de BAYO et al (1986) (PASCUAL et al., 1986 a); su principal punto de descarga es la notable surgencia submarina de La Falconera.

- Macizo de Vandellós (Tarragona): El bloque cretácico de Perelló-Vandellós no presenta una explotación de aguas subterráneas demasiado importante. Constituye un acuífero intermedio según PASCUAL et al. (1986 a). Las concentraciones de cloruros son en general bastante bajas, oscilando entre 13 y 230 mg/l, aunque localmente alcanzan valores de hasta 2.8 gr/l (I.G.M.E., 1985).
- Macizo de Montgrí (Gerona) y Macizo de Montsiá (Tarragona): Constituyen dos pequeños macizos calcáreos con algún problema local de salinización (CUSTODIO, 1981).
- LLano de Palma (Mallorca): Se ha detectado salinización con contenido de cloruros de hasta 6 gr/l (I.G.M.E., 1985). Se trata esencialmente de un proceso de ascensión salina por los pozos desde unos niveles carbonatados inferiores intensamente salinizados. Se han tomado medidas como la reducción del bombeo y cierta recarga artificial. En algunos pozos se han cementado los tramos inferiores para impermeabilizar CUSTODIO (1982) y BARON et al. (1984).
- Sierra de Levante (Mallorca): Contenido en cloruros entre 550 y 800 mg/l. Existen puntos a unos 5 Kms del mar cuya concentración es de 1 gr/l (I.G.M.E., 1985).
- Zona de Mitjorn (Menorca): Acuífero calcarenítico y recifal con características mixtas detrítico-kársticas. En la actualidad no presenta muchos problemas, pero la evolución de niveles freáticos y la sobreexplotación del acuífero hacen pensar que éstos no tardarán en aparecer (CUSTODIO, 1981).
- Zona de Cullera-Gandía-Denia-Jávea (Valencia, Alicante): Presenta algún problema de carácter local (CUSTODIO, 1981).
- Sierra de Gádor (Almería): Acuífero kárstico compartimentado; alguno de sus bloques se hunde bajo el acuífero detrítico del Campo de Dalías, fuertemente explotado y con problemas de intrusión (I.G.M.E., 1980).
- Sierras de Tejeda y Almirajara (Málaga, Granada): La explotación a que está siendo sometido el bloque más meridional en los últimos años (CASTILLO et al, 1986), ha hecho disminuir sensiblemente las surgencias de agua dulce submarinas en el sector de Maro-La Herradura.

Será preciso un control riguroso para evitar la intrusión.

5. CONCLUSIONES.-

La intrusión marina en acuíferos kársticos costeros es un fenómeno poco conocido dada la gran casuística que presenta, lo que impone un estudio particular de cada caso.

El desarrollo del agente contaminante (agua salada), suele ser bastante rápido una vez iniciado el bombeo intenso (sobreexplotación) de las aguas subterráneas. La contaminación afecta, en primer lugar, a los conductos explotados y, posteriormente, a las zonas capacitivas adyacentes a éstos. La presencia de acuíferos detriticos en relación con niveles kársticos puede facilitar la salinización de los primeros, bien lateral o verticalmente.

La zona de mezcla suele presentar una compleja actividad química que pasa por procesos de intercambio iónico y de disolución-precipitación de carbonatos. En general, predomina una significativa capacidad de karstificación en las aguas de la interfase. La mayor parte de estos procesos están bastante estudiados pudiendo incluso reproducirse, al menos teóricamente, su evolución en el acuífero.

Los cambios en el nivel del mar (tanto por motivos climáticos como tectónicos), han dado lugar a distintos niveles de karstificación, alguno de los cuales sigue activo aún encontrándose bajo el mar ("paleoconductos y paleoniveles" heredados). Esto introduce un factor más de complejidad en el funcionamiento del karst costero.

La solución a los problemas de intrusión salina en karst costeros son evidentemente difíciles; Las medidas recomendadas son las de tipo preventivo: permitir el suficiente flujo de agua dulce hacia el mar y realizar un control hidroquímico riguroso.

