

RESEARCH ARTICLE

## New challenges in the study of coastal aquifers from numerical modeling. The case of the Motril-Salobreña aquifer

### *Nuevos retos en el estudio de los acuíferos costeros desde la modelación numérica. El caso del acuífero Motril-Salobreña*

María Luisa Calvache<sup>1</sup>, Ángela M. Blanco-Coronas<sup>1</sup>, Carlos Duque<sup>2</sup>, Manuel López-Chicano<sup>1</sup>, Juan Pedro Sánchez-Úbeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Avda. Fuentenueva s/n, Granada, calvache@ugr.es, ablanco@ugr.es, mlopezc@ugr.es, juampesu@ugr.es

<sup>2</sup> Department of Geoscience, Aarhus University, Denmark, cduque@geo.au.dk

Corresponding author: calvache@ugr.es (María Luisa Calvache)

#### Key points

A model of Motril-Salobreña aquifer shows how heat transport allow quantifying the recharge from rivers that interact with coastal aquifers

The age transport models provide data on the preferential groundwater circulation paths and its residence time

Effects of sea level rise on marine intrusion and the degree of equilibrium of the freshwater-saltwater contact should be determined

**Keywords:** Age transport modeling; Coastal aquifer; Global change; Heat transport modeling; Saltwater intrusion.

#### Article History:

Received: 02/08/2021

Accepted: 30/08/2021

#### ABSTRACT

Coastal aquifers are frequently complex systems with highly heterogeneous geological characteristics, specific flow patterns, presence of fluids with different densities, high risk of contamination both by salinization and by other pollutants, and highly modified by anthropic activity. Given this situation, numerical modeling becomes the most appropriate tool to determine the potential impact of global change on marine intrusion in this kind of aquifers. The mathematical models traditionally used in coastal aquifers have been those of flow and mass transport with variable density, which allow obtaining a distribution of salinities in the aquifer and reproducing the flow pattern in the area of discharge to the sea. In addition to these models, another type of numerical modeling can be applied that could also provide information on specific aspects of this type of aquifers. The study of the Motril-Salobreña coastal aquifer shows, for example, how heat transport models allow quantifying the recharge that occurs from rivers that frequently interact with coastal aquifers; as well as the age transport models provide data on the preferential groundwater circulation paths and its residence time, very relevant information in these frequently heterogeneous and anisotropic aquifers. Future challenges are directed towards determining the effects of sea level rise on marine intrusion and establishing the degree of equilibrium of the freshwater-saltwater contact with the current situation.

#### Puntos clave

Modelo del acuífero costero Motril-Salobreña muestra cómo un modelo de transporte de calor permite cuantificar la recarga desde ríos

Modelos de transporte y edad proporcionan datos sobre las vías de circulación subterránea preferencial y el tiempo de residencia del agua

Debe estudiarse el efecto del ascenso del nivel del mar sobre intrusión marina y establecer el grado de equilibrio de la cuña salina

**Palabras clave:** Acuífero costero; Cambio global; Intrusión marina; Modelos de transporte de calor; Modelos de transporte de edad.

#### Historial del artículo:

Recibido: 02/08/2021

Aceptado: 30/08/2021

#### RESUMEN

Los acuíferos costeros frecuentemente son sistemas complejos con características geológicas muy heterogéneas, patrones de flujo específicos, presencia de fluidos con distinta densidad, elevado riesgo de contaminación, tanto por salinización como por otros agentes contaminantes, y muy modificados por la actividad antrópica. Ante esta situación, la modelación numérica se convierte en la herramienta más adecuada para determinar el potencial impacto del cambio global sobre la intrusión marina en estos acuíferos. Los modelos matemáticos tradicionalmente utilizados en los acuíferos costeros han sido los de flujo y transporte de masa con densidad variable, que permiten obtener una distribución de salinidades en el acuífero y reproducir el patrón de flujo en la zona de descarga al mar. Además de estos modelos, se puede aplicar otro tipo de modelación numérica que también podría proporcionar información sobre aspectos específicos de este tipo de acuíferos. El estudio del acuífero costero Motril-Salobreña pone de manifiesto, por ejemplo, como los modelos de transporte de calor permiten cuantificar la recarga que se produce a partir de los ríos, que, con frecuencia, interaccionan con los acuíferos costeros. Además, los modelos de transporte para estimar tiempo de residencia y edad proporcionan datos sobre las vías de circulación subterránea preferencial y el tiempo de residencia del agua, información muy relevante en estos acuíferos, frecuentemente heterogéneos y anisótropos. Los retos futuros se encaminan hacia la determinación de los efectos del ascenso del nivel del mar sobre la intrusión marina y el establecimiento del grado de equilibrio de la cuña salina con la situación actual.

## 1. Introducción

Las áreas costeras son sectores de la superficie terrestre donde con frecuencia se producen las mayores demandas de agua. No sólo están densamente pobladas (la mitad de la población y ocho de las diez ciudades más grandes del mundo se localizan en la franja costera), sino que, además, la actividad económica en estas zonas costeras es muy intensa por tratarse de zonas de gran producción agrícola, de concentración de actividad industrial y de creciente ocupación turística. Como consecuencia de esta elevada demanda de agua para cubrir las necesidades de la población y demás actividades, los recursos hídricos en general y los subterráneos en particular experimentan una fuerte presión. Esta presión se agrava en áreas de clima árido y semi-árido donde el agua subterránea es la única fuente de agua dulce en momentos de máxima demanda, los cuales frecuentemente coinciden con el periodo de mínima recarga (Post, 2005; Calvache et al., 2017, 2020).

Los acuíferos costeros presentan características comunes al resto de los acuíferos continentales, si bien cuentan con una circunstancia específica que condiciona su funcionamiento, como es la presencia de dos fluidos, agua dulce y agua salada, con salinidades y densidades diferentes. Esta circunstancia condicionará el flujo subterráneo que seguirá un gradiente de densidad, resultando en una distribución de salinidades que dependerá de la mezcla que se produzca entre los dos tipos de agua, dulce y salada. Desde el punto de vista de la gestión hídrica, los acuíferos costeros son vulnerables a la salinización por intrusión marina.

El interés por el estudio de los acuíferos costeros no es una cuestión nueva. Desde finales del siglo XIX se buscaban reservas de agua dulce que permitieran abastecer de agua potable a las grandes ciudades localizadas en los sectores costeros, comprobándose que el bombeo de agua en los acuíferos costeros podía ocasionar el desarrollo de intrusión marina (Houben and Post, 2017). Más de un siglo después, la intrusión marina continúa siendo una amenaza y es una de las principales causas a nivel planetario de contaminación del agua subterránea.

Desafortunadamente, se espera que el problema que supone la intrusión marina para los acuíferos costeros se agrave en las próximas décadas ya que, a las consecuencias derivadas del

fenómeno de cambio climático se les sumará una previsión de incremento de la población (GRID-Arendal and UNEP, 2016) y de crecimiento económico, una disminución de la calidad del agua por contaminación, una reducción de la capacidad de infiltración como resultado de la urbanización y un descenso del caudal de los ríos (Post, 2005). Sin duda, una de las regiones del planeta más vulnerables al aumento del riesgo de intrusión es la franja costera mediterráneo-occidental (Calvache et al., 2017, 2020).

Al igual que el movimiento del agua marina hacia el continente contamina los acuíferos, la descarga de agua dulce nutrida de contaminantes también afecta a los ecosistemas costeros, como se pone de manifiesto, por ejemplo, en las Marismas del Guadalquivir (Tovar-Sánchez et al., 2006; Olías et al., 2008). Los ecosistemas costeros son sistemas muy frágiles que se están viendo severamente alterados por la acción humana (eliminación de vegetación, agricultura, desecado y relleno de zonas pantanosas, construcción de presas y aceleración de la erosión). El ascenso del nivel del mar añade presión a estos sistemas inundando y aumentando la salinidad. Esta degradación es particularmente preocupante por cuanto que los ecosistemas costeros mantienen una enorme variedad de formas de vida (Michael et al., 2017).

### 1.1. Modelación numérica de acuíferos costeros. Evolución histórica

Se podría decir que el conocimiento de la hidrogeología costera arranca con la publicación de los trabajos de Ghyben (1888) y Herzberg (1901) que proponen los primeros modelos analíticos para localizar la cuña salada. Desde ese momento se realizaron numerosos trabajos de campo, que, junto con la aplicación de las bases teóricas, permitieron desarrollar los conceptos básicos sobre el patrón del flujo subterráneo y la distribución de salinidades en los acuíferos costeros. Así, por ejemplo, Versluys (1916) puso de manifiesto la importancia del intercambio catiónico en la zona de mezcla en los procesos de intrusión-lavado. Otro trabajo que se podría mencionar por su gran repercusión es la propuesta de Glover (1959) para el patrón de flujo subterráneo en la zona de descarga de agua dulce en los acuíferos costeros.

