

# La complejidad de la intrusión marina en los acuíferos costeros en la práctica hidrogeológica

Emilio Custodio<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería del Terreno / Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona, España.

<sup>2</sup> Real Academia de Ciencias.

Mail de contacto: [emilio.custodio@upc.edu](mailto:emilio.custodio@upc.edu)

---

## RESUMEN

La intrusión marina en acuíferos es compleja bajo el punto de vista hidrodinámico e hidrogeoquímico. Con frecuencia conlleva aspectos de evaluación, cálculo, predicción y corrección que son conceptual y cuantitativamente difíciles. Las características locales tienen una influencia dominante. Entraña retos científicos, técnicos y sociales, en especial cuando se afectan a abastecimientos, a usos humanos y a los valores naturales y servicios ecológicos ligados a la presencia de las descargas de aguas continentales. Como ciencia tiene poco más de 100 años y los mayores desarrollos corresponden a las tres últimas décadas. El actual progreso teórico y de herramientas de cálculo es importante, pero no así el de observaciones y obtención de datos con el nivel de detalle y el carácter tridimensional que hace falta para evaluar los procesos que se desarrollan en espacios reducidos, donde las heterogeneidades suelen jugar un papel muy importante. Los aspectos de gestión y sociales son en general los menos desarrollados y experimentados, a pesar de que existen acciones para tratar de controlar técnicamente la intrusión marina. Cada situación requiere un tratamiento específico y diferente.

Palabras clave: intrusión marina, acuífero costero, salinización, hidrogeoquímica, gestión.

---

## ABSTRACT

Complexity of marine intrusion into coastal aquifers in hydrogeological practice. Seawater intrusion into aquifers is a complex matter. Often it involves evaluation, calculation, prediction and correction. From the conceptual and quantitative points of view there are difficult aspects. Local hydrogeological circumstances have a dominant influence. Scientific, technical and social challenges are involved, especially when water supply systems, human uses and the natural values and their ecological services linked to continental groundwater discharges are considered. As a Science it has little more than 100 years and actually most developments have been accomplished in the last three decades. Currently, there is a good development of theoretical and calculation tools, but not in what refers to monitoring and data gathering with the three-dimensional detail needed to evaluate the processes that develop in small spaces, where heterogeneities usually play an important, even dominant, role. Managerial and social aspects are generally the least developed and experience on them is very limited, despite technical actions on seawater intrusion control being available. Each situation has to be considered specifically and differently.

Keywords: Seawater intrusion, coastal aquifer, salinization, hydrogeochemistry, management.

---

## Introducción y conceptos generales

La intrusión marina en acuíferos costeros es un fenómeno complejo, con aspectos de conocimiento, evaluación, cálculo, predicción y corrección que son difíciles conceptual y cuantitativamente. Su problemática afecta al abastecimiento y sanidad de poblaciones costeras y de las pequeñas islas en cuanto a sus actividades económicas, así como a la agricultura y a la propia Naturaleza. Esto es debido a la salinidad que puede tener el agua subterránea o hacia la que puede evolucionar en los diversos escenarios de utilización, y a la

relevancia ecológica de la descarga de agua subterránea en el litoral y su mezcla con las aguas marinas. La intrusión marina es un proceso que empezó a entenderse cuantitativamente en el tránsito del siglo XIX al XX, cuando en el Norte de Alemania y en Holanda se enunció el principio básico de la estratificación por densidad, que es conocido como de Badon Gijben–Herzberg.

En lo que sigue se entiende por intrusión marina la existencia de agua marina actual, pasada o futura, y del agua salobre y salina que se deriva por mezclas de la misma con el agua dulce, independientemente de que se trate de

un proceso de aumento o disminución de la salinidad, o sea de penetración o expulsión del agua marina en el terreno. Sin embargo, en el léxico común se suele llamar intrusión marina a un progresivo aumento de la salinidad que tácitamente se supone causada por agua marina, aunque no siempre es esa la causa.

Al ser el agua dulce y el agua salada miscibles en cualquier proporción, tienden a mezclarse, tanto por difusión–dispersión como por procesos advectivos –en especial en manantiales y captaciones– o por convección cuando agua salina más densa esta por encima de agua dulce menos densa. La presencia de un flujo de agua continental a lo largo de la zona de mezcla hace que se pueda alcanzar un régimen estable, cuyo buen entendimiento y caracterización son básicos para conocer e interpretar los procesos asociados a la intrusión marina.

Desde el punto de vista hidráulico, en el terreno y en los contornos hay continuidad entre los cuerpos de agua dulce y salina, pero se trata de fluidos de densidad no homogénea. Donde la densidad del agua es variable el nivel piezométrico no define el potencial que causa que el agua fluya por el terreno, ya que hay que añadir un término de flotación a causa de la variación de densidad, además de tener en cuenta la pendiente de la base del acuífero. Como es común en medios porosos y microfisurados, el nivel piezométrico referido al agua local mide la energía por unidad de peso. En el caso de fluidos de densidad variable, al calcular el flujo de agua mediante la Ley de Darcy, además de un gradiente de nivel piezométrico aparece un gradiente vertical de la densidad vertical de la densidad (flotación), que afecta a la distribución de potencial y a las líneas de corriente, con notables cambios en la vertical cuando varía la salinidad. El conocimiento en tres dimensiones es un reto para evaluar las situaciones reales.

Además del comportamiento hidráulico referido al contexto hidrogeológico real, hay importantes procesos hidrogeoquímicos en el seno del agua y en la relación roca–agua, que modifican la composición química de la mezcla respecto a lo esperable en un sistema cerrado, así como a la propia agua marina que fluye por el terreno.

A pesar de un gran número de publicaciones que abordan los diferentes aspectos teóricos y aplicados de la intrusión marina son pocos los trabajos que abordan el estado del arte. Históricamente el énfasis ha evolucionado desde los aspectos hidráulicos e hidrogeológicos hacia los hidrogeoquímicos,

más recientemente a los de gestión y aún más recientemente a los que se refieren a la biología y las relaciones con el mar litoral. Se pueden encontrar las referencias básicas en diversas publicaciones, tales como Bear et al. (1999), Custodio y Llamas (1976); Custodio y Bruggeman (1987) y FAO (1997), y en lo referente a pequeñas islas en Falkland y Custodio (1991). Importantes fuentes de información son las sucesivas Salt Water Intrusion Meeting (SWIM) y las varias ediciones de las reuniones sobre Tecnología de la Intrusión Marina en Acuíferos Costeros (TIAC) que promueve el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

Los problemas de intrusión marina son frecuentes en las áreas costeras y están agrandados por la extracción de agua subterránea. Una reciente recopilación general de la situación mundial ha sido publicada por Post y Abarca (2010). Estos problemas son especialmente agudos en áreas costeras con materiales permeables, más aún en carbonatos karstificados, en especial en zonas áridas y semiáridas, como son las circummediterráneas y las islas carbonatadas, coralinas y con materiales volcánicos recientes.