En España, la cuestión de los acuíferos kársticos salinizados no es en la actualidad demasiado alarmante. Los casos detectados se concentran en Cataluña (Garraf y Vandellós), Baleares (Mallorca y Menorca sobre todo), y algún punto aislado de Levante. En la vertiente Sur (Almería, Granada y Málaga), deberá ponerse especial atención para no dar lugar en un futuro próximo a problemas.

Es necesario destacar la imperiosa necesidad de preservar de la sobreexplotación los acuíferos kársticos costeros que aún poseen una buena calidad hidroquímica de sus aguas, al objeto de no volver a reproducir en éstos los procesos de intrusión marina y salinización ya presentes en numerosos acuíferos detriticos en el litoral español.

6. BIBLIOGRAFIA.-

BACK, W. and HANSHAW, B.B. (1983). Effect of sea-level fluctuations on porosity and mineralogic changes in coastal aquifers. U.S. Geological Survey Circular 822: Paleoclimate and Mineral Deposits. Cronin, T.M.; Cannon, W.F., Poore, R.Z. (Eds). pp 6-7.

- BARON, A.; FAYAS, J.A.; GONZALEZ, C.(1984). Proceso de salinización de las aguas subterráneas en el Llano de La Palma (Isla de Mallorca). I Congreso Español de Geología. Tomo IV, pp.53-63. Segovia.
- BAYO, A.;CASTIELLA, J.;CUSTODIO, E.;NINEROLA, S.;y VIRGOS, L.(1986): Ensayos sobre diversas tipologías de acuíferos en rocas carbonatadas de España. Identificación, técnicas de estudio y estrategia de captación y explotación. Jornadas del karst en Euskadi. San Sebastián.
- CASTILLO, E.; GOLLONET, F. y DELGADO, J.(1986). Características hidrodinámicas de materiales carbonáticos alpujárrides en el sector Nerja-La Herradura (Granada). Simposium sobre el agua en Andalucía. pp. 267-276. Granada.
- CUSTODIO, E.(1975). Metodología y resultados del estudio hidrogeológico del macizo kárstico de Garraf (Barcelona). Boletín Geológico y Minero. Tomo LXXXVI-I, pp.31-44. Madrid.
- 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. Actas de las jornadas sobre análisis y evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas de España. I, pp.447-503. Barcelona.
- CUSTODIO, E.(1982). Calidad del agua y protección de los acuíferos kársticos ante la contaminación. Reunión monográfica sobre el karst-Larra 82. pp.291-326. Larra (Navarra).
- CUSTODIO, E.(1983). Relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras. En Hidrología subterránea. 2a. ed. Tomo II, Sección 13, pp. 1315-1339. Ediciones Omega. Barcelona.
- CUSTODIO, E.(1986). Hidroquímica del karst. Jornadas sobre el karst en Euskadi. Ponencia mecanografiada, 36 pp. San Sebastián.
- HANSHAW, B.B. and BACK, W.(1979). Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems. Journal of hydrology. Vol.43, pp.287-312. Amsterdam.
- HERMAN, J.S.; BACK,W. and POMAR, L.(1986). Speleogenesis in the groundwater mixing zone: The coastal carbonate aquifers of Mallorca and Menorca, Spain. 9o. Congreso Internacional de Espeleología. Vol.I, pp.13-15. Barcelona.
- IGME.(1980). Calidad de las aguas subterráneas en las Cuencas del Sur de España. Colección Informe. 172 pp. Madrid.
- IGME.(1985). Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. 3 tomos. Madrid.
- IGME.(1986). Mapa y Memoria del karst de España. 68 pp. y un

mapa. Madrid.

MANGIN, A.(1975). Contribution a l'etude hydrodynamique des aquifers karstiques. Thèse de l'Université de Dijon. pp.710. Dijon.

MERCADO, A.(1977). The kinetics of mineral dissolution in carbonate aquifers as a tool for hydrological investigations,II: hydrogeochemical models. Journal of hydrology. Vol.35, pp.365-384. Amsterdam.

PASCUAL, J.M.; BOSCH, X.; CUSTODIO, E. y BAYO, A.(1986). Los acuíferos mixtos abiertos costeros: ejemplo de aplicación de la tipología de acuíferos en rocas carbonatadas: aplicación a los acuíferos de Garraf y de Vandellós (Cataluña). Simposium sobre el agua en Andalucía. Vol. II. pp.403-412. Granada.