En la década de los 70 del pasado siglo comienzan a desarrollarse los modelos numéricos, lo que permite alcanzar una representación más

realista de los acuíferos. A medida que ha progresado la capacidad computacional, los modelos matemáticos se han ido haciendo más completos y versátiles pudiendo reflejar de una forma más próxima a la realidad las propiedades de los acuíferos. De esta forma, se han podido contemplar las heterogeneidades y anisotropías, así como el flujo en las 3D y el flujo en régimen transitorio, con la consideración del tiempo como una variable más. La modelación numérica de acuíferos costeros implica la resolución de las ecuaciones de flujo y transporte de masa considerando la densidad variable del fluido. En Heredia y Murillo (2007) se puede encontrar una revisión exhaustiva de las técnicas numéricas y aspectos concretos que deben ser considerados por este tipo de modelos. Asimismo, los citados autores llevan a cabo una revisión de los códigos numéricos más destacados. Algunos de los códigos más estables y más utilizados son SUTRA (Voss and Provost, 2010) y FEFLOW (Diersch, 2002) en elementos finitos y SEAWAT (Guo and Langevin, 2002) en diferencias finitas, presentando la aplicación de cada uno de ellos ventajas e inconvenientes (Priyanka and Mohan Kumar, 2017). Por ejemplo, el método de las diferencias finitas es más simple y potente, sin embargo, el método de los elementos finitos es capaz de reproducir con mayor exactitud la geometría del área de estudio. En la literatura se pueden encontrar opiniones de todo tipo en relación a las preferencias por uno u otro método. Por ejemplo, Qahman and Larabi (2006) se decantan por las ventajas de las diferencias finitas, al tiempo que Dausman *et al.* (2010) lo hacen por las de los elementos finitos.

A pesar de que todavía quedan algunas cuestiones sin resolver como son la incorporación de los valores de dispersión y convergencia de la malla en los problemas de convección, actualmente los modelos permiten la óptima simulación del flujo subterráneo y transporte bajo condiciones de densidad variable. El problema real en la modelación numérica no recae tanto en la descripción del proceso, que actualmente está bastante conseguida, sino en la simulación de los casos reales. Se necesitan métodos más versátiles en la introducción tanto de los parámetros del acuífero que permitan resolver la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del acuífero, así como de los caudales de recarga (Post, 2005). En este sentido, cada vez es más utilizada la modelación inversa, que permite la estima-

ción de los parámetros hidrogeológicos del acuífero a partir de valores conocidos de las variables de estado como nivel y concentración (Yeh, 1986; McLaughlin and Townley, 1996). La modelación inversa se puede realizar tanto por métodos determinísticos como geoestadísticos. Pool *et al.* (2015) se decantan por la robustez y fiabilidad de los métodos determinísticos en la estimación de parámetros mediante modelación inversa en casos de intrusión marina. Sin embargo, este tipo de métodos no dan buenas estimaciones de las incertidumbres del método. Priyanka and Mohan Kumar (2017) proponen la utilización de información previa y parametrización en la modelación inversa para conseguir una solución más exacta y reducir las incertidumbres consiguiendo así un mejor conocimiento del flujo con densidad variable y los procesos de transporte miscible. Sea con modelación directa o inversa para conseguir una correcta modelación resulta imprescindible contar con series prolongadas de datos hidrológicos y geoquímicos los cuales resultan difíciles de conseguir en proyectos individuales. Debe ser la Administración la encargada de recopilar y poner al servicio de los investigadores, los datos necesarios que permitirán obtener una modelación numérica de calidad (Michael *et al.*, 2017). Buenos ejemplos de este interesante servicio público los encontramos en el *Groundwater and Streamflow Information Program* y el *National Quality Assessment Program*, ambos del *U.S. Geological Survey*.

Aunque autores como Ferguson and Gleeson (2012) insisten en que los mayores cambios futuros sobre la intrusión marina en acuíferos costeros serán producidos por el incremento en las extracciones de agua subterránea, se puede aventurar que uno de los nuevos retos para la modelación numérica en acuíferos costeros será la afección que el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático tendrá sobre la intrusión marina (Post, 2005; Priyanka and Mohan Kumar, 2017), especialmente en acuíferos costeros de bajo gradiente hidráulico. Otro reto futuro en la modelación numérica será el poder tener en cuenta el grado de equilibrio de la posición actual de la cuña salina con respecto a las condiciones actuales. En muchos casos, la posición de la cuña salada no responde a las circunstancias hidrogeológicas actuales, sino que está todavía buscando el equilibrio ante una situación de cambio anterior. Este hecho deberá ser tenido en cuenta, sobre todo en acuíferos de baja permea-

bilidad, con simulaciones numéricas prolongadas y siempre tomando en consideración la historia geológica reciente del área costera.

### 1.2. Hacia el modelo conceptual de acuífero detrítico costero mediterráneo

Custodio (2010) distingue cuatro tipos de medios en los que se pueden enmarcar la mayor parte de los acuíferos costeros: deltas recientes, otras formaciones detríticas costeras, formaciones carbonatadas e islas pequeñas. Así, un caso bastante frecuente dentro de los acuíferos costeros y, muy particularmente en costas mediterráneas, es el de un delta constituido por los aportes detríticos de un río actual en su desembocadura. En este tipo de acuíferos se dan una serie de circunstancias comunes que condicionan su hidrogeología y que permitirán que su estudio se pueda abordar de manera bastante similar, independientemente de la ubicación geográfica o de los objetivos que se quieran alcanzar.

Son rasgos muy distintivos de estos acuíferos deltaicos la heterogeneidad y la anisotropía de la formación detrítica. Normalmente se trata de depósitos de materiales con porosidades muy diferentes que van desde las gravas limpias que se sedimentan en el fondo de los canales distributarios del delta hasta las arcillas y limos que se depositan en la llanura de inundación y en las bahías inter-distributario. Que abunden más sedimentos groseros o finos dependerá fundamentalmente de la energía del medio y de la mayor o menor proximidad a relieves importantes que constituyen el área fuente del sedimento. Esta elevada heterogeneidad de tamaños y su depósito en capas más o menos continuas condicionan que el flujo subterráneo sea dominante en determinadas direcciones del espacio (normalmente suele haber un predominio del flujo horizontal frente al vertical) y que la anisotropía sea un factor a tener en cuenta.

Otra característica siempre presente es la presencia de un río en relación directa con el acuífero. El río en ambientes peri-mediterráneos suele tener un carácter perdedor en la mayor parte de su recorrido por la superficie del acuífero detrítico, exceptuando el último tramo antes de desembocar al mar donde se hace ganador. Normalmente, estos ríos constituyen una fuente de recarga del acuífero.

Los deltas son zonas de topografía plana que propician el asentamiento de poblaciones e indus-

trias y el desarrollo de agricultura de regadío, a partir de cuyo retorno de riegos se producirá una recarga adicional para el acuífero subyacente.

Por último, hay que considerar también que, como se indicó más arriba, la fuerte presión poblacional sobre la costa, hace que los acuíferos estén sometidos a bombeos intensivos encaminados a cubrir las necesidades hídricas en momentos de escasez de agua superficial y estas extracciones con frecuencia producen situaciones de sobreexplotación estacional que deviene en intrusión marina. También es frecuente la existencia de obras civiles que alteran el funcionamiento natural del acuífero como son puertos y canales (Michael *et al.*, 2017) o la construcción aguas arriba de presas que además de disminuir la recarga natural del acuífero, también afectan a la posición de la línea de costa (Post, 2005).

En definitiva, los costeros son sistemas muy complejos con características geológicas muy heterogéneas, patrones de flujo específicos, presencia de fluidos con distinta densidad, elevado riesgo de contaminación, tanto por salinización como por otros agentes contaminantes y muy modificados por la actividad antrópica.

### 1.3. Objetivos

La modelación numérica constituye una herramienta que ha sido utilizada con frecuencia para abordar el estudio de los acuíferos costeros ya que, además de proporcionar una solución para la posición del contacto agua dulce-agua salada en muchos casos desconocido, también proporciona información sobre la evolución futura del acuífero y de cómo pueden afectar a la intrusión marina las actuaciones que se están desarrollando o puedan ocurrir en el acuífero.

Como ya se ha mencionado en el apartado introductorio, los modelos que se suelen aplicar en el caso de los acuíferos costeros son los de flujo y transporte de masa con densidad variable, ya que son los únicos que pueden reproducir de forma realista el flujo que se produce con la mezcla de agua dulce y del agua salada y pueden proporcionar una distribución de salinidades en el acuífero. Son muchos los ejemplos que hay sobre su aplicación y numerosos los códigos que ofrecen buenas soluciones, aunque los más utilizados son SEAWAT en diferencias finitas y SUTRA Y FEFLOW en elementos finitos. Sin embargo, existen otros modelos numéricos que pueden ayudar a solventar procesos que tam-



bién intervienen en el complicado funcionamiento de un acuífero costero, como también se ha puesto de manifiesto en el apartado de modelo conceptual.