La intrusión marina es un fenómeno a escala de detalle, con cambios rápidos, en tres dimensiones, Está muy afectada por las heterogeneidades y la anisotropía, y tienen gran importancia los flujos preferenciales, los que se magnifican en los procesos que resultan en un desplazamiento neto sostenido del agua. Además, a causa del efecto de la distribución de salinidad que afecta al potencial hidráulico, los cambios en la geometría, como por ejemplo de la superficie de base del acuífero, pueden provocar flujos internos y potenciar caminos preferenciales (Abarca et al., 2007) a causa del efecto de densidad creciente en profundidad. De ahí la dificultad de estudio, ya que se requiere un gran detalle del que normalmente se carece y que no es el habitual en los estudios hidrogeológicos. Por esta razón son raros los casos estudiados con detalle suficiente para una caracterización adecuada, a pesar de su importancia real. Buena parte de los trabajos disponibles no llegan a pormenorizar suficientemente y dejan notables dudas sobre los procesos que controlan el comportamiento. Muchas veces se trata de simples descripciones casuísticas, de escaso valor para definir esos procesos. Esta situación es difícilmente resoluble en la realidad a causa de la escasez de recursos económicos, técnicos y humanos, y del tiempo necesario. Sin embargo con ese conocimiento imperfecto, parcial y a veces

sesgado se han de tomar las decisiones de gestión. De ahí la necesidad de un buen entendimiento de los procesos hidrodinámicos e hidrogeoquímicos básicos que cabe esperar, a partir de una información parcial e imperfecta. Se ha progresado notablemente mediante estudios numéricos de situaciones teóricas o conceptuales, pero son escasas las comprobaciones en casos reales.

Todo lo que sigue considera los efectos de los cambios de densidad por variaciones de la salinidad. Se excluyen los efectos térmicos sobre la densidad ya que no es algo habitual en sistemas acuíferos costeros poco profundos, aunque en algunos casos de potentes sistemas acuíferos carbonatados y volcánicos pueden jugar un papel relevante.

### **Efectos hidrodinámicos transitorios**

Las relaciones agua dulce-agua salada en los acuíferos costeros están muy influenciadas por los cambios en las condiciones que controlan la dinámica del acuífero, tales como las variaciones del nivel del mar y del nivel piezométrico del agua dulce. Esto incluye los cambios cíclicos de alta y de baja frecuencia, los tendenciales y los ocasionales, que se propagan por los diferentes niveles acuíferos en función de la difusividad hidráulica (transmisividad/coeficiente de almacenamiento) y se atenúan con la distancia y todo ello en función de la notable influencia de las heterogeneidades y del intercambio con otros cuerpos de agua subterránea

Los cambios del potencial hidráulico y en el campo de densidades (salinidad) se traducen en desplazamientos relativos de los diferentes cuerpos de agua, que son muy lentos al tratarse de movimientos físicos y que suponen oscilaciones en respuesta a fenómenos cíclicos. Esto aumenta la mezcla entre aguas, tanto más cuanto más heterogéneo sea el medio. En estado estacionario, el flujo en la zona de mezcla entre el agua dulce y el agua salada es aproximadamente paralelo a las isócnas o superficies de igual densidad. Así domina el efecto de la dispersión en sentido perpendicular al flujo, a pesar de que la dispersividad transversal es un orden de magnitud inferior a la longitudinal. Sin embargo, en procesos transitorios con desplazamiento de los frentes según el flujo existe movimiento perpendicular a las isócnas y así la mezcla puede aumentar notablemente.

El efecto del oleaje está limitado al entorno del contacto mar-territorio a lo largo de la línea de costa, sobre todo si ésta es de escasa pendiente. El oleaje produce oscilaciones de

alta frecuencia que se amortiguan rápidamente al alejarse y favorecen una notable circulación de agua local en la zona de mezcla. El efecto es más acusado para la marea marina, que ha sido muy estudiado, tanto hidráulicamente como por sus efectos. Esto puede tener un efecto apreciable en la dispersión de los frentes de salinidad, que es más acusado cuando la carrera horizontal de marea en la línea de costa es grande –costas de muy baja pendiente– donde una ancha franja del acuífero es inundada periódicamente por una lámina de agua salada más densa que la que subyace; se trata de una situación inestable que induce una activa circulación en la zona de mezcla, de modo que en la franja litoral intramareal el flujo de agua marina puede superar localmente al de agua dulce (Robinson y Prommer, 2007; Vanderbohede y Lebbe, 2006) y favorece la dispersión de contaminantes. En régimen estacionario y en costas abruptas el efecto es pequeño.

La existencia de agua salada sobre agua dulce en el acuífero es inestable y da origen digitaciones verticales, de modo que la convección en celdas favorece la mezcla. La situación está tipificada por el sencillo problema de Elder (Kolditz et al., 1998; Hidalgo et al., 2009).

Los cambios del potencial del agua dulce son principalmente debidos a la estacionalidad de la recarga, que se puede convertir en plurianualidad en climas áridos.. Al tener menor frecuencia las oscilaciones se amortiguan menos y pueden producir cambios importantes en la posición relativa de los cuerpos de agua en medios muy difusivos y de baja porosidad, en los que se puede llegar a producir una extensa zona de mezcla.

Los cambios de nivel del mar –y también de la recarga media al acuífero– asociados a las fluctuaciones climáticas, tienen un largo periodo y afectan a todo el acuífero, con largas evoluciones transitorias. Esto hace posible que los acuíferos de gran extensión y espesor contengan una distribución de agua dulce y agua salada que puede que no se corresponda con la que es esperable en equilibrio en las condiciones actuales, además de la presencia de notables zonas de mezcla y grandes variaciones espaciales. De hecho, las partes de baja permeabilidad de muchos acuíferos costeros medianamente extensos aún contienen aguas marinas relictas que corresponden al descenso del nivel de mar de 120 m de la etapa final del Pleistoceno (Edmunds y Milne, 2001; Yechieli et al., 2010), con situaciones inestables

residuales de agua salina sobre agua dulce (Kooi et al., 2001).

Con carácter esporádico local, que se puede repetir irregularmente, está la notable penetración superficial del agua marina en el territorio costero que se puede producir tras grandes maremotos (tsunamis). Los efectos son muy notorios en las costas de baja pendiente y en islas bajas, como las de los atolones. Se ha estudiado para evaluar como se regeneran los acuíferos de agua dulce que han sido alcanzados por el agua marina (Terry y Falkland, 2010; Violette, 2009) y el impacto que tiene la gestión del territorio y la eliminación de barreras naturales como los manglares.