PASCUAL, J.M.; BOSCH, X.; CUSTODIO, E.; IRIBAR, V. y BAYO, A.(1986). Intrusión marina en calizas costeras: aplicación a Garraf Sur y Vandellós (Cataluña). Jornadas sobre el karst en Euskadi. pp.287-299. San Sebastián.

TIAC'88. Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros
Almuñécar (Granada, España). 1988

LOS MODELOS MATEMATICOS APLICABLES EN PROBLEMAS DE
INTRUSION MARINA DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL
USUARIO HIDROGEOLOGO.

VIRGOS SORIANO, Luis Ignacio (*)
LOPEZ BRAVO, Juana (**)

Resumen:

Se hace un repaso a los modelos matemáticos más conocidos, describiéndose las ventajas e inconvenientes de unos y otros desde el punto de vista de la experiencia de los autores como usuarios. No se pretende hacer aquí un estudio comparativo objetivo de todos los modelos sino transmitir a la comunidad de hidrogeólogos las ventajas e inconvenientes que unos pocos presentan desde la subjetividad de la experiencia de los autores. Se llega a la conclusión de que los programas, TRECOTT (bi y tridimensional), MODFLOW, MERCER, KONIKOW y SANFORD-KONIKOW pueden ser apropiados en la mayoría de los casos prácticos.

* Investigación y Gestión de Recursos Naturales, S.A. (IGR)
** Instituto Geológico y Minero de España. (I.G.M.E.)

1.- Introducción

En la actualidad existen en el mercado una variada oferta de modelos matemáticos aplicables a distintos problemas de intrusión salina. Tras años de rodaje, aquellos modelos con limitaciones en sus campos de aplicación (p. ej. celdas de mezcla) o inconsistencia en sus planteamientos, cayeron en desuso dando paso a una nueva generación de modelos en los que la exactitud de sus cálculos está suficientemente verificada para todos ellos y a los que se está pidiendo algo más: que sean cómodos de manejar para el usuario hidrogeólogo.

Hoy día, a un modelo matemático se le pide:

- Que sea correcto conceptualmente.
- Que simule todos los fenómenos físicos y químicos relevantes en el problema a tratar.
- Que utilice un algoritmo de cálculo suficientemente preciso.
- Que no sean necesarios cambios de programa para realizar diferentes simulaciones.
- Que la entrada de datos sea cómoda.
- Que suministre sólo la información que se necesita, sin largos listados de resultados.
- Que utilice los datos que corrientemente se tienen del acuífero, y con las unidades habituales de trabajo (que no pida datos que no se miden normalmente).
- En definitiva que esté pensado para ser utilizado por hidrogeólogos y no por informáticos, y por técnicos y no por teóricos.

En general, un modelo que no cumpla los cuatro primeros requisitos será descartado automáticamente en la selección del modelo adecuado para un caso concreto. Serán los otros cuatro requisitos los que condicionarán la decisión final, para la que se valorará muy positivamente la existencia de programas de pre- y postprocesado adecuados.

En los siguientes apartados se hace un resumen de las características de los principales modelos conocidos por los autores, describiéndose las ventajas e inconvenientes que en su opinión presentan unos y otros.

2.- Modelos de flujo

Al igual que en otros acuíferos, los modelos "clásicos" de flujo tienen un campo de aplicación en acuíferos costeros con intrusión marina. Con ellos es posible predecir si en ciertas condiciones se va a producir la intrusión, pero no es posible preverlo con exactitud cuantitativamente.

Conceptualmente los modelos clásicos tienen un inconveniente: no simulan correctamente el flujo en la zona costera, donde se forma una cuña de agua salada. Sin embargo, conocida esta limitación, estos modelos pueden ser utilizados en numerosos casos prácticos.

Los modelos en cuyo uso los autores tienen experiencia son:

- **TRESCOTT bidimensional:** modelo cómodo de manejo y muy versátil para distintos modelos conceptuales del acuífero. Tan sólo el tema referente a extracciones y recargas por lluvia y retorno de riego resulta tedioso. Existen sin embargo versiones (incluso en castellano) que resuelven estos temas con mayor elegancia. En general no se usan programas de pre- y postprocesado.