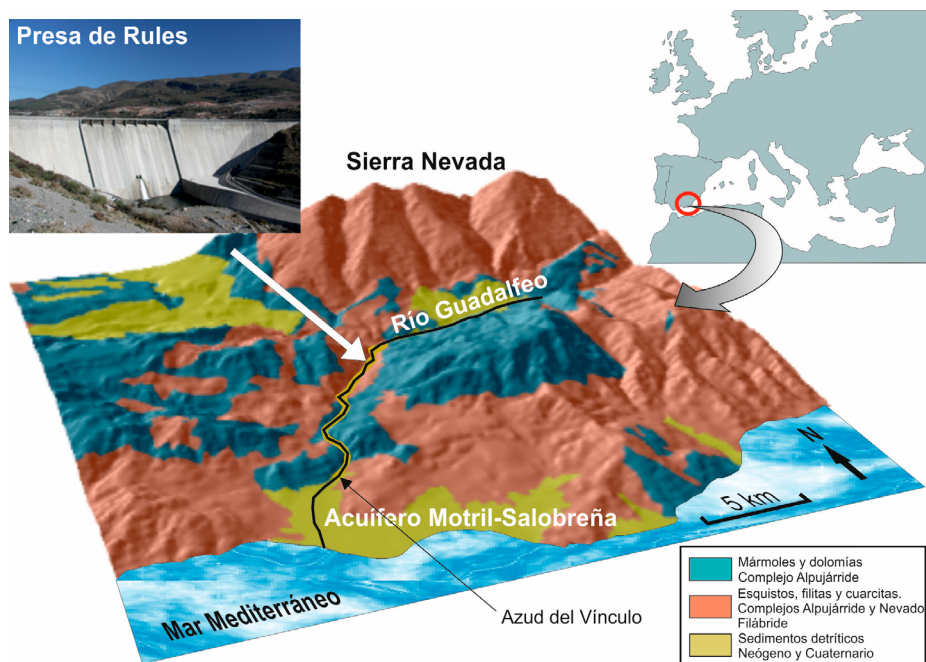
- El objetivo fundamental de este trabajo consiste en mostrar cómo la modelación numérica en sus diferentes versiones puede ayudar a completar la información sobre el funcionamiento hidrogeológico de un acuífero, necesaria para establecer un correcto modelo conceptual. En este caso, se toma como ejemplo el acuífero costero Motril-Salobreña en el que se han aplicado varios modelos numéricos con distintos objetivos: Caracterización del flujo subterráneo y posición de la cuña de agua salada – modelo de flujo y transporte de masa
- Determinación de la posible afección de la presa de Rules sobre la intrusión marina – modelo de transporte de masa
- Cuantificación de la recarga procedente del río Guadalfeo – modelo de transporte de calor
- Determinación de las vías preferenciales de circulación subterránea – modelo de edad

## 2. Contexto hidrogeológico

El acuífero Motril-Salobreña está constituido por los sedimentos detríticos que aporta el río

Guadalfeo y otras corrientes menos importantes que vierten sus aguas directamente al mar (ramblas de las Brujas y Puntalón), constituyendo un sistema fluvio-aluvial en los sectores septentrional y oriental, y deltaico en el sector costero occidental. Se localiza en la costa granadina, área de importante crecimiento económico basado en la agricultura y el turismo, actividades que implican una importante demanda de agua. El abastecimiento hídrico de la zona se realiza principalmente a partir de los recursos de agua superficial procedentes del río Guadalfeo que tiene un régimen mixto nival-pluvial y que nace en las cumbres de Sierra Nevada (Figura 1). El curso del río fue alterado y canalizado a mediados del siglo pasado hasta ocupar su posición actual. Todavía se puede reconocer la anterior posición de la desembocadura del río en el margen izquierdo de su ubicación actual. Durante épocas de sequía, el abastecimiento a estas áreas se ha realizado principalmente a partir de los recursos subterráneos del acuífero Motril-Salobreña.

La cuenca del río Guadalfeo se extiende 1294 km<sup>2</sup> con una precipitación media anual de 586 mm. En el sector costero, donde se ubica el acuífero, la precipitación media anual es de 420 mm. El río Guadalfeo se nutre principalmente de la escorrentía que se produce en la cara sur de Sierra Nevada y de los manantiales que vierten a su



**Figura 1.** Contexto geológico y geográfico del acuífero Motril-Salobreña (Calvache *et al.*, 2009).

**Figure 1.** Geological and geographic setting of the Motril-Salobreña aquifer (Calvache *et al.*, 2009).

cauce. A la altura del acuífero, el caudal medio del río Guadalfeo es de poco más de 5200 L/s (Calvache *et al.*, 2009), agua que se irá infiltrando a lo largo de todo su recorrido convirtiéndose en la principal fuente de recarga del acuífero. Esta situación se invierte en el último tramo del río, cerca de su desembocadura, en la que el río se hace ganador, siendo el acuífero el que descarga en el río. Asimismo, del Guadalfeo parte una compleja red de acequias que distribuyen el agua superficial a toda la superficie de la zona cultivada de la vega Motril-Salobreña y que permite el riego de unas 4300 ha. El sistema de riego dominante es por inundación con dotaciones que oscilan entre los 10000 y los 16500 m<sup>3</sup>/ha/año, lo cual produce un retorno de riegos hacia el acuífero tan significativo que constituye la segunda fuente de recarga más importante en el acuífero. Otras entradas de agua al sistema subterráneo se producen a través del macizo carbonatado de Escalate y la precipitación directa. La descarga principal del acuífero ocurre de forma oculta directamente al mar y, en menor medida, mediante extracciones en los pozos de bombeo que salpican la superficie del acuífero.

En 2005 entró en funcionamiento la presa de Rules, construida sobre el cauce del río Guadalfeo, 17 km aguas arriba de la línea de costa. Con una capacidad de 120 hm<sup>3</sup>, esta presa capta los recursos del río Guadalfeo pudiendo afectar de forma drástica a la recarga principal del acuífero. El retraso en la construcción de la red de distribución ha propiciado que 16 años después, el potencial efecto negativo de la presa sobre el acuífero no se haya producido, pues actualmente se desagua el mismo caudal que entra en la cabecera del embalse.

### 3. Resultados

#### 3.1. Modelo de transporte de masa

Se ha aplicado el código SEAWAT para simular el flujo subterráneo en tres dimensiones considerando la densidad variable. Este código combina MODFLOW que es un modelo de flujo 3D en diferencias finitas (McDonald and Harbaugh, 1988) y MT3DMS que es un modelo 3D de transporte de multi-especies que simula la advección, la dispersión y las reacciones químicas de contaminantes en sistemas subterráneos (Zheng and Wang, 1999). En este caso se modificó MODFLOW para resolver la ecuación del flujo subterráneo considerando la densidad variable.

El modelo se calibró en base a los datos de nivel y de concentración registrados en 20 puntos distribuidos por toda la superficie del acuífero a lo largo de un año. Las condiciones de contorno consideradas vienen reflejadas en la Tabla 1.

Mediante este modelo se consigue aportar un balance hídrico fiable para un año medio en el acuífero (Tabla 2) y se establece la posición de la cuña de agua salada bajo estas condiciones de año medio.

Considerando como referencia los datos de este año medio se realizaron una serie de simulaciones de escenarios que tenían en cuenta los cambios que se podrían producir en el acuífero debido a la presencia de la presa de Rules que permitieron obtener resultados sobre cómo afectará ésta a la intrusión marina en el acuífero (Ibáñez, 2005; Calvache *et al.*, 2009).

Se simulan tres escenarios considerando un periodo de diez años con estas nuevas condiciones: A) Se eliminan la recarga procedente del río Guadalfeo y la lateral oculta procedente de la cuenca alta del río; B) Se elimina la recarga del río, se disminuye en un 50% la recarga lateral oculta procedente de la cuenca alta del río y en un 10% el retorno de riegos; C) Las mismas condiciones que en el escenario A más un incremento de los bombeos del 100%. Los resultados indican una intrusión marina moderada para los escenarios A y B y muy grave para el escenario C (Figura 2).

Asimismo, la modelación numérica ha permitido determinar los sectores más vulnerables del acuífero basándose en las oscilaciones del nivel freático, el caudal de agua bombeada en pozos y sondeos y el riesgo de que se produzca más o menos intrusión marina (Tabla 3). El sector noroeste resultó el más vulnerable, ya que es donde se produciría una mayor disminución de la recarga por la pérdida de infiltración de agua del río Guadalfeo y, además, es donde mayor extracción de agua se produce. En el sector de la actual desembocadura del río Guadalfeo también presenta un riesgo medio-alto debido sobre todo al efecto de la intrusión marina. El sector oriental, fuera del área de influencia del río Guadalfeo, sería el de menor vulnerabilidad ya que la variación de la recarga sería menor y dónde los materiales acuíferos presentan valores de permeabilidad más bajos.