### **Modificaciones hidrogeoquímicas en los acuíferos costeros**

Aunque las posibles situaciones hidrogeoquímicas, incluyendo las isotópicas, pueden llegar a ser sumamente complejas, se tienen comportamientos de carácter general. Así, un aumento progresivo de la salinidad por mezcla de agua dulce y marina se hace con un aumento relativo de los iones alcalinotérreos, en especial del Ca, hasta que el agua se satura en  $\text{CaCO}_3$ , con disminución de los iones alcalinos, en especial del Na y de éste con respecto al K. Lo contrario sucede cuando en el volumen considerado de acuífero la salinidad decrece (Appelo, 1994), aunque en este caso es posible que se produzca una notoria disminución de la permeabilidad por defloculación de partículas de minerales de la arcilla. Salvo en medios de Eh muy negativo donde el  $\text{SO}_4$  disuelto se puede reducir, los iones Cl y  $\text{SO}_4$  son conservativos, pero no lo es el carbono inorgánico disuelto total a causa de la precipitación o disolución de carbonatos, además de los cambios que se producen a consecuencia de los procesos redox. Lo que sucede se puede calcular bien con los códigos hidroquímicos disponibles, como el PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999), así como las posibles disoluciones y precipitaciones, las que pueden afectar a muy largo plazo a la distribución de permeabilidades y por lo tanto a la evolución del sistema de flujo del agua subterránea y a la distribución de la salinidad (Back et al., 1979; Rezaei et al., 2005). Los cambios redox no suelen ser una consecuencia directa de la distribución de salinidad sino del ambiente geoquímico subterráneo en cuanto a presencia de oxidantes y reductores, los que pueden ser modificados a muy largo plazo por sedimentación o erosión costera o cambios del nivel del mar que impida la oxigenación o exponga terrenos reductores a la acción del oxígeno atmosférico.

El estudio de las relaciones iónicas ayuda mucho a la comprensión de los procesos hidrogeoquímicos. Entre ellas la relación molar Cl/Br en el agua marina es muy característica y vale  $654 \pm 5$ , mientras que en las aguas continentales varía normalmente entre 200 y 1000; es utilizable para discriminar el origen de la salinidad (Alcalá y Custodio, 2008). La disolución de halita lleva a valores molares de Cl/Br muy superiores a 1000, hasta de  $10^4$ .

Los isótopos ambientales son buenas herramientas para el análisis de la intrusión marina y sus procesos evolutivos. El  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  (deuterio) puede dar resultados de gran interés, aunque no siempre en acuíferos costeros. Las mezclas de agua dulce y agua marina se sitúan en un gráfico  $\delta^{18}\text{O}-\delta^2\text{H}$  sobre una recta con extremos en el dulce y el agua marina, si son esas las aguas extremas. Sin embargo los extremos que realmente se mezclan puede que no sean aguas actuales. Las representaciones  $\delta^{18}\text{O}-\text{Cl}$  ayudan a dilucidar situaciones ambiguas y a poner en perspectiva como influye la salinidad.

La utilidad del  $^3\text{H}$  (tritio) es actualmente limitada por cuanto los efectos de la gran perturbación atmosférica de origen termonuclear de 1955-1963 está ya en buena parte desaparecida (se está cerca de un nuevo estado estacionario) y además el agua marina actual tiene contenidos pequeños pero apreciables. Eso supone su utilización en este nuevo contexto o tratar de efectuar dataciones mediante la consideración conjunta del contenido en  $^3\text{H}$  y  $^3\text{He}$ , aunque el muestreo y la medición se complican y hay que efectuar correcciones que entrañan cierta dificultad y el establecimiento de un modelo conceptual.

La evolución del  $^{13}\text{C}$  suele ser compleja debido a los procesos de precipitación y disolución de carbonatos asociados a la salinidad. y por eso es un trazador para caracterizar los procesos hidrogeoquímicos que se pueden haber producido. El  $^{14}\text{C}$  permite "datar" el agua en el acuífero, pero debe interpretarse considerando que se está ante una mezcla y no de un agua que corresponde a la recarga en un cierto lugar y tiempo, y que además puede haber sufrido procesos hidrogeoquímicos complejos. Por esa razón su interpretación debe plantearse en términos de tiempo de renovación dentro de un modelo conceptual adecuado y en general con una notable incertidumbre. Los gráficos  $\delta^{13}\text{C}-\text{A}^{14}$  ayudan a la interpretación.

El sulfato marino actual es muy característico en cuanto a  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ,

pero esos valores pueden coincidir con los del agua dulce si el sulfato disuelto procede de una deposición atmosférica dominada por el aerosol marino. Por lo tanto no siempre es una herramienta discriminadora del origen. Puede ser definitiva en el caso de procesos redox.

El agua marina tiene una alta concentración de boro (5,6 mg/L B), con una composición isotópica muy característica y en general muy diferente de las aguas continentales (Vengosh, 1999). Ambos pueden ser de utilidad para determinar el origen de la salinidad después de corregir posibles efectos de fraccionamiento agua-terreno cuando existe una fracción arcillosa significativa.

También es característica la relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en el agua marina, que suele diferir de la de las aguas continentales, la que responde principalmente a la de las rocas que aportan el Sr. Sin embargo, los procesos de reacción roca-agua pueden hacer que se incorporen cantidades significativas de Sr de la roca ambiental que enmascaren la marca marina (Vinson et al., 2011).

### **Cuantificación de la intrusión marina**

El movimiento del agua subterránea en un acuífero costero con salinidad variable viene determinado por la Ley de Darcy generalizada (la que considera la densidad del fluido), que permite plantear la ecuación de la continuidad en función de parámetros del medio y del potencial hidráulico o las presiones del agua (según convenga), que es la del balance de agua en un volumen elemental representativo del medio subterráneo. No hay soluciones analíticas con densidad variable, salvo el caso muy simple llamado problema de Henry (Croucher y O'Sullivan, 1995; Abarca et al., 2002), que se utiliza para probar el buen comportamiento de los códigos de cálculo. Actualmente hay disponibles un buen número de esos códigos, tanto en situación de interfaz brusca entre el agua dulce y el agua salada, como considerando la zona de mezcla en 2 y en 3 dimensiones. Tales son TRANSDENSE (Grupo de Hidrología Subterránea del CSIC-UPC), SEAWAT (que extiende el MODFLOW del USGS) y SUTRA (del USGS), de libre acceso, y el comercial FEEFLOW. Han sido objeto de muy diferentes estudios sobre sus capacidades y limitaciones (Carrera et al., 2010; Konikow et al., 1997).

Es importante expresar correctamente las condiciones de contorno del dominio de flujo del acuífero, en especial las del contorno del acuífero que limita con el cuerpo de agua salada (el mar), ya que si se plantea como de salinidad

fija en el lado marino se pueden cometer errores de balance al tratarse de un contacto de flujo por el que sale agua ambiental del acuífero y entra agua marina.

Los modelos de flujo con fluido de densidad variable pueden completarse teniendo en cuenta el transporte reactivo de soluto a través de reacciones químicas e isotópicas en el seno del agua y entre el agua y la roca. Estos modelos ya están disponibles para los iones principales, pero aún no son herramientas para su uso habitual.