- **TRESCOTT tridimensional:** la versión original presentaba ciertas limitaciones, y desde luego era más complicada de manejo que el programa bidimensional. Versiones posteriores mejoran considerablemente el programa, pero aún así sigue siendo de manejo complicado, por lo que su utilización solo se justifica cuando el problema físico lo exige.

- **PRICKETT:** existen numerosas versiones de este programa, bidimensionales y tridimensionales. Por lo general todas estas versiones son el resultado de un parcheo continuo adecuando el programa a cada caso particular, por lo que son programas de utilización menos general que el de TRESCOTT. Generalmente, estos programas no están acoplados con programas de preproceso o postproceso, pero son de manejo sencillo e intuitivo.

- **GWSIM:** posiblemente sea éste el programa que más se acerca al hidrogeólogo, en el sentido de utilizar datos de uso común: superficies regadas por concejos, dotaciones, etc. No incluye programas de pre- y postprocesado. Es una versión mejorada del programa de PRICKETT.

- **COOLEY:** utilizable tan sólo para un primer tanteo, aporta la novedad de la calibración automática del modelo por optimización minimocuadrática. Eso sí, su manejo es muy

sencillo incluida la estimación automática de los parámetros, su mayor limitación es la incapacidad de simular el funcionamiento del acuífero en régimen transitorio. Es un modelo ideal con fines didácticos.

- MODFLOW: programa tridimensional modular de sencillo manejo. Se dispone en el mercado de programas de pre- y postprocesado, incluyendo rutinas de dibujo con plotter y gráficos en pantalla.

2. 1.- Modelos quasi-tridimensionales que consideran inmiscibilidad de los fluidos.

Estos modelos nacieron de la necesidad de adecuar los modelos de flujo a la problemática de los acuíferos costeros en los que existe una cuña de agua salada. La simulación no es suficientemente precisa para numerosos casos prácticos y en concreto para simulaciones a escala regional.

Basicamente, se trata de considerar que cada celda tiene agua salada hasta un cierto nivel variable y agua dulce por encima de éste, planteando y resolviendo las ecuaciones para las dos fases dulce y salada.

- MERCER: Su manejo es relativamente sencillo. Por ejemplo pide la permeabilidad como permeabilidad con agua dulce y no la intrínseca, calculando permeabilidad con agua salada en base a la anterior y a los datos de densidad y viscosidad de una y otra. Es igualmente riguroso y sencillo en lo referente a pozos de bombeo, para los que solicita entre otros datos la profundidad con objeto de calcular exactamente la salinidad del agua bombeada. Es un programa útil para simulaciones a escala regional, pero la versión original no está preparada para simular cambios en la recarga, bombeos, etc. a lo largo del tiempo.

3.- Modelos de transporte de solutos

En la actualidad todos los modelos de transporte de solutos incluyen un modelo de flujo, generalmente simplificado, a fin de simular simultáneamente los fenómenos de flujo y

transporte. Presentan frente al problema de intrusión el problema de no considerar las distintas densidades del agua dulce y salada.

3. 1.- Modelos de elementos finitos.

Presentan todos ellos la característica común de ser complicados de manejo y demasiado teóricos en cuanto al problema real a resolver. Su utilización sólo está justificada en casos muy particulares.

- **SUTRA:** Tiene la particularidad de poder simular el transporte en la parte no saturada del acuífero. Su utilización es muy tediosa pero existe en el mercado un programa de preprocesado. La entrada de datos está preparada en términos matemáticos más que hidrogeológicos, por lo que requiere un cierto esfuerzo de adaptación.

3. 2.- Modelos basados en el método de las características.

Estos modelos resultan de fácil manejo para el usuario no especialista, no siendo necesarios conocimientos matemáticos especiales para su utilización. Pueden presentar problemas de largos tiempos de ejecución en acuíferos muy heterogéneos, con zonas de alta velocidad del agua (tipo kárstico, por ejemplo).

- **KONIKOW:** Se trata de un programa extremadamente sencillo. Están muy simplificados tanto el problema de flujo como el de transporte, y las simplificaciones son perfectamente coherentes con los datos que generalmente se tienen en la práctica. Además el programa está pensado para usuarios hidrogeólogos, pidiendo datos como recargas, bombeos, pozos de observación, etc. Por ello este es posiblemente el programa idóneo para una gran mayoría de situaciones prácticas, a lo que contribuye también la existencia de programas de preprocesado y postprocesado.