#### 3.2. Modelo de transporte de calor

La temperatura ha sido un parámetro del agua subterránea que tradicionalmente se ha estudia-

| Descripción                                 | Tipo              | Datos  |
|---|-------------------|--|
| <b>Contacto con el mar Mediterráneo</b>     | Dirichlet         | Nivel constante a 0 m y concentración de Cl <sup>-</sup> constante a 20000 mg/L  |
| <b>Contacto con el basamento</b>            | Neumann           | Sin flujo  |
| <b>Contacto con el acuífero de Escalate</b> | Cauchy (flujo)    | Flujo dependiente de los niveles registrados en ambos acuíferos.   |
|   | Dirichlet (conc.) | Concentración de Cl <sup>-</sup> constante a 60 mg/L   |
| <b>Continuación del aluvial</b>             | Dirichlet         | Nivel constante para cada periodo de tiempo (mes) que coincide con el registro de nivel medio mensual de un pozo situado en esa misma ubicación. La concentración de Cl <sup>-</sup> es constante en 60 mg/L |
| <b>Recarga superficial</b>                  | Neumann (flujo)   | Precipitación eficaz y retorno de riegos para cada periodo de tiempo establecido.  |
|   | Dirichlet (conc.) | La concentración de Cl <sup>-</sup> se considera constante en 20 mg/L.   |
| <b>Río Guadalfeo</b>                        | Cauchy (flujo)    | El nivel del río varía temporalmente según observaciones de campo. La conductancia es estimada por calibración.  |
|   | Dirichlet (conc.) | La concentración de Cl <sup>-</sup> es constante en 60 mg/L  |
| <b>Bombeos</b>                              | Neumann           | Datos mensuales obtenidos en campo   |

**Tabla 1.** Condiciones de contorno consideradas en la modelación del transporte de masa en el acuífero Motril-Salobreña (modificada de Calvache *et al.*, 2009).

**Table 1.** Boundary conditions considered in the mass transport modeling for Motril-Salobreña aquifer (modified from Calvache *et al.*, 2009).

| ENTRADAS (hm <sup>3</sup> /año)    |             | SALIDAS (hm <sup>3</sup> /año) |             |
|------------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Río Guadalfeo</b>               | 11.5        | Río Guadalfeo                  | 0.5         |
| <b>Precipitación</b>               | 3.5         | Borde costero                  | 26.0        |
| <b>Retorno de riegos</b>           | 10.0        | Bombeos                        | 7.5         |
| <b>Acuífero Escalate (lateral)</b> | 4.0         |                                |             |
| <b>Aluvial (lateral)</b>           | 5.0         |                                |             |
| <b>TOTAL</b>                       | <b>34.0</b> | <b>TOTAL</b>                   | <b>34.0</b> |

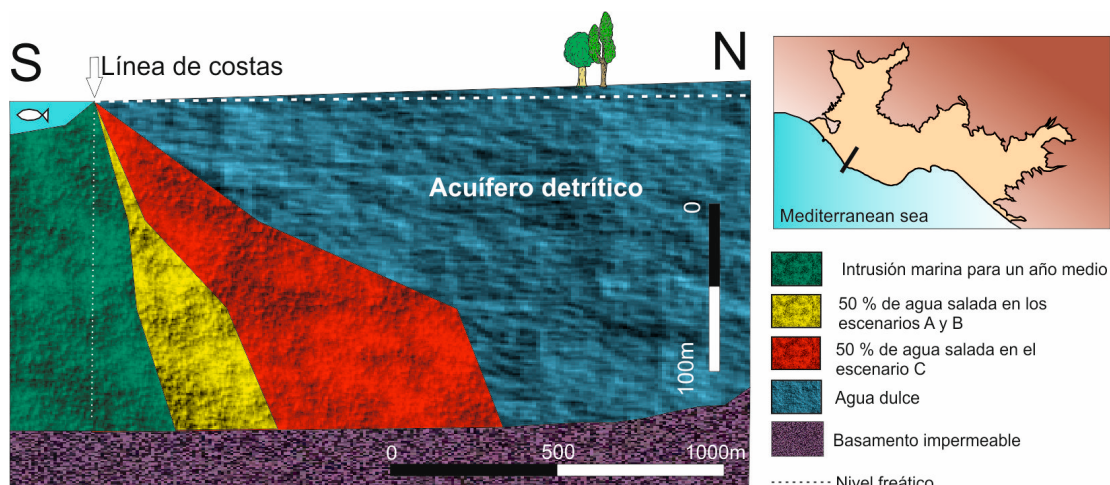
**Tabla 2.** Balance hídrico para un año que se podría considerar como medio en el acuífero Motril-Salobreña (Ibáñez, 2005; Calvache *et al.*, 2009).

**Table 2.** Water balance for an average precipitation year in the Motril-Salobreña aquifer (Ibáñez, 2005; Calvache *et al.*, 2009).

do en relación con procesos geotermales. Sin embargo, estudios recientes han puesto de manifiesto el interés de la temperatura como trazador para estudiar el funcionamiento de sistemas hidrológicos (Anderson, 2005). En concreto, la temperatura es un trazador ideal para identificar y cuantificar la infiltración que se produce desde los ríos (Taniguchi and Sharma, 1993). La modelación numérica del transporte de calor es una herramienta que se ha utilizado con menor profusión y más recientemente que la modelación del flujo y del transporte de masa por lo que no se encuentran en el mercado un número tan elevado de códigos como en los anteriores casos.

A continuación, se muestra el ejemplo de aplicación del modelo 2D de transporte de calor VSD-HI (Healy and Ronan, 1996) al acuífero Motril-Salobreña (Duque *et al.*, 2010). Este modelo simula el transporte de energía en un medio poroso bajo condiciones variables de saturación. Resuelve conjuntamente la ecuación del flujo no saturado y la ecuación de transporte de energía. A partir de la distribución y evolución de la temperatura del agua subterránea y la relación de ésta con el aire y la temperatura del agua del río Guadalfeo, se obtienen unos resultados de recarga del río hacia el acuífero. Se simula la pluma térmica que forma la recarga del agua del río en el seno del acuífero.





**Figura 2.** Posiciones del contacto agua dulce agua salada (50% de agua salada) en los diferentes escenarios simulados con el modelo de transporte de masa. Verde: Situación de partida correspondiente al año medio; Amarillo: Escenarios A y B; Rojo: Escenario C (modificado de Calvache *et al.*, 2009).

**Figure 2.** Freshwater-saltwater contact position (50% of saltwater) in the different simulated scenarios with mass transport modeling. Green: Initial situation for standard year; Yellow: A and B Scenarios; Red: C Scenario (modified from Calvache *et al.*, 2009).

|  | Zona 1          | Zona 2      | Zona 3         | Zona 4          |
|--|-----------------|-------------|----------------|-----------------|
| Variación del nivel freático (m)         | > 10 - 6        | 6 - 2       | < 1            | < 1 - 3         |
| Volumen agua bombeada (hm <sup>3</sup> ) | > 5             | 1 - 0.5     | < 0.5          | 1 - 0.5         |
| Intrusión marina                         | Poco importante | Importante  | Muy importante | Poco importante |
| <b>Grado de vulnerabilidad</b>           | <b>Muy alto</b> | <b>Alto</b> | <b>Medio</b>   | <b>Bajo</b>     |

**Tabla 3.** Zonación de la vulnerabilidad en el acuífero Motril-Salobreña según el descenso del nivel freático, caudal de bombeo y riesgo de intrusión marina.

**Table 3.** Vulnerability zoning in the Motril-Salobreña aquifer according to the decrease in the water table, pumping flow and risk of marine intrusion.

En este caso son necesarios datos de la zona no saturada como humedad, y parámetros del acuífero como conductividad hidráulica, almacenamiento, dispersión, capacidad calorífica del sedimento y del agua y conductividad térmica del sedimento y del agua. Para la calibración del modelo se utilizaron los perfiles de temperatura registrados en cuatro puntos de control del acuífero (Figura 3).