Sin embargo, la cuantificación del comportamiento del agua en los acuíferos costeros mediante modelación numérica no está limitada por la disponibilidad de códigos de cálculo adecuados, sino por la capacidad para formular correctamente el modelo conceptual del funcionamiento del acuífero y para parametrizar el medio al detalle requerido, y en la disponibilidad de datos del potencial hidráulico y la salinidad en profundidad. Con frecuencia se dispone de valores que resultan de una mezcla o intercambio entre varias profundidades, que pueden llevar a resultados sesgados y aún erróneos. Rara vez se dispone de una caracterización hidrogeológica vertical de detalle que permita definir los parámetros hidráulicos, o al menos la estratificación, que es necesaria para explicar las características de la zona de mezcla y del flujo y transporte de salinidad.

### **Condicionantes hidrogeológicos de la intrusión marina**

La situación y cambios en la intrusión marina dependen en gran manera de la geología, que condiciona la distribución de las características hidrogeológicas. Dado que la intrusión marina se desarrolla en una parte del acuífero que frecuentemente es pequeña y localizada, este conocimiento geológico-hidrogeológico requiere mucho mayor detalle que el que es común en los estudios de acuíferos, además de conocer la historia y evolución hidrogeológica en cuanto a la existencia de formaciones depositadas en ambiente marino y que pueden contener aguas marinas antiguas o sus evoluciones.

La salinidad heredada es un fenómeno frecuente, en especial en formaciones profundas y medios de baja permeabilidad, que si bien afectan moderadamente al flujo de agua dulce en condiciones naturales, pueden tener un gran efecto al ser movilizadas cuando se modifican artificialmente los gradientes hidráulicos, por las captaciones de agua subterránea y por las perforaciones, por su

explotación o por establecer cortocircuitos entre formaciones antes aisladas por acuitados. Es un problema general en muchas áreas.

Se requiere interpretaciones que extraigan todo el potencial posible de la geología, de los datos de perforaciones y de la geofísica. A ello ayuda mucho la geología de secuencias en el caso de formaciones sedimentarias, en especial en deltas y en islas con carbonatos recientes. El delta del Llobregat (Barcelona, España) es un ejemplo de estudio de detalle donde las heterogeneidades en los depósitos que forman el acuitado intermedio juegan un papel importante en la existencia de agua marina residual en los depósitos finos prodeltaicos en fase de estuario y en la penetración preferente del agua marina por los paleocauces Pleistocenos que heterogeneizan el acuífero cautivo principal. El conjunto condiciona la penetración preferencial del agua marina, las comunicaciones verticales entre acuíferos y la efectividad de las obras de control.

En las islas pequeñas, para entender la existencia del agua salada es esencial conocer la disposición de los materiales a partir de su génesis, como el distinto grado de consolidación y disolución de los depósitos de calcarenitas. Las calcarenitas antiguas costeras están karstificadas mientras que las recientes lo están poco, creando una heterogeneidad que afecta notablemente a la existencia y uso del agua subterránea en pequeñas islas. En las islas volcánicas la existencia de depósitos volcánicos jóvenes subaéreos (coladas, piroclastos, volcanoclastos, ignimbritas), en parte acumulados cuando el nivel del mar estaba deprimido o tras movimientos verticales insulares, puede suponer una gran permeabilidad en un espesor grande a lo largo de la franja costera, con gran penetración del agua marina (Herrera y Custodio, 2005).

### **Problemas específicos del karst costero**

Las formaciones carbonatadas costeras, en especial las calizas, pueden presentar situaciones especiales debido a la existencia de conductos kársticos litorales o por debajo del nivel mar. Muchos de ellos son rasgos remanentes no colmatados de origen subaéreo en momentos en que el nivel del mar era inferior al actual. El descenso medio del nivel del mar en el Pleistoceno fue de alrededor de 120 m. Algunas situaciones bien conocidas son las de Yucatán y La Florida, pequeñas islas de carbonatos y muy diversas áreas del Mediterráneo occidental (Fleury et al., 2007) y oriental (Bayarí, 2011). En el Mediterráneo se produjo un gran descenso del nivel del mar por

desección durante el Mioceno (crisis messiniense), que favoreció el desarrollo de karsts profundos, aunque en buena parte pueden haber quedado obliterados por rellenos tras la transgresión flandriense (Audra et al., 2005) y la evolución posterior.

Estas situaciones dan lugar a que la descarga de los acuíferos continentales e insulares se concentre en puntos concretos de la costa, a veces con caudales de base de hasta varios  $m^3/s$  y posibles grandes puntas de caudal. En general se descargan aguas salobres, muy variables espacial y temporalmente. Los diferentes intentos de captación de agua dulce, algunos antiguos, como en La Falconera (Barcelona), y algunos sofisticados y con notable inversión económica, como los realizados en Port Miou, Cassis (Francia), no han logrado su propósito. Sólo hay pequeñas realizaciones anecdóticas de captación en el fondo marino, como en el Golfo de Taranto, en el Sur de Italia.

Hay manantiales costeros bien conocidos en diversos lugares del Mediterráneo, que manan agua entre salobre y salina a cota superior a la del nivel medio del mar, como S'Almadrava, en el NE de Mallorca. De hecho Aristóteles conoció uno de ellos, el Argostitilion, en la isla de Cefalonia, en el mar Jonio, lo que le llevó a conjeturar erróneamente sobre el ciclo hidrológico, introduciendo conceptos desviados sobre el mismo que han perdurado hasta épocas recientes. El funcionamiento se puede explicar por efectos de densidad en sistemas kársticos profundos que reciben recarga por la precipitación y por los que puede penetrar el agua marina; el motor de flujo es la disminución de densidad por mezcla o menos frecuentemente por calentamiento en áreas profundas o de elevado gradiente geotérmico asociadas a volcanismo reciente.

### **Efectos de la explotación**

La explotación de los acuíferos costeros es para obtener agua dulce para usos humanos, pero también es a causa de drenajes de edificios, excavaciones o túneles, y menos comúnmente para captar agua salada o salobre para ser desalinizada, algo cada vez más frecuente en diversos lugares, como el Levante español y Canarias. Cualquier extracción de agua altera la distribución de potenciales y de salinidad, así como sus relaciones con el mar y con otros cuerpos de agua terrestre o con humedales.

La extracción de agua dulce o poco salina del acuífero produce una disminución de la descarga de agua dulce al mar y un avance del

agua salada y de la zona de mezcla por el terreno. Las respuestas son lentas y diferidas, y que además pueden pasar desapercibidas mucho tiempo cuando los efectos se producen en lugares en los que no hay observaciones. En el caso de acuíferos que se extienden más allá de la costa esta penetración se produce inicialmente mar adentro, con lo que el avance no es observable durante un largo tiempo.

