

# ANÁLISIS DE LA SALINIZACIÓN DE UN ACUÍFERO DELTAICO DURANTE EPISODIOS METEOROLÓGICOS EN LA COSTA BRAVA (NE DE LA PENÍNSULA IBÉRICA)

Javier RODRÍGUEZ-BOCANEGRA<sup>1,2</sup>, Javier MARTÍN-VIDE<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Investigación del Agua (IdRA). Universidad de Barcelona.*

*C/Montalegre, 6, 08001 Barcelona, España.*

<sup>2</sup>*Departamento de Mineralogía, Petrología y Geología Aplicada. Grupo de Investigación en Geología Económica, Ambiental e Hidrología (GEAH). Facultad de Ciencias de la Tierra. Universidad de Barcelona C/ Martí i Franquès, s/n, 08028 Barcelona, España.*

<sup>3</sup>*Departamento de Geografía. Grupo de Climatología. Facultad de Geografía e Historia. C/Montalegre, 6, 08001, Barcelona, España.*

**rodriguezbocanegra@ub.edu, jmartinvide@ub.edu**

## RESUMEN

De forma natural, en los hidrosistemas situados en las zonas de transición existe una gran variabilidad espacial y temporal como consecuencia de factores tales como el clima y la topografía. Los aportes durante episodios de precipitación deberían comportar una disminución de la salinidad del agua. En el acuífero fluviodeltaico del río Tordera, situado en el NE de Cataluña, tanto el acuífero superficial (libre) como el profundo (cautivo), separados por una unidad confinante limo-arcillosa (acuitardo) no continua espacialmente, presentan conexión hidráulica significativa con las aguas atmosféricas con una correlación  $r=0,4$   $p\text{-valor}=0,000$ ; así mismo, la conexión es significativamente variable en relación a la estacionalidad, con mínimos en verano y dos máximos en primavera y otoño. El nivel piezométrico del acuífero profundo es mayor que el del superficial durante el año, de manera que existe un flujo de agua vertical ascendente entre acuíferos; esto implica una dependencia del quimismo del agua del acuífero superficial respecto del profundo. Así mismo, en las zonas más próximas a la costa, de forma significativa, los episodios de precipitación asociados a situaciones meteorológicas de E y NE comportan la salinización del acuífero deltaico, incluso profundo, debido al viento y consecuentemente al oleaje ( $r=0,4$ ;  $p\text{-valor}=0,000$ ). La comprensión de estos procesos es fundamental en un contexto donde el cambio climático comportará el aumento del nivel del mar y los acontecimientos extremos. Esto aumentará la salinización, debido tanto a la intrusión salina como al oleaje. De esta manera se pueden ver afectados los pozos de abastecimiento de agua potable cercanos a la costa en este contexto y en otros de similares.

**Palabras clave:** intrusión salina, recursos hídricos, clima mediterráneo, calidad de las aguas, hidrometeorología, aguas subterráneas.

## ABSTRACT

By natural causes, in hydrosystems located in transition zones, there exist a great spatial and temporal variability, as consequence of different factors such as climate and topography. Inputs during rainfall episodes should entail a water salinity decrease. In the fluviodeltaic aquifer located in the NE of Catalonia (Spain), both the surface aquifer (non-confined) and the deep aquifer (confined) are divided by a confined unit silty-clayey (aquitard) non-spatial continuous. This presents a significant hydraulic connection with the atmospheric water with a correlation  $r=0.4$ ,  $p\text{-value}=0,000$ . In the same way, the connection is significantly changeable and is related with the seasonality, with minimums in summer and two maximums in spring and autumn. The piezometric level of the deep aquifer is greater than the one at the surface level during the whole year. Therefore, a vertical ascendant flow exists between aquifers; this implies a chemical dependence of the surface aquifer related to the deepest one. Furthermore, in the area nearest to the coast, the rainfall episodes associated to E and NE meteorological situations result in a deltaic aquifer salinization. Even in the deep aquifer, as a consequence of the wind and as a result of the surge ( $r=0.4$ ,  $p\text{-value}=0,000$ ), the comprehension of these processes is fundamental, especially in a context where climate change will result in an increase of sea level and extreme weathering. Because of this, salinization is going to be increased as consequence of both saline intrusion and surge. In this context, these events might affect the freshwater supply wells nearest to the coast as well as in similar places.