El modelo conceptual consistió en un río perdedor de 10 m de ancho hidráulicamente desconectado del nivel freático del acuífero con una franja no saturada de 5 a 8 m de espesor. Se simuló so-

lamente una mitad del río, ya que la recarga se considera simétrica a ambos lados del mismo. En la calibración se ha ajustado la infiltración producida en dos tramos del río Guadalfeo en el sector norte del acuífero. El primer tramo consta de una longitud de 2500 m desde el inicio del acuífero Motril-Salobreña hasta el punto de control A. El segundo consta de 1000 m desde el sondeo A hasta el B. Se considera una conductividad hidráulica homogénea de 70 m/d en toda la sección simulada. Las condiciones de contorno establecidas fueron de Neumann (sin flujo) para el límite inferior (basa-

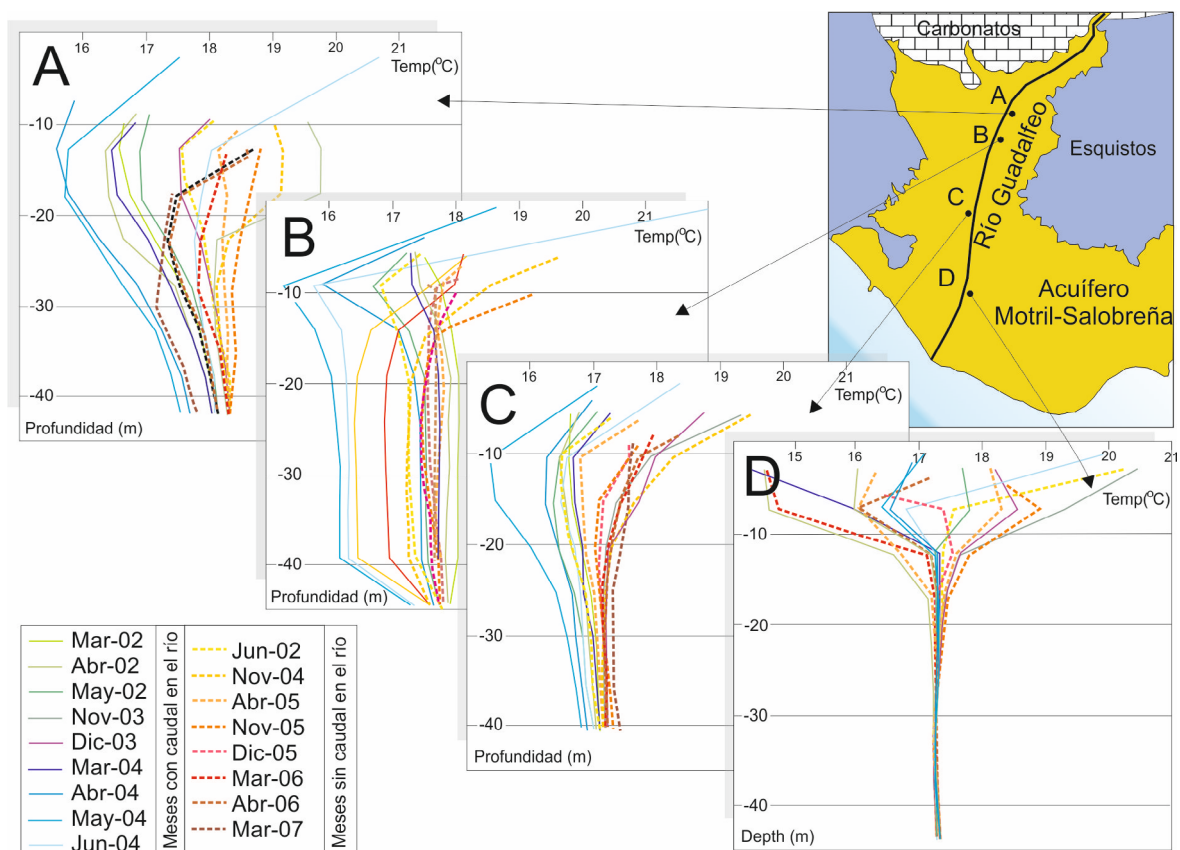


mento) y centro del cauce (divisoria hidráulica) y de Dirichlet (nivel constante) en el lado opuesto al cauce (Figura 4). El objetivo de este modelo consistió en simular los momentos de mayor caudal (primaveras de 2002 y 2004, y otoño de 2003) y evaluar durante estos episodios la infiltración que se producía desde el río hacia el acuífero.

Los resultados obtenidos con este modelo permitieron determinar la cantidad de agua infiltrada desde el río Guadalfeo a partir de la señal térmica detectada en el agua subterránea (Figura 5). La infiltración es menor en la zona B porque se ha tomado como referencia la temperatura registrada en el pozo B más alejado del río que el caso del pozo A. Durante los eventos de recarga se reconoce un primer periodo de mayor infiltración que va disminuyendo hasta estabilizarse. Los mejores ajustes de los resultados se encuentran en los primeros 15-20 m. A partir de esta profundidad el ajuste resulta más complicado probablemente relacionado con la modelación 2D que no considera el efecto de transmisión de calor en

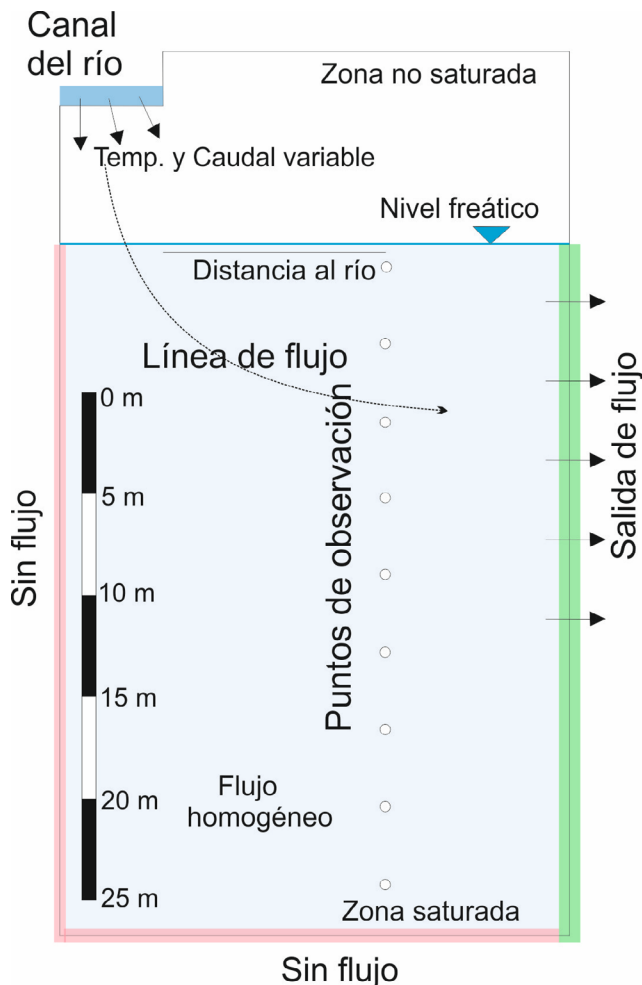
la dirección paralela al cauce que es precisamente la del flujo subterráneo principal del acuífero. Por lo tanto, en acuíferos con elevado gradiente hidráulico, la modelación numérica de la pluma térmica que se forma con la recarga del río hacia el acuífero plantea problemas en 2D ya que no sólo se produce el desplazamiento de la señal térmica en la dirección perpendicular al río sino que también se produce un movimiento de esta señal térmica en el sentido principal del flujo subterráneo en la misma dirección que el río. Así, se pueden reconocer dos zonas en relación al transporte de calor, una superficial (10-15 m) de influencia directa de la recarga del río con una dirección de transporte de calor transversal a éste, y otra zona más profunda con una influencia indirecta de la recarga del río con una dirección de transporte del calor paralelo a éste.

Los valores de infiltración que aparecen en la Figura 4, por tanto, deben considerarse como sobrestimados ya que sólo se considera el transporte transversal al río y se desprecia el trans-



**Figura 3.** Perfiles de temperatura registrados en cuatro puntos del acuífero en diferentes momentos (modificada de Duque *et al.*, 2010). Las líneas continuas representan la temperatura registrada durante los meses con caudal en el río Guadalfeo y las discontinuas la temperatura registrada durante los meses sin caudal.

**Figure 3.** Groundwater temperature logs for four boreholes at different moments (modified from Duque *et al.*, 2010). Continuous lines represent temperatures of months with river flow, discontinuous lines represent temperatures of the months without flow.



**Figura 4.** Modelo conceptual del modelo de transporte de calor (modificada de Duque *et al.*, 2010).

**Figure 4.** Conceptual model of heat transport modeling (modified from Duque *et al.*, 2010).

porte paralelo al mismo. Los datos obtenidos reflejan una tasa de infiltración (porcentaje del caudal del río infiltrado) inicial de un 13-18% en la zona A y de 2-4% en la zona B. Después de esta primera etapa, el porcentaje de caudal infiltrado disminuye a valores del 7% para la zona A y del 1% a la B.