La penetración lateral del agua marina progresa lentamente, con mayor avance en profundidad y con un engrosamiento de la zona de mezcla. El avance se produce preferentemente por formaciones y rasgos de mayor permeabilidad, lo que hace que las situaciones dinámicas sean diferentes de las estacionarias.

Sin embargo hay fenómenos de salinización que pueden ser rápidos cuando la captación que extrae el agua dulce está en un lugar en cuya vertical existe agua salada profunda, bien sea por que ya estaba o porque es el resultado de un avance lateral de la cuña salina. Se trata de la formación de conos ascensionales de agua salada bajo captaciones puntuales (pozos) o de crestas ascensionales en el caso de galerías o drenes horizontales de captación de agua dulce.

En estos casos, el descenso del potencial hidráulico que produce la extracción de agua dulce hace que el agua salada que está debajo del extremo de la captación pueda ascender al haberse creado un gradiente hidráulico vertical ascendente. Como dicho gradiente hidráulico vertical inicial decrece al ir aumentando la columna de agua salada, dicho ascenso puede quedar limitado mientras no se alcance un determinado valor crítico. Esto queda bien delimitado en el caso de dos cuerpos separados de agua dulce y agua salada. Pero como la densidad del agua mezcla es menor, ésta puede ascender más, hasta alcanzar a la captación.

En la zona de mezcla que se sitúa sobre la cuña de agua marina de penetración lateral, el flujo en la zona de mezcla es aproximadamente paralelo a las isoconas, con espesor limitado a causa de la descarga de agua mezcla en el mar. Pero en el caso de los conos ascensionales bajo las extracciones, cuando se ha formado un cono o cresta con pendiente contraria al flujo hacia la costa, la única salida de esa agua mezcla es por la propia captación. Esto hace inevitable que se alcance cierto grado de salinización. Éste es un problema difícil de calcular con precisión. Para el caso de interfaz brusca hay sólo formulaciones aproximadas (véase Custodio y Llamas, 1976; Custodio y Bruggeman, 1987) que resultan groseras

cuando el ascenso se aproxima al valor crítico, que es aquel en que el ascenso deja de ser estable y limitado para pasar a un movimiento vertical rápido. El tratamiento numérico es difícil, pero hay nuevos resultados respecto a los clásicos (Bower et al., 1999; Paster y Dagan, 2008). Actualmente se están abordando simulaciones en modelos físicos de arena para ayudar a la simulación numérica.

### **Orígenes de la salinidad**

No toda la salinidad que se encuentra en las aguas de los acuíferos costeros es de origen marino reciente, natural o inducida por las extracciones, ni son aguas marinas antiguas. Otras posibles causas pueden ser:

- a) gran concentración por evaporación de la deposición salina atmosférica a causa de aridez climática, favorecido por el aerosol marino en las cercanías de la costa
- b) evaporación de aguas continentales en situaciones áridas, incluso hasta formar salmueras muy densas, que pueden infiltrarse en el terreno, penetrar profundamente y extenderse a lo largo de la base del acuífero
- c) efecto del rociado marino en franjas costeras con vientos fuertes de procedencia marina.
- d) disolución de sales evaporitas contenidas en los sedimentos, como en el caso de antiguas lagunas o marismas desecadas
- e) efecto de contaminación urbana o industrial, o de fugas en el transporte por tubería de aguas salobres o saladas, o a causa de su uso, o por infiltración de salmueras residuales de plantas de desalinización

Para una correcta gestión de la salinidad del área costera es necesario conocer su origen. No es raro encontrar normas y restricciones que no responden a la realidad de lo que sucede en el acuífero. Esto puede suponer perjuicios a los usuarios y pérdidas de oportunidades (Herrera y Custodio, 2002). La adecuada caracterización requiere realizar estudios hidrodinámicos, hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales.

### **Papel del agua subterránea dulce en un área costera**

La muy repetida "pérdida de agua dulce al mar" para calificar a la descarga continental en la costa es el resultado de una visión parcial y sesgada por utilitarismo. La descarga de agua subterránea dulce al mar, que puede ser notable (Burnett et al., 2001), tiene un papel importante en la Naturaleza (Moore, 2010; Slomp y Van Cappellen, 2004) en cuanto al mantenimiento de ecosistemas y de sus servicios a la sociedad. Los humedales pueden tener una alta productividad biológica. Por otro

lado, los cambios de la salinidad en estuarios y aguas litorales y en descargas concentradas en la costa y fondo marino pueden ser la razón de la existencia de vegetación y fauna en ocasiones de alto valor ecológico y económico.

La descarga de agua dulce puede suponer aportes de nutrientes, principalmente nitrato y fósforo, en los que las aguas marinas pueden a veces ser deficitarios (Price et al., 2006; Santoro, 2010). Cabe también que sean excesivos, como en el caso de acuíferos con notable contaminación de origen agrícola o urbano, en cuyo caso se produce un efecto negativo. El comportamiento del nitrato es razonablemente bien conocido, pero no sucede lo mismo con el fosfato, en especial por los fenómenos de sorción asociados a los cambios de salinidad en el terreno, aunque en formaciones carbonatadas el P de contaminación agrícola suele ser escaso en las aguas subterráneas al quedar absorbido o co-precipitado.

### **Gestión de los acuíferos costeros**

La gestión los acuíferos costeros busca su uso sustentable como una fuente de agua dulce para las necesidades humanas, tratando de mantener los servicios ecológicos asociados. Recientemente también se considera el suministro sustentable de agua salada para abastecer plantas de desalinización o piscifactorías, de forma compatible con los otros usos. Se trata de que a largo plazo los beneficios económicos y sociales superen a los costes asociados y ambientales. Sin embargo se puede estar lejos de este ideal por falta de conocimiento, visión sectorial o intereses a corto plazo que depredan el patrimonio. Lo dicho es válido para cualquier sistema natural y para cualquier acuífero o sistema acuífero cuando se les considera una parte integrada en un sistema mayor. Pero en los acuíferos costeros aparece el elemento adicional de la salinidad, que requiere un tratamiento diferenciado, en especial por los habituales largos estados transitorios y poca reversibilidad de las salinizaciones. Además, las perforaciones pueden perturbar la separación entre niveles permeables, facilitando así salinizaciones verticales, que de otro modo no se hubieran producido o lo habrían hecho de forma más atenuada o diferida.

La gestión de los acuíferos costeros tiene aspectos técnicos y aspectos sociales, aunque ambos están ligados. Los primeros son los más fácilmente abordables, pero los segundos pueden llegar a ser muy complejos y pueden

constituir un reto a la gobernanza del acuífero como parte del conjunto de recursos de agua.

### **Aspectos técnicos del control de la intrusión marina**

El control de la intrusión marina requiere mantener la estratificación natural del terreno allí donde es esencial, y restituirla allí donde se ha deteriorado por perforaciones inadecuadas o mal mantenidas. No es sencillo y puede ser costoso.