3. 3.- Modelo "Random Walk".

Un caso especial es el modelo "Random Walk" de PRICKET. El método del paseo aleatorio es una solución

elegante al problema del transporte, y sin duda el que presenta menor dispersión numérica. En el otro lado de la balanza el programa requiere algunas pequeñas modificaciones para simular distintas hipótesis, por lo que es necesario saber algo de informática para manejarlo. El programa es absolutamente riguroso en cuanto a la resolución de las ecuaciones de flujo y transporte. Sin embargo generalmente existen ciertos parámetros cuyo conocimiento es tan sólo aproximado, por lo que esto no es una una ventaja -sino más bien una desventaja- frente al modelo de KONIKOW. No se dispone de programas de pre- y postprocesado para este modelo.

4.- Modelos de simulación de dos fases líquidas miscibles con diferente densidad

Son los que resuelven con mayor rigor el problema de la intrusión salina. Se trata sin embargo en muchos casos de modelos que simulan únicamente un perfil vertical, lo que limita su campo de aplicabilidad a estudios muy locales.

4. 1.- Modelos de elementos finitos:

Por lo general los modelos de elementos finitos que simulan el transporte de solutos son capaces de reproducir diferentes cambios de densidad con la salinidad, y en concreto el sutra, ya comentado en el apartado 3-1.

4. 2.- Modelos de diferencias finitas:

- INTERA.- Versión mejorada del modelo desarrollado por INTERCOMP Resource Development and Engineering, Inc, para el U.S. Geological Survey. Es un modelo totalmente tridimensional, ideado para simular el comportamiento de residuos contaminantes, radiactivos o no, almacenados en formaciones salinas. Es perfectamente aplicable a supuestos de intrusión marina, pero dado que su finalidad es mucho más general

resulta de tedioso manejo.

4. 3.- Modelos basados en el método de las características:

Presentan las mismas ventajas e inconvenientes que los modelos de transporte de solutos basados en el mismo método y comentados en el apartado 3.2.

- **SANFORD-KONIKOW:** Este programa es descendiente del comentado en el capítulo 3.2 de KONIKOW. Simula el transporte de un soluto que controla la densidad del agua (el TSD) y otro soluto traza cuyo movimiento se quiere visualizar (p.ej. el ión nitrato), lo que lo hace especialmente apto para la simulación de problemas de contaminación en acuíferos costeros. Su manejo es, gracias a la simplificación del fenómeno físico, más sencillo que el de los modelos comentados en los apartados anteriores. No obstante sigue siendo algo complicado para los hidrogeólogos clásicos, no habituados a manejar datos como permeabilidad intrínseca, viscosidad, relación que liga la densidad con el total de sólidos disueltos, presiones en lugar de niveles piezométricos, etc. El programa está preparado para trabajar con libras y pies, pero es sencillo cambiarlo para trabajar con Kg y m.

5.- Modelos que simulan reacciones de equilibrio químico y cambio iónico

La simulación, simultánea al modelo de flujo y transporte, de las reacciones de equilibrio químico de todos los constituyentes del agua para todas las celdas, no es operativa debido a los altos tiempos de ejecución con los ordenadores actuales.

Generalmente se prefiere simular primero el flujo y transporte y después, por separado, utilizar alguno de los programas de equilibrio químico existentes (EQUIL-T, WATEQ 2, PHREEQE, MINTEQA, EQ3/6, etc) para estudiar los cambios químicos que se producen en el proceso de intrusión.

Existen sin embargo un pequeño número de programas que abordan directamente este problema, aunque de una manera

simplificada.

- **SATRA-CHEM:** Modelo de elementos finitos, versión simplificada del SUTRA. Resuelve las ecuaciones de flujo y transporte además de simular reacciones de equilibrio químico entre fases disueltas y adsorción o cambio iónico con las formaciones acuíferas. El manejo del modelo es tedioso pero sencillo, aunque hay puntos no suficientemente explicados en la documentación. En simulaciones realizadas con un ordenador HP-9000 se encontraron problemas de direccionamiento, que provocaban la caída del sistema.