**Key words:** saline intrusion, water resources, Mediterranean climate, water quality, hydrometeorology, groundwater systems.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Importancia de las aguas subterráneas

El agua subterránea es toda el agua no superficial que circula por el subsuelo y que se encuentra en las diferentes unidades hidrogeológicas. La más representativa es la que se halla en los acuíferos. Los acuíferos son capaces de almacenar, recibir y aportar agua de forma natural, a menudo, propicia para el consumo humano dado que este recurso presenta normalmente una mayor calidad que las aguas superficiales. Esto es consecuencia del menor grado de exposición a las presiones ambientales generadas por la actividad antrópica y a la elevada capacidad de filtración de las aguas en casos de contaminación natural y antrópica. Además, condicionan fuertemente la existencia de las masas de agua superficiales, imprescindibles para el mantenimiento de los ecosistemas naturales. Es por eso que es importante conservarlos y hacer un uso sostenible de los mismos, sobre todo teniendo en cuenta la problemática que se deriva, y que se puede agravar como consecuencia del cambio climático.

### 1.2 La salinización de los acuíferos en el contexto mediterráneo

Las zonas más cercanas a la costa pueden tener influencia de las aguas oceánicas ya sea por el efecto del espray marino o por la inserción del agua marina. El agua

marina, situada a nivel del mar, puede introducirse en los sistemas continentales por a) el efecto del espray marino y/o por b) la subida del nivel del mar. Además, de forma natural, por la existencia de un equilibrio entre el aporte de agua y el nivel del agua del mar, existe una c) cuña salina que penetra subterráneamente hacia los acuíferos costeros y que varía, en cuanto a su grado de penetración, principalmente en función de la estacionalidad y de los períodos climáticos existentes tanto en la zona local como a nivel de cuenca. De forma natural, las zonas con acuíferos más piezométricamente deprimidos son más vulnerables a la entrada de aguas marinas. En relación a los factores b) y en parte a a), se puede decir que estos factores estarían siendo influenciados por las condiciones meteorológicas y climáticas. Entre los factores meteorológicos, climáticos, y afines, que pueden condicionar la salinidad de las aguas están a) las mareas, poco importantes en el mar Mediterráneo, b) el viento y el oleaje y c) el cambio climático. Con el fin de estudiar los procesos de salinización de acuíferos se pueden emplear herramientas hidrogeoquímicas como son las relaciones iónicas ( $rCl^-/rHCO_3^-$ ,  $rSO_4^{2-}/rCl^-$ ,  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ ) o por medio de la determinación de las concentraciones de determinados aniones y cationes típicos del agua del mar como son el  $Na^+$ , el  $Cl^-$  y el  $SO_4^{2-}$ . Además, hay herramientas geofísicas y geoquímicas para conocer el avance de la intrusión salina como es la ecuación de Hubbert (Custodio y Llamas, 1976).

La subida progresiva del nivel del mar como consecuencia de la fusión de los glaciares por el aumento de la temperatura global condicionará un aumento de la salinidad de los acuíferos costeros (Generalitat de Catalunya, 2016). Un aumento del nivel del mar favorece que zonas, anteriormente emergidas, puedan ser inundadas tanto por la misma subida marina en sí, como por la mayor exposición del territorio a las aguas del mar durante los temporales. Además, una bajada en la cantidad de recurso disponible por el cambio en el régimen de precipitaciones y/o una subida en los niveles de demanda hídrica por parte del sector socioeconómico y la población pueden condicionar cambios abruptos en el movimiento y la distancia de la interfaz agua dulce-agua salada.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 Características principales del medio

El área hidrogeológica fluviodeltaica y del bajo Tordera (Fig. 2) comprende un conjunto de formaciones hidrogeológicas que, por sus características, permiten ser tratadas como una única masa de agua subterránea perteneciente a la cuenca del río Tordera (masa de agua num.406). La cuenca del Tordera de 898,18 km<sup>2</sup>, está situada en la vertiente suroriental del macizo del Montseny, y discurre entre este macizo y la cordillera litoral hasta la desembocadura del mar, lugar donde forma un delta y punto en el que actúa como divisor entre la costa del Maresme y el inicio de la Costa Brava. El acuífero fluviodeltaico del bajo Tordera, y en sí misma, la llamada baja Tordera, comprende desde el tramo que va desde la confluencia del río Tordera con la riera de Santa Coloma, próximo a la localidad de Fogars de la Selva, hasta la desembocadura en el mar Mediterráneo.

La región de estudio, se caracterizan por presentar un clima típicamente mediterráneo, con pluviometría irregular y estacional con inviernos moderadamente

húmedos y relativamente suaves en las zonas costeras y veranos muy secos y calurosos. Según el índice de humedad de Thornthwaite, es una zona de tipo seco-subhúmedo, con una  $P_{media}=500-750$  mm, con un claro máximo otoñal y temperaturas medias anuales entre 14,5-17°C. De acuerdo con la Agencia Catalana del Agua (ACA) (2002), la baja Tordera tiene como características la presencia de un acuífero aluvial superficial libre formado por gravas y arenas con una matriz limosa, y otro profundo confinado, formado por niveles de gravas y arenas de origen fluvial separado por materiales limosos de menor permeabilidad (Fig. 1). Ambos constituyen dos acuíferos diferentes que, aun así, pueden ser tratados conjuntamente como una misma masa de agua: aluviales del bajo Tordera y delta. La separación entre los acuíferos no es clara debido a que no hay un desarrollo importante de la unidad limosa. Los acuíferos se encuentran delimitados por la unidad de la arenisca la cual es un límite permeable.