Los diferentes métodos de control de la intrusión marina ya fueron definidos en la década de 1960 en el área de Los Ángeles (California). En California se han realizado las actividades más importantes y que reúnen la mayor experiencia a nivel mundial. Van desde la reducción y reubicación de extracciones, tanto en cuanto al lugar como al acuífero explotado, hasta las de modificación del funcionamiento hidrodinámico, como la operación de barreras de inyección de agua dulce (del lugar, importada o residual tratada) a las profundidades apropiadas, o las de extracción de agua salada para reducir su potencial hídrico. Otro ejemplo es las dunas de Haarlem, cerca de Amsterdam, con canales desde la década de 1960 y actualmente con ensayos con pozos para aguas tratadas. En España se tiene experiencia del acuífero profundo del Delta del Llobregat (Niñerola et al., 2009), en operación entre 2007 y 2011.

En las barreras de inyección hay que solventar los problemas de mantenimiento de los pozos o de los canales y de evacuación de aguas y residuos. Se requiere un buen planteamiento y diseño que considere la tridimensionalidad del sistema de flujo, el efecto de posibles masas de agua salina atrapadas tierra adentro de las mismas y su eficiencia en producir los efectos deseados; eso supone recuperar al máximo parte del agua inyectada o no consumir agua dulce al mezclarla con el agua bombeada.

En ocasiones se ha propuesto y considerado la construcción de barreras físicas, pero no se conoce ninguna realización significativa. Es debido a su alto coste, eficacia no garantizada y dificultad técnica, y por requerir además una gestión del acuífero para mantener una descarga al mar con el fin de evacuar el exceso de salinidad, en especial en áreas en regadío que reciben retornos de riego salinos y para que no se produzcan descensos excesivos de nivel, con el correspondiente incremento del coste de extracción del agua y la disminución de las reservas en el acuífero, las que luego pueden ser necesarias para atender a

situaciones de sequía o de emergencia (Rotzoll et al., 2013).

### **Aspectos sociales y organizativos**

Cuando un acuífero costero tiene un único usuario o los diferentes usuarios están consorciados, es posible realizar una gestión que optimice la cantidad y la calidad del agua en un determinado marco de gestión, con las limitaciones que se derivan de las características hidrogeológicas del medio y su heterogeneidad, del acceso territorial y de que se utilicen las instalaciones e inversiones ya realizadas y no amortizadas. Se pueden plantear métodos de optimización apoyados en modelos de simulación, cuya utilidad depende de la buena selección y representación de las variables a optimizar y de los criterios de optimización. Hay algunos ejemplos teóricos (Cheng et al., 2000; Abarca et al., 2006), que en cierto modo puede ser útiles para definir planes de explotación del acuífero por la autoridad del agua y por los propios usuarios, pero que en general no captan la complejidad socio-económica y administrativa.

Cuando hay numerosos explotadores independientes, con derechos adquiridos y con intereses particulares, sean éstos públicos o privados, la situación se complica mucho y los problemas pueden resultar de muy difícil solución. El intento individualista de optimizar caudales y costes y de reducir riesgos de salinización, en general a corto plazo, hace que el problema no sea soluble si no es por imposición de reglas desde una autoridad superior. Pero se requiere capacidad para actuar, medios económicos y legales para hacerlo y aceptación pública. Esto es muy difícil en general. Los intentos poco fundamentados pueden conducir fácilmente a fracasos y a grandes dispendios inútiles. En general no hay una solución óptima sino un conjunto de ellas, en función de variables no siempre cuantificables y a veces con una fuerte componente político-administrativa.

Para tratar de encontrar una vía de solución, en general en el mundo real hace falta que se llegue previamente a cierto grado de degradación –aunque parezca una afirmación cínica–, que los usuarios sean conscientes, conozcan la realidad y de que las cosas pueden empeorar –aumentar la salinización– de no tomarse acciones para proteger un bien que comparten, y que con esas acciones todos se van a beneficiar. En general es difícil y muy lento llegar al estado necesario de conciencia común si no se acelera y apoya con estudios, datos y divulgación. En este aspecto la

administración pública del agua y la sociedad civil tienen un papel importante, pero el conjunto de todos los usuarios ha de tomar parte activa, corresponsabilizarse y participar en los costes que se deriven. No sólo hace falta voluntad sino normas, una autoridad de gestión, la integración de todos los afectados y beneficiados, además de los medios que corrijan desviaciones abusivas o por incumplimiento, así como las que se derivan de una visión localista, sectorial y a corto plazo. El lo que se llama actualmente gobernanza.

Una aproximación es la creación de comunidades o asociaciones de usuarios para actuar, co-responsabilizarse y cooperar, además de crear una representación adecuada ante los órganos de gobernanza. Estas asociaciones tienen como función importante la creación de normas de explotación y comportamiento interno, en beneficio del conjunto. Se tiene la situación bien experimentada del entorno de Los Angeles, California. Otro ejemplo con casi 30 años de experiencia es la del Baix Llobregat, Barcelona (Niñerola et al., 2009)

Una acertada gestión de un acuífero costero requiere conocimiento, actuaciones y recursos económicos, que deberían pagar los beneficiarios. Para ello hay que superar, a nivel general y de los gestores en particular, el efecto de concepciones erróneas y desviadas, y de mitos (Custodio, 2005), que a veces están muy arraigados, y tomar conciencia clara de que los acuíferos costeros son importantes infraestructuras hidráulicas naturales con un alto valor real, que forman parte del patrimonio social y nacional (Custodio, 2002).

### **Efectos del cambio climático**

El efecto del cambio climático en la intrusión marina en los acuíferos costeros puede ser debido a los cambios de la recarga y a los cambios en el nivel del mar.

Los cambios en la recarga son debidos tanto a los posibles cambios en la precipitación y en la evapotranspiración, la cual es función de la temperatura, de la humedad del suelo y de la vegetación. Cabe hacer las mismas consideraciones que con la recarga sobre cualquier otra parte del territorio en cuanto al planteamiento y evaluación de la incertidumbre asociada. Ese cambio se traduce en una variación de la descarga de agua dulce al mar y por tanto de la posición de la interfaz y de la zona de mezcla. Hay pocos estudios que traten con detalle estos efectos. En general se analiza como pueden afectar diferentes escenarios de descarga de agua subterránea al mar.