6.- Conclusiones

Tras hacer un repaso a los modelos más conocidos, se llega a la conclusión de que no existe un modelo completo y adecuado a una gran mayoría de casos. Los modelos que simulan adecuadamente el flujo, permitiendo un acuífero complejo, con ríos y manantiales, etc, no simulan dos fases con diferente densidad, y los que hacen esto simulan tan sólo simplificada el modelo de flujo.

Como modelos de flujo a escala regional los programas TRECOTT, MODFLOW, o incluso alguna versión mejorada del de PRICKETT se consideran adecuados en la mayor parte de casos prácticos, pese a su limitación por no simular la fase salada.

Si el proceso de intrusión es manifiesto puede ser más aconsejable la utilización del programa MERCER, con alguna modificación en su caso para adecuarlo al problema concreto.

Los modelos de transporte de solutos bidimensionales "clásicos" presentan el mismo problema que el TRECOTT y MODFLOW, es decir no simulan la diferente densidad del agua dulce-salada. Por ello no son aplicables en la simulación de la intrusión, salvo en casos particulares y con ciertas reservas. Si son utilizables por el contrario para la simulación de otros contaminantes en acuíferos con intrusión, siempre que se adopten las necesarias medidas correctoras.

Como modelo para simulación del proceso local de intrusión en un perfil vertical, el programa de SANFORD se presenta suficientemente cómodo para el hidrogeólogo, dentro

de la complejidad que este tipo de modelos presentan.

El resto de modelos comentados en esta comunicación son en la humilde opinión de los autores de manejo más complicado, por lo que su empleo queda restringido a casos muy particulares en los que los programas anteriores no son utilizables.

7.-Bibliografía

- Bonnet, Santy (1975). Un modele simplifié pour la simulation des nappes avec intrusion saline. AIHS Symposium-Application of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems, Bratislava, AIHS Publication No.115. 9p.

- Cooley (1977). A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady-state groundwater flow, 1- Theory and numerical properties. Water Resources Research, V. 13, No.2, pp. 318-324.

- Cooley (1979). A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady-state groundwater flow, 2- Application of statistical analysis. Water Resources Research, V. 15, No.3, pp. 603-617.

- Cooley, Naff (1985). Regression Modeling of groundwater flow. USGS OFR 85-180.

- IGME (1985-86). Aplicaciones prácticas de los modelos de calidad de los acuíferos. División de Aguas Subterráneas y Geotecnia del Instituto Geológico y Minero de España.

- Intera Environmental Consultants, Inc. (1979). "Revision of the documentation for a model for calculating effects of liquid waste disposal in deep saline aquifers", USGS-WRIR 79-76, 72p.

- Intercomp Resource Development and Engineering, Inc (1976). A model for calculating effects of liquid waste disposal in deep saline aquifers. USGS-WRI 77-49, 62p.

- Konikow, Bredehoeft (1978). Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. USGS-TWRI, Book 7, Chap. C2, 90p.

- Lewis, Voss, Rubin (1967). Solute transport with equilibrium aqueous complexation and either sorption or ion exchange: simulation methodology and applications. Journal of Hydrology, 90, pp 81-85.

- Mercer, Larson, Faust (1980). Simulation of salt-water interface motion. Groundwater, V. 18 n. 4.

- Pinder, Cooper (1970). A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front. Water Resources Research, V.6, n.3, p. 875-882.

- Prickett, Lonquist (1971). Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois Water Survey Bulletin 55, 62p.

- Trescott (1975). Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground water flow. USGS-OFR 76-438, 32p.

- Trescott, Pinder, Larson (1976). Finite-difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. USGS, TWRI, Book 7, Chap. C1, 116 p.

- Sanford, Konikow (1985). A two-constituent solute-transport model for ground-water having variable density. USGS-WRIR 85-4279.

- Segol, Pinder, Gray (1975). A galerkin finite-element technique for calculating the transient position of the saltwater front. Water Resources Research, V. 11, No. 2, pp. 343-347.

- TWDB (1974). Program Documentation and Users Manual, GWSIM, Groundwater Simulation Program.

- Voss (1984). SUTRA: A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. USGS-WRIR 84-4369, 409 pp.