- *Acuífero superficial de la Baja Tordera* (código acuífero ACA: 403A13). Su espesor saturado ( $H_0$ ) es variable  $H_0=10-30$  m, el cual aumenta de aguas arriba a aguas abajo. Tiene unos 150 m de ancho en su inicio en la confluencia del Tordera con la riera de Santa Coloma hasta llegar a los 5000 m en el delta, con una superficie total de unos 21 km<sup>2</sup>.
- *Acuífero profundo de la Baja Tordera* (código acuífero ACA: 403A21). Con una  $b=10-20$  m, también aumenta de aguas arriba a aguas abajo. Tiene una anchura media de 1000 m en su inicio, aguas abajo en la confluencia del Tordera con la riera de Santa Coloma, y una longitud de 11 km hasta llegar al mar, con una superficie total de unos 11 km<sup>2</sup>. Por debajo del acuífero profundo, a unos 193 m de profundidad, se encuentra el que recientemente se ha llamado "Acuífero basal", muy poco conocido y que a menudo se ha interpretado como el granito que hace de zócalo del acuífero profundo.

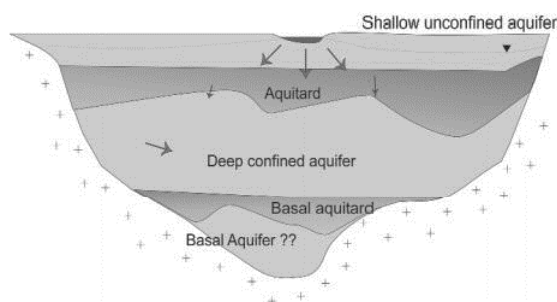


Fig. 1: Modelo hidrogeológico del sistema acuífero del bajo Tordera. Fuente: Falgàs et al., 2004.

## 2.2 Principales problemáticas en la cuenca y los acuíferos deltaicos

### 2.2.1 Problemática con la disponibilidad de recursos hídricos

El agua de suministro para diferentes usos procede básicamente de los acuíferos del Tordera (71%) -sobre todo los aluviales que son más productivos-, de acuíferos externos a la cuenca, y como se ha comentado de la desalinizadora. Poca es el agua

superficial que se extrae del río Tordera. Con el fin de satisfacer las necesidades hídricas de la actividad turística, muy importante en la región deltaica, hubo una elevada extracción de agua en la zona del tramo bajo. Esta agua, extraída del acuífero superficial y profundo, sobre todo durante el período 1994-1998, ocasionó grandes depresiones piezométricas generadas por los mismos campos de bombeo. Para solucionar los problemas de déficit hídrico en la cuenca, en 2002 se instaló la desalinizadora de Blanes con capacidad de producción de agua de unos 10 hm<sup>3</sup> y se ampliaron las instalaciones, ante la fuerte sequía del periodo 2007-2008, hasta una capacidad de producción que llega a los 20 hm<sup>3</sup>. Inicialmente, la desalinizadora del Tordera extraía agua salobre del acuífero profundo. Se observó que la extracción de agua del acuífero profundo comportaba una disminución del nivel piezométrico del acuífero superficial ya que ambos, separados por la unidad semi-confinante, tienen una ligera conexión hidráulica. Además, la gran variabilidad en los parámetros físico-químicos del agua complicaba el funcionamiento de la planta. Así pues, se apostó por eliminar la batería de pozos presentes en paralelo en la línea de costa -los cuales se veían a menudo afectados por los temporales de levante- y diseñar un sistema de captación submarino de agua completamente marina, más estable en cuanto a parámetros físico-químicos. Actualmente se explota el agua subterránea del acuífero profundo como agua dulce y de la desalinizadora, por lo tanto, hay una mezcla de aguas de abastecimiento que permiten no explotar tanto las reservas y no permanecer en sobreexplotación. Aun así, todavía hay una serie de conflictos relacionados con la buena gestión de los recursos hídricos y con la gestión del agua procedente de la desalinizadora del Tordera.