Más atención han recibido los efectos debidos a los cambios del nivel del mar. Es generalmente admitido –aunque hay discrepancias– que el progresivo aumento de la temperatura por efecto antrópico produce y seguirá produciendo una ablación progresiva de la acumulación de hielo continental y una expansión térmica del agua marina al calentarse, lo que se traduce en un aumento del nivel del mar. Las predicciones son variables. Pudiera esperarse una elevación de  $1\pm 0,5$  m a finales del siglo XXI, lo que no es muy distinto de lo que ha sucedido en los últimos 2000 años (Gerhrels et al., 2011). El efecto de ascenso sin gran modificación de la posición de la costa, como es el caso de litorales con notable pendiente, tiene un efecto moderado en la intrusión marina pues también se modifica el nivel del agua subterránea del acuífero. No sucede lo mismo en el caso de perfiles litorales muy tendidos, como en los Países Bajos, parte del Este de los Estados Unidos, Golfo de Bengala, deltas de grandes ríos como el Nilo, el Po, el Mississippi, donde la elevación del nivel del mar supone un notable avance tierra adentro de la línea de costa, y por lo tanto de la interfaz entre el agua dulce y el agua salada. Esto ha sido objeto de modelaciones, como en el caso de Holanda (Oude Essink et al., 2010) y de los Estados Unidos (Webb y Howard, 2011), donde además se han analizado las posibles acciones de defensa. El caso de Holanda es singular por estar actualmente buena parte del territorio bajo el nivel del mar, protegido por diques y manteniendo bajos los niveles del agua mediante descargas preferentes en marea baja y por bombeo. En el caso de Bangladesh, en el Golfo de Bengala, una parte importante del territorio podría quedar cubierta por el mar.

En áreas costeras formadas por sedimentos jóvenes, además de los efectos mencionados se tiene el de la progresiva compactación de los materiales, lo que hace retrogradar la línea de costa aún en ausencia de elevación del nivel del mar. El efecto de subsidencia se refuerza por la actividad antrópica de urbanización (sobrecarga sobre el territorio), de drenaje superficial para ocupar territorios encharcados, y por extracción de turba, y en especial por la explotación de aguas subterráneas de acuíferos profundos. El efecto del ascenso del nivel del mar puede quedar parcialmente contrarrestado por la acumulación de arenas en cordones de dunas litorales, en los que se forman notables cuerpos de agua dulce, pero éstos pueden a su vez migrar. Todos estos efectos se conjuntan en grandes áreas urbanas costeras como Amsterdam, Bangkok y Tokio. Venecia ha

merecido una especial atención por su alto valor patrimonial universal.

El ascenso del nivel del mar puede ser trágico en pequeñas islas de escasa elevación, como las asociadas a bancos arenosos, algunas densamente pobladas, o de los arrecifes coralinos, tanto por la reducción territorial como de las reservas de agua del lentejón de agua dulce.

## Conclusión

El conocimiento, evaluación y gestión de un acuífero o de un sistema acuífero costero en muchas ocasiones es un reto debido a que se requiere a un nivel de conocimiento y observación pormenorizado del que se suele carecer, y que es costoso y lento adquirir. Por eso hace falta comprender bien los mecanismos y procesos, y complementar los métodos de estudio geológico, sedimentológico, hidrogeológico e hidrodinámico con los hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales. La gestión del acuífero costero se puede hacer a escala general y dejar una notable descarga de agua continental al mar como seguridad contra procesos no deseables de salinización. En casos de gran valor del agua, una intensificación de la explotación puede entrañar riesgos a medio plazo cuya gestión y métodos de control necesitan llegar al detalle. Los procesos de formación de conos salinos ascensionales bajo las captaciones pueden tener gran relevancia y pueden ser debidos a aguas salinas preexistentes. En todo el planteamiento de gestión debe tenerse presente los valores ambientales asociados a los servicios de la Naturaleza, que incluyen los humedales costeros y las aguas litorales. La gobernanza de los acuíferos costeros es especialmente difícil y requiere una participación activa de los usuarios a través de asociaciones, y en todo caso ha de hacerse en el marco del conjunto de recursos hídricos.

## Agradecimientos

Se agradece a los organizadores del VI Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales el la Hidrología Subterránea la invitación para preparar este trabajo, que en buena parte se basa en Custodio (2012). El trabajo preparatorio se ha realizado dentro de las actividades del proyecto CGL2009-12910-C03-01, financiado por el Gobierno español.

## Referencias

Abarca, E., Carrera, J., Sánchez-Vila, X. y Voss, C.I. 2007. Quasi-horizontal circulation

- cells in 3D seawater intrusion, *J. Hydrol.*, 339: 118–129.
- Abarca, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, B. y Batlle F. 2006. Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resour. Res.*, 42: W09415.
- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2008. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *J. Hydrol.*, 359: 189–207.
- Appelo, C.A.J. 1994. Cation and proton exchange, pH variations, and carbonate reactions in a freshening aquifer. *Water Resour. Res.*, 30: 2793–2805.
- Audra, P., Bigot, J.-Y., Camus, H., Clauzon, G., Gilli, E. y Mocochain, L. 2005. The effect of the Messinian Deep Stage on karst development around the French Mediterranean Sea. *Geodinamica Acta*, 17(66): 389–400.
- Back, W., Hanshaw, B.B., Pyle, T.E., Plummer, L.N. y Weidie, A.E. 1979. Geochemical significance of groundwater discharge and carbonate solution to the formation of Caleta Xel Ha, Quintana Roo, Mexico. *Water Resour. Res.*, 15(6): 1521–1535.
- Bayari, C.S., Ozyurt, N.N., Oztan, m., Bastanlar, Y., Varinlioglu, G., Koyoncu, H., Ulkendi, H. y Hamarat, S. 2011. Submarine and coastal karstic groundwater discharges along the southwestern Mediterranean coast of Turkey. *Hydrogeol. J.*, 19: 399–414.
- Bear, J., Cheng, A.H.D., Sorek, S., Ouazar, D. y Herrera, I. (ed.) 1999. Seawater intrusion in coastal aquifers—concepts, methods, and practices. *Kluwer Academic Publishers*.
- Bower, J.W., Motz, L.H. y Durden, D.W. 1999. Analytical solution for determining the critical condition of saltwater upconing in a leaky artesian aquifer. *J. Hydrol.*, 221: 43–53.
- Burnett, W.C., Tanaguchi, M. y Oberdorfer, J. 2001. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. *J. Sea Res.*, 46(2): 109–116.
- Carrera, J., Hidalgo, J.J., Slooten, L.J. y Vázquez-Suñé, E. 2010. Computational and conceptual issues in the calibration of seawater intrusion models. *Hydrogeol. J.*, 18(1): 131–145.
- Cheng, A.H.D., Halhal, D., Naji, A. y Ouazar, D. 2000. Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers. *Water Resour. Res.*, 36: 2155–2165.
- Croucher, A.E. y O'Sullivan, M.J. 1995. The Henry problem for saltwater intrusion. *Water Resour. Res.*, 31(7): 1809–1814.
- Custodio, E. 2002. Coastal aquifers as important hydrogeological structures. In E. Bocanegra, M. Hernández and E. Usunoff (eds.), *Groundwater and Human Development*. IAH Selected Papers, Taylor & Francis, London: 15–39.
- Custodio, E. 2005. Myths about seawater intrusion in coastal aquifers. *Groundwater and Saline Intrusión*, 18th SWIM, Cartagena 2004.. Hidrogeología y Aguas Subterráneas Series 15. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 599–608.
- Custodio, E. 2012. Panorámica de la intrusión marina en acuíferos costeros: una cuestión multifacética y compleja. En J.A. López-Geta, A. Pulido Bosch, M. Fernández Mejuto, G. Ramos González y L. Rodríguez Hernández (eds.). *Nuevas Contribuciones al Conocimiento de los Acuíferos Costeros*. TIAC–12, 2012. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, Vol. I: 25–48.
- Custodio, E. y Bruggeman, G.A. 1987. *Groundwater problems in coastal areas*. Studies & Reports in Hydrology 45. UNESCO, Paris,:1–576.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1976. *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols: 1–2350. (Sección 13).
- Edmunds, W.M. y Milne, C.J. (eds.) 2001. *Palaeowaters in coastal Europe: evolution of groundwater since the late Pleistocene*. Geological Society, Special Publication 189, London: 1–332.
- Falkland, A. y Custodio, E. (eds) 1991. *Guide on the hydrology of small islands.*, Studies and Reports in Hydrology, 49. UNESCO, Paris: 1–435.
- FAO 1997. *Seawater intrusion in coastal aquifers: guidelines for study, monitoring and control*. FAO Water Reports 11. Food and Agriculture Organization. Roma: 1–163.
- Fleury, P., Michel, B. y de Marsily, G. 2007. Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *J. Hydrol.*, 339: 79–92.
- .Gerhrels, W.R., Horton, B.P., Kemp, A.C. y Sivan, D. 2011. Two millennia of sea level data: the key to predicting change. *EOS*, 92(35): 289–290.
- .Herrera, Ch. y Custodio, E. 2002. Old marine water in Fuerteventura island deep formations. Proc. 17th Salt Water Intrusion Meeting. Delft University of Technology, Fac. Civil Eng. and Geosciences: 481–488.
- Herrera, Ch. y Custodio, E. 2008. Conceptual hydrogeological model of volcanic Easter Island (Chile) after chemical and isotopic surveys. *Hydrogeol. J.*, 16(7): 1329–1348.