### 3.3. Modelo de transporte para estimar tiempo de residencia y edades

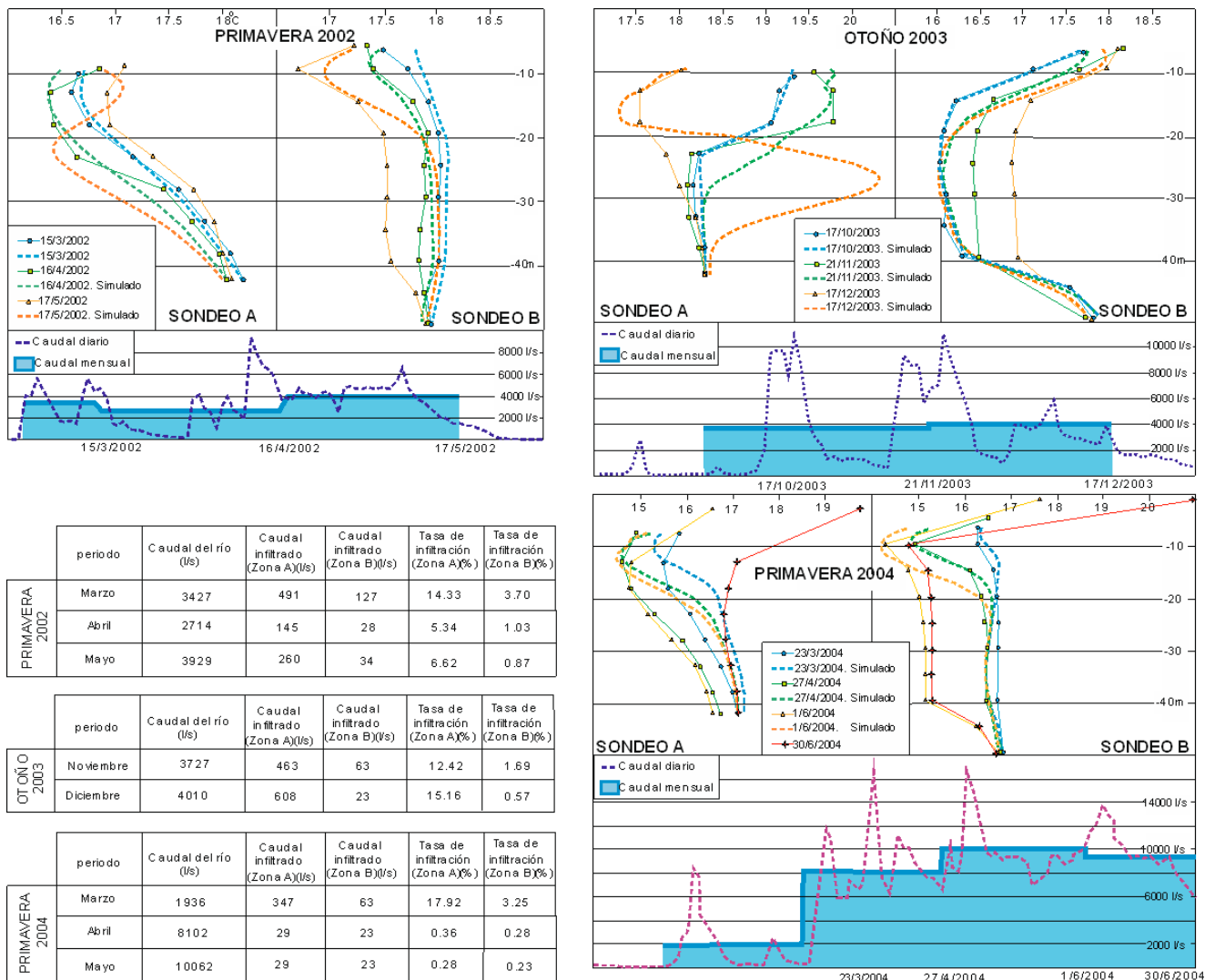
La edad del agua subterránea se define como el promedio del tiempo de residencia de las moléculas de agua en el subsuelo (Davis and Bentley, 1982). El conjunto de procesos que afectan a la edad del agua subterránea hacen que su naturaleza sea compleja y difícil de definir de forma adecuada. Como se indica en IAEA (2013), el estudio de la edad del agua subterránea en un

lugar concreto requiere el conocimiento de todos los procesos por los cuales el agua subterránea fluye hasta dicho lugar. El resultado neto de la actuación de todos estos procesos que ocurren desde que el agua entra en el sistema acuífero hasta que alcanza la posición donde la muestra es tomada determina su edad. Como indica Goode (1996), aunque la edad del agua subterránea no es directamente medible, resulta adecuado para un modelo conceptual que, cuando dos masas de agua se mezclan, la edad media de la mezcla consista en la edad media ponderada en masa de los dos componentes que la integran.

La datación de las aguas se obtiene mediante la utilización de algún trazador, siendo recomendable la utilización de diversos métodos. Posteriormente, es aconsejable la propuesta de un modelo conceptual validado mediante modelación numérica (IAEA, 2013). La aplicación de los métodos de datación en acuíferos costeros puede proporcionar un valioso conocimiento sobre los tiempos medios de residencia del agua subterránea en el sistema, de gran importancia para la gestión de los recursos hídricos costeros.

La modelación numérica de transporte de masa y edad resulta ser un método integrado de gran utilidad para la caracterización del comportamiento de acuíferos costeros, especialmente cuando estos sistemas son bastante heterogéneos, como es el caso del acuífero costero Motril-Salobreña (Calvache *et al.*, 2016). Con este modelo de transporte para estimar tiempo de residencia y edad se trata de determinar la distribución de las zonas de flujo preferencial en el acuífero. Se ha aplicado SEAWAT, que utiliza MT3DMS para el transporte de masa en densidad variable considerando dos especies, la salinidad y la edad del agua (Sánchez-Úbeda, 2017). Se resuelve así la ecuación de advección-dispersión según el método de resolución numérica denominado *directage* (Voss and Wood, 1994).

Los datos necesarios para la aplicación de un modelo de edad son los mismos que se necesitan en un modelo de transporte de masa además de los valores resultantes de la datación del agua subterránea. Los trazadores ambientales utilizados en combinación en este estudio (Sánchez-Úbeda *et al.*, 2017a) han sido  $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{H}-^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ , con el fin de reducir la ambigüedad en la traducción de concentración de trazador a edad media (Suckow, 2014), además de cubrir el rango de edades esperado para el acuífero. Los trazadores transitorios como el



**Figura 5.** Resultados de las simulaciones y datos observados de los perfiles de temperatura. Infiltración resultante, caudal del río Guadalfeo y tasas de infiltración (modificado de Duque *et al.*, 2010).

**Figure 5.** Results of the simulations and observed data of the groundwater temperature logs. Infiltrated flow calculated by simulation, Guadalfeo River flow and percentages of infiltrated water (modified from Duque *et al.*, 2010).

$^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  y  $^{85}\text{Kr}$  son sensibles a las aguas más jóvenes, con tiempos de residencia menores de 50 años. Así, la combinación de  $^3\text{H}$  tanto con  $^3\text{He}$  y con  $^{85}\text{Kr}$  es utilizada para la datación y la cuantificación de la proporción de aguas jóvenes (0.5-1 a 40 años aproximadamente) (Sültenfuß *et al.*, 2011). Por otra parte,  $^{39}\text{Ar}$  es utilizado para cubrir el rango de edades mayores (50 a 1000 años), y los isótopos estables  $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$  para el contraste de las entradas de agua más recientes al sistema (0.1 a 3 años), siguiendo a Suckow (2014).  $^4\text{He}_{\text{rad}}$  es utilizado aquí como un indicador cualitativo de la edad (Solomon, 2000).

La modelación numérica del transporte para estimar tiempo de residencia y edad ha permitido conocer:

- Las líneas preferentes de flujo en relación con las condiciones hidrogeológicas y la geometría del acuífero.
- La relación entre la distribución de edades medias y los procesos de intrusión marina en la zona de descarga del acuífero.
- El modelo conceptual de flujos preferenciales y distribución de edad.

El modelo de datación se calcula para un tiempo total de 200 años en estado transitorio, con el fin de ajustar los parámetros difusivos-dispersivos. Para ello se han utilizado los resultados de datación como un método para llevar a cabo la calibración de los coeficientes de dispersión y difusión, los cuales se ha comprobado que son de

|                   | Descarga -40 | Descarga-87 | Descarga-132 | Recarga | Intermedia |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|---------|------------|
| <b>Medido</b>     | 3.5          | 24.5        | 167          | 2.5     | 2.5        |
| <b>Simulado</b>   | 25.77        | 31.85       | 160.04       | 4.07    | 7.79       |
| <b>Residual</b>   | -22.27       | -7.35       | 6.96         | -1.57   | -5.29      |
| <b>% Residual</b> | 636          | 30          | 4            | 63      | 212        |

**Tabla 4.** Edad media en años del agua subterránea medida y simulada en cinco puntos de control localizados en el área de recarga, intermedia y de descarga a 40, 87 y 132 m de profundidad (modificado de Sánchez-Úbeda *et al.*, 2017).