- Hidalgo, J.J., Carrera, J. y Medina, A. 2009. Role of salt sources in density-dependent flow. *Water Resour. Res.*, 45, W05503, doi: 10.1029/2008WR007679.
- Kolditz, O., Ratke, R., Diersch, H.-D.G. y Zielki, W. 1998. Coupled groundwater flow and transport: 1. Verification of variable density flow and transport models. *Advances in Water Resour.*, 21(1): 27–46.
- Konikow, L.F., Sanford, W.E. y Campbell, P.J. 1997. Constant concentration boundary conditions: lessons from the HYDROCOIN variable-density groundwater benchmark problem. *Water Resour. Res.*, 33(10): 2253–2261.
- Kooi, H. y Groen, J. 2001. Offshore continuation of coastal groundwater systems: predictions using sharp-interface approximations and variable-density flow modeling. *J. Hydrol.*, 246: 19–35.
- Moore, W.S. 2010. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 2: 59–88.
- Niñerola, J.M., Queralt, E. y Custodio, E. 2009. Llobregat delta aquifer. In, Ph. Quevauviller, A.-M. Fouillac, J. Grath, R. Ward (eds.), *Groundwater Monitoring* John Wiley & Sons: 289–301.
- Oude Essink, G.H.P., van Baaren, E.S. y de Louw, P.G.B. 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resour. Res.*, 46: W00F04.
- Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J. 1999. *User's guide to PHREEQC (Version 2)–A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations*. US Geological Survey Water–Investigations Report 99–4259. 1–326.
- Paster, A. y Dagan., G. 2008. Mixing at the interface between two fluids in aquifer well upconing steady flow. *Water Resour. Res.*, 44: W05408.
- Post, V. y Abarca, E. (eds.) 2010. Saltwater and freshwaters interactions in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 19(1): 1–270.
- Price, R.M., Swart, P.K. y Fourqurean, J.W. 2006. Coastal groundwater discharge–an additional source of phosphorus for the oligotrophic wetlands of the Everglades. *Hydrobiologia*, 569: 23–36.
- Rezaei, M., Sanz, E., Raesi, E., Ayora, E., Vázquez-Suñé, E. y Carrera, J. 2005. Reactive transport modelling of calcite dissolution in the fresh salt water mixing zone. *J. Hydrol.*, 311: 282–298.
- Robinson, C., Li, L. y Prommer, H. 2007. Tide-included recirculation across the aquifer–ocean interface. *Water Resour. Res.*, 43: W07428. DOI: 10.1029/2006WR005679.
- Rotzoll, K., Gingerich, S.B., Jenson, W.J. y El-Kadi, A.I. 2013. Estimating hydraulic properties from tidal attenuation in the Northern Guam Lens Aquifer, territory of Guam, USA. *Hydrogeol. J.*, 21: 643–654.
- Santoro, A.E. 2010. Microbial nitrogen cycling at the saltwater–freshwater interface. *Hydrogeol. J.*, 18: 187–202.
- Slomp, C.P. y Van Cappellen, P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: Controls and potential impact. *J. Hydrol.*, 295(1–4): 64–86.
- Terry, J.P. y Falkland, A.C. 2010. Responses of atoll freshwater lenses to storm-surge overwash in the Northern Cook Islands. *Hydrogeol. J.*, 18: 749–759.
- Vandenboehede, A. y Lebbe, L. 2006. Effects of tides on a sloping shore: groundwater dynamics and propagation of the tidal wave. *Hydrogeol. J.*, 15(4): 645–658.
- Vengosh, A., Spivack, A.J., Artzi, Y. y Ayalon, A. 1999. Geochemical and boron, strontium, and oxygen isotopic constraints on the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean Coast of Israel. *Water Resour. Res.*, 35(6): 1877–1894.
- Vinson, D.S., Schwartz, H.G., Dwyer, G.S. y Vengosh, A. 2011. Evaluating salinity sources of groundwater and implications for sustainable reverse osmosis desalination in coastal North Carolina, USA. *Hydrogeol. J.*, 9: 981–994.
- Violette, S., Boulicot, G. y Gorelick, S.M. 2009. Tsunami-induced groundwater salinization in southeastern India. *CR Geosci.*, 341: 339–346.
- Watson, T.A., Werner, A.D. y Simmons, C.T. 2010. Transience of seawater intrusion in response to sea level rise. *Water Resour. Res.*, 46, W42533, doi: 10.1029/2010WR009564.
- Webb, M.D., y Howard, W.F. 2011. Modeling the transient response of saline intrusion to rising sea-levels. *Ground Water*, 49(4): 560–569.
- Yechieli, Y., Shalev, E., Wellman, S., Kiro, Y. y Kafri, U. 2010. Response of the Mediterranean Sea coastal aquifers to sea level variation. *Water Resour. Res.*, 46, W12550, doi: 10.1029/2009WR008708.