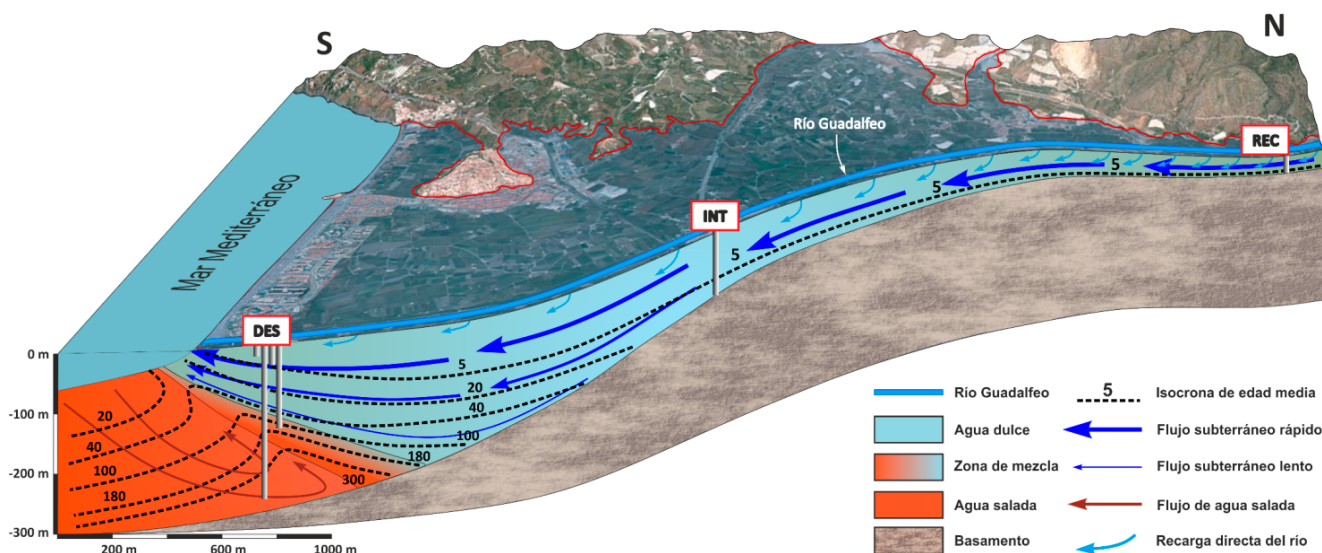
**Table 4.** Measured and simulated mean age of groundwater in years at five control points located in the recharge, intermediate and discharge area at 40, 87 and 132 m depths (modified from Sánchez-Úbeda *et al.*, 2017).

terminantes en la distribución de edades mediante un análisis de sensibilidad previo. Con esta metodología de calibración basada en las edades aparentes se han determinado los rangos de variación de los coeficientes de dispersión longitudinal, dispersiones transversales horizontal y vertical y coeficiente de difusión molecular.

Las edades que se obtienen en las zonas más oriental, donde se produce la máxima recarga, y la intermedia indican un porcentaje elevado de aguas jóvenes (Tabla 4), lo que también vemos reproducido en el modelo de transporte de masa y edad (Figura 6). Según este, se obtienen edades muy jóvenes para la franja superficial del acuífero a lo largo del trazado del río Guadalfeo,

lo cual se asocia al aluvial del río, muy permeable. Es en la zona de descarga, más próxima al borde costero, donde los valores de edad media cambian con la profundidad más claramente. El gradiente definido en los distintos puntos de control se ve reproducido en el modelo de transporte de masa y edad (Tabla 4).

La Figura 6 muestra el modelo conceptual obtenido para el acuífero, considerando el perfil central delimitado por la traza del río. Se observa que la distribución de edades obtenida en la simulación se ha ajustado al gradiente de edad observado en el campo, localizado principalmente en la zona de descarga. Así vemos cómo aguas más jóvenes de 50 años están presentes en ma-



**Figura 6.** Aproximación al modelo conceptual del acuífero costero Motril-Salobreña. El perfil del esquema corresponde a la vertical del trazado del río Guadalfeo sobre el sector occidental del acuífero. Se muestra la síntesis de los resultados de distribución de edades (observadas y simuladas), en acuerdo con la cuña salina y con la distribución de las diferentes zonas de flujo preferencial (Sánchez-Úbeda *et al.*, 2017b).

**Figure 6.** Approach to the conceptual model of the Motril-Salobreña coastal aquifer. The outline of the scheme corresponds to the vertical line of the Guadalfeo river over the western sector of the aquifer. The synthesis of the age distribution results (observed and simulated) is shown, in accordance with the saline wedge and with the distribution of the different preferential flow zones (Sánchez-Úbeda *et al.*, 2017b).



yor o menor proporción casi en la totalidad de la zona más somera del acuífero, indicando una circulación muy rápida. Sin embargo, encontramos porcentajes de aguas más antiguas en la zona de descarga en profundidad, donde los valores más altos obtenidos con el modelo muestran concordancia con la posición del pie de cuña.

La presencia de la cuña salina da lugar además al incremento de las edades medias en la zona de descarga, ya que ésta implica un incremento de la componente vertical del flujo. El flujo procedente de niveles inferiores, donde la velocidad de flujo es mucho menor que en el resto del acuífero, provoca un incremento de la edad media hacia zonas más someras, mientras que el flujo rápido en la franja sub-superficial hace que un importante porcentaje de agua más joven esté presente en la mitad superior del acuífero. En cualquier caso, la edad media se incrementa en profundidad en la zona de agua dulce, principalmente por la presencia de materiales con conductividades hidráulicas más bajas y el importante incremento del espesor saturado en este sector de descarga.

#### 4. Discusión y conclusiones

Los acuíferos costeros son sistemas sometidos a una gran presión hídrica por tratarse de zonas intensamente pobladas y con importante actividad económica. Por otro lado, son sistemas muy vulnerables a la contaminación por salinización fundamentalmente, aunque también por otros agentes de origen agrícola e industrial. Las previsiones futuras auguran un empeoramiento de esta situación ya que es previsible que la población aumente y que la actividad económica también crezca. De todo ello se deduce que el estudio de los acuíferos costeros debe de intensificarse. Una forma de establecer el grado de vulnerabilidad del acuífero costero sería mediante la aplicación de métodos de índices como GALDIT (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2005; Benini *et al.*, 2016). Los modelos matemáticos tradicionalmente empleados en el estudio de los acuíferos costeros son los de flujo y transporte de masa con densidad variable, que permiten obtener una distribución de salinidades de la zona de mezcla agua dulce-agua salada y un patrón de flujo adecuado a esta zona de descarga. La atención investigadora actual no se centra tanto en la descripción del proceso, que está bastante conseguida, sino más bien en la simulación de los casos reales. Se necesitan métodos más versátiles en la introducción tanto de los parámetros del

acuífero que permitan resolver la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del acuífero, como de los caudales de recarga.

Se puede aventurar que uno de los nuevos retos para la modelación numérica en acuíferos costeros será determinar la afección que el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático, tendrá sobre la intrusión marina, especialmente en acuíferos costeros de bajo gradiente hidráulico. Igualmente, será interesante estudiar la afección del cambio climático sobre la disminución en la recarga y el consecuente incremento de los bombeos para cubrir las crecientes necesidades de riego (Pulido-Velázquez *et al.*, 2018). Otro reto futuro en la modelación numérica será el tener en cuenta el grado de equilibrio de la posición actual de la cuña salina con respecto a las condiciones actuales. Este hecho deberá ser tenido en cuenta, sobre todo en acuíferos de baja permeabilidad, con simulaciones numéricas prolongadas y siempre tomando en consideración la historia geológica reciente de cada sector de la costa.

Actualmente, además de los modelos de transporte de masa con densidad variable, también se están utilizando otro tipo de modelos que aportan información muy interesante en relación a las características específicas que muestran este tipo de acuíferos. Por ejemplo, es interesante la simulación numérica de transporte de calor para estimar la recarga que se produce en los acuíferos costeros siempre y cuando esta recarga produzca una señal térmica en el acuífero. Este tipo de modelos son especialmente útiles para la recarga procedente de ríos. Es recomendable realizar simulaciones en 3D en aquellos acuíferos con elevado gradiente hidráulico ya que la señal térmica que se produce cuando se infiltra el agua del río no sólo se producirá en la dirección perpendicular al río sino también en el sentido principal del flujo subterráneo que suele coincidir con la dirección del curso de agua. Asimismo, la modelación del transporte para estimar tiempo de residencia y edad, a pesar de ser por ahora bastante compleja, da unos resultados muy interesantes sobre el tiempo de residencia del agua y vías preferenciales de flujo en estos acuíferos de frecuente heterogeneidad y anisotropía.

#### Agradecimientos

Este estudio se ha realizado bajo el marco del proyecto CGL2016-77503-R financiado por el Mi-

nisterio de Ciencia e Innovación y el grupo de investigación de la Junta de Andalucía RNM-369.

## Referencias

- Anderson, M. P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Ground Water*, 43(6), 951-968.
- Benini, L., Antonellini, M., and Laghi, L. (2016). Assessment of water resources availability and groundwater salinization in future climate and land use change scenarios: a case study from a coastal drainage basin in Italy. *Water Resources Management*, 30, 731–745. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1187-4>.
- Calvache, M. L., Ibáñez, P., Duque, C., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W., González-Ramón, A., and Rubio, J. C. (2009). Numerical modelling of the potencial effects of a dam on a coastal aquifer in S Spain. *Hydrological Processes*, 23, 1268-1281. DOI: 10.1002/hyp.7234.
- Calvache, M., Sánchez-Úbeda, J., Duque, C., López-Chicano, M., and de la Torre, B. (2016). Evaluation of analytical methods to study aquifer properties with pumping tests in coastal aquifers with numerical modelling (Motril-Salobreña aquifer). *Water Resources Management*, 30, 559-575. DOI: 10.1007/s11269-015-1177-6.
- Calvache, M. L., Duque, C., and Pulido-Velázquez, D. (2017). *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*. Springer, 312 pp.
- Calvache, M. L., Duque, C., and Pulido-Velázquez, D. (2020). Summary Editorial: Impacts of global change on groundwater in Western Mediterranean countries. *Environmental Earth Sciences*, 79, 531.
- Chachadi, A. G., Lobo-Ferreira, J. P. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: part 2—GALDIT indicator descriptions. IAHS and LNEC. In: *Proceedings of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, held at Universidade do Minho Guimarães, Portugal, July 11–13, 2005.
- Custodio, E. (2010). Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeology Journal*, 18, 269-280.
- Dausman, A. M., Langevin, C., Bakker, M., and Schaars, F. (2010). A comparison between SWI and SEAWAT – the importance of dispersion, inversion and vertical anisotropy. 21st Salt Water Intrusion Meeting, Azores, 271-274.
- Davis, S., and Bentley, H. (1982). Dating groundwater in nuclear and chemical dating techniques. *Interpreting the environmental record*: Washington DC. American Chemical Society, Symposium series, 193 pp.
- Diersch, H. J. G. (2002). *WASY software FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System: Reference Manual*. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., 292 pp.
- Duque, C., Calvache, M. L., and Engesgaard, P. (2010). Investigating river-aquifer relations using water temperature in an anthropized environment (Motril-Salobreña aquifer). *Journal of Hydrology*, 381, 121-133.
- Ferguson, G., and Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, 2, 342-345.
- Ghyben, W. (1988). Nota in verband met de voorgenomen put boring nabij Ammsterdam. *Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs*, 8-22.
- Glover, R. E. (1959). The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 64(4), 457-459.
- Goode, D. J. (1996). Direct simulation of groundwater age. *Water Resources Research*, 32, 289-296.
- GRID-Arendaland UNEP (2016). *World Ocean Assessment Overview*, GRID-Arendal, Arendal, Norway.
- Guo, W., and Langevin, C. D. (2002). User's guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density groundwater flow. Book 6, Chapter A7, *Techniques of Water Resources*. Investigations of the U.S. Geological Survey, 77 pp.
- Healy, R. W., and Ronan, A. D. (1996). Documentation of computer program VS2DH for simulation of energy transport in variably saturated porous media-Modification of the U.S. Geological Survey's computer program VS2DT, *Water-Resources Investigations Report 96-4230*. Denver, Colorado.
- Heredia, J., and Murillo, J. M. (2007). Estado del arte sobre la representación numérica de sistemas de flujo bajo condiciones de densidad variable. *Boletín Geológico y Minero*, 118, 555-576.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebaeder. *Z. F. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 44, 815-819, 842-844.
- Houben, G., and Post, V. E. A. (2017). The first field-based description of pumping-induced saltwater intrusion and upconing. *Hydrogeology Journal*, 25(1), 243-247.
- IAEA (2013). *Isotope methods for dating old groundwater*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 357pp.
- Ibáñez, S. (2005). Comparación de la aplicación de distintos modelos matemáticos sobre acuíferos costeros detríticos. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- McDonald, M. C., and Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques of Water-Resources U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations*. V6, A1.
- McLaughlin, D., and Townley, L. R. (1996). A reassessment of the groundwater inverse problem. *Water Resources Research*, 32(5), 1131-1161.

- Michael, H. A., Post, V. E. A., Wilson, A. M., and Werner, A. D. (2017). Science, society, and the coastal groundwater squeeze. *Water Resources Research*, 53, 2610-2617.
- Olías, M., González, F., Cerón, J. C., González-Labajo, J., and García-López, S. (2008). Water quality and distribution of trace elements in the Doñana aquifer (SW Spain). *Environmental Geology*, 55(7), 1555-1568.
- Pool, M., Carrera, J., Alcolea, A., and Bocanegra, E. M. (2015). A comparison of deterministic and stochastic approaches for regional scale inverse modeling on the Mar del Plata aquifer. *Journal of Hydrology*, 531, 214-229.
- Post, V. E. A. (2005). Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problem ahead?. *Hydrogeology Journal*, 13, 120-123.
- Priyanka, B. N., and Mohan Kumar, M. S. (2017). Direct and inverse modeling of seawater intrusion: a perspective. *Journal Geological Society of India*, 90, 595-601.
- Pulido-Velazquez, D., Renau-Pruñonosa, A., Llopis-Albert, C., Morell, I., Collados-Lara, A. J., Senent-Aparicio, J., and Baena-Ruiz, L. (2018). Integrated assessment of future potential global change scenarios and their hydrological impacts in coastal aquifers. A new tool to analyse management alternatives in the Plana Oropesa-Torreblanca aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 3053-3074. DOI: 10.5194/hess-22-3053-2018.
- Qahman, K., and Larabi, A. (2006). Evaluation and numerical modeling of seawater intrusion in the Gaza aquifer (Palestine). *Hydrogeology Journal*, 14, 713-728.
- Sánchez-Úbeda, J. P. (2017). Procesos hidrodinámicos en la zona de descarga de los acuíferos costeros. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 198 pp.
- Sánchez-Úbeda, J. P., López-Chicano, M., Calvache, M. L., Purtschet, R., Engesgaard, P., Martín-Montañés, C., Sültenfuß, J., and Duque, C. (2017a). Groundwater age dating in Motril-Salobreña coastal aquifer with environmental tracers ( $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$ ,  $3\text{H}/3\text{He}$ ,  $4\text{He}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ). In: M.L. Calvache, C. Duque, and D. Pulido-Velázquez (eds.), *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*. Springer, 287-295.
- Sánchez-Úbeda, J. P., Calvache, M. L., Engesgaard, P., Duque, C., López-Chicano, M., and Purtschet, R. (2017b). Numerical modelling of groundwater age distribution in Motril-Salobreña coastal aquifer (SE Spain). In: M.L. Calvache, C. Duque, and D. Pulido-Velázquez (eds.), *Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area*. Springer, 277-285.
- Solomon, D. K. (2000).  $4\text{He}$  in groundwater. In: P.G. Cook, and A. L. Herczeg (eds.), *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Springer, 425-439.
- Suckow, A. (2014). The age of groundwater—definitions, models and why we do not need this term. *Applied Geochemistry*, 50, 222-230.
- Sültenfuß, J., Purtschet, R., and Führböter, J. F. (2011). Age structure and recharge conditions of a coastal aquifer (northern Germany) investigated with  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^4\text{He}$  isotopes and  $\text{Ne}$ . *Hydrogeology Journal*, 19, 221-236. DOI: 10.1007/s10040-010-0663-4.
- Taniguchi, M., and Sharma, M. L. (1993). Determination of groundwater recharge using the change in soil temperature. *Journal of Hydrology*, 148, 219-229.
- Tovar-Sanchez, A., Huerta-Diaz, M. A., Negro, J. J., Bravo, M. A., and Sañudo-Wilhelmy, S. A. (2006). Metal contamination in interstitial waters of Doñana Park. *Journal of Environmental Management*, 78(3), 286-293.
- Versluys, J. (1916). *Chemischewekingen in den ondergrond der duinen*. Verslaggewonevergadering. Koninklijke Academie van Werenschappen, Amsterdam: 1671-1676.
- Voss, C. I., and Provost, A. (2002). SUTRA: A model for saturated-unsaturated variable-density groundwater flow with solute or energy transport. U.S. Geological Survey. *Water Resources Investigations, Rep.*, 02-4231, 270 pp.
- Voss, C. I., and Wood, W. W. (1994). Synthesis of geochemical, isotopic and groundwater modelling analysis to explain regional flow in a coastal aquifer of southern Oahu, Hawaii. *International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria*, 147-178.
- Yeh, W. G. (1986). Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. *Water Resources Research*, 22(2), 95-108.
- Zheng, C., and Wang, P.P. (1999). User's guide to MT3DMS: A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems, U.S. AERDCC Report SERDP-99-1. Vicksburg, MS.