### *2.2.2 Problemática sobre la calidad de las aguas por salinidad*

La extracción de agua para los diferentes usos, sobre todo el doméstico durante la época estival, conlleva todavía un descenso de los niveles piezométricos, sobre todo en aquellas épocas en las que se sobreexplota por completo el acuífero profundo de la baja Tordera. Como se ha comentado previamente, una disminución del caudal de salida subterráneo al mar implica, por equilibrio entre diferentes masas de agua, una mayor penetración de la cuña salina. Así pues, durante el consumo de las reservas (sobreexplotación) se produce un avance de la cuña salina -intrusión marina- y la interfaz y se dan procesos de salinización de los acuíferos, con los consiguientes cambios en los procesos biogeoquímicos. Estos cambios sufren procesos de histéresis, dado que el retorno hacia condiciones iniciales es mucho más costoso económica y ambientalmente que el proceso propio de salinización.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 Obtención de datos**

Los datos obtenidos para la obtención de resultados en este trabajo han sido principalmente dos: a) los niveles piezométricos y b) la serie de precipitaciones diarias del período 2000-2017. Los primeros se han obtenido de la red de aplicaciones interactivas proporcionadas en el espacio web de la ACA, en concreto, la aplicación referente a los resultados del control de las masas de agua. Asimismo, en un muestreo convencional realizado en noviembre de 2015 en el delta del Tordera

con el grupo de Investigación en Geología Económica, Ambiental e Hidrología de la UB, se obtuvieron datos de conductividad eléctrica (CE) y la concentración de los iones minoritarios y mayoritarios del agua, los cuales fueron identificados y cuantificados por la técnica analítica HPLC en los Centros Científico-Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT-UB). Por otra parte, las precipitaciones diarias se han obtenido del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC-METEOCAT). Además, para la adquisición de los mapas meteorológicos, se ha recurrido a la base de datos de reanálisis de MetOffice.



*Fig. 2: Imagen espacial del área de estudio y de la distribución de los piezómetros. Los códigos representan el identificador de cada piezómetro. Fuente: aplicación VISSIR del ICGC.*

Los puntos de estudio, piezómetros o estación meteorológicas y, por tanto, los datos, se han escogido de acuerdo con los siguientes criterios: 1) la masa de agua de estudio (acuífero superficial y/o acuífero profundo), 2) proximidad al mar (determinante de la salinidad) y 3) cantidad y calidad de la base de datos para cada punto de estudio. Los puntos de estudio se recogen en la Tabla 1 y en la Fig. 2.

### 3.2 Tratamiento de los datos

Los datos han sido almacenados y tratados principalmente en hoja Excel, con la que se han realizado gráficos binarios en los que se relaciona la precipitación y la

Conductividad eléctrica. Por otra parte, se ha utilizado el paquete estadístico Statgraphics Centurion® X, con el que se han realizado los análisis de la varianza por medio de las tablas ANOVA y el análisis de correlaciones de Pearson por medio de los gráficos de dispersión 2D. Se ha utilizado el nivel de significación  $\alpha=0,05$ . Para efectuar el análisis estadístico entre pluviometría y nivel piezométrico se ha tenido en cuenta la precipitación acumulada en los 30 días anteriores al registro de niveles, y para la relación con los parámetros físico-químicos, la precipitación acumulada en los 3, 7, 14 y 30 días anteriores al registro del parámetro de estudio.

Código estación de estudio	Tipo estación	X	Y	Variable de estudio	cota topográfica (msnm)	Distancia al mar (km)
08110-0149	Piezómetro	481177	4611401	CE	1,5	0,608
17023-0083	Piezómetro	481166	4611815	NP	2,1	0,676
08110-0027	Piezómetro	480064	4611142	CE	2,3	0,690
08155-0096	Piezómetro	479956	4612845	CE	7,4	2,4
08110-0007	Piezómetro	480458	4610953	NP	1,1	0,467
08110-0180	Piezómetro	480458	4610954	NP	1,1	0,467
08100-0139	Piezómetro	479746	4611545	CE	4,0	1,1
UR	Pluviometro	479356	4610844	P <sub>d</sub>	1,9	0,450
WT	Pluviometro	479729	4610612	P <sub>d</sub>	2,2	0,170

*Tabla 1: Puntos de estudio en el acuífero fluviodeltaico del río Tordera. NP: Nivel piezométrico, CE: Conductividad eléctrica del agua, P<sub>d</sub>: Precipitación diaria acumulada. La distancia al mar está medida con un trazado en línea recta.*

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Relaciones entre precipitación y nivel piezométrico

Los resultados de la fig. 3 muestran una relación lineal entre la precipitación caída en el área más próxima al acuífero fluviodeltaico y el nivel piezométrico del mismo. Sin embargo, la relación entre ambas variables hidrometeorológicas es sólo estadísticamente significativa en el acuífero superficial con un p-valor=0,000 y una  $R^2=0,41$ . Las aguas del acuífero superficial tienen, por tanto, una relación más o menos directa con las aguas meteóricas, lo que sería lógico en un contexto de acuífero libre en el que su zona de recarga viene gran parte determinada por la infiltración de la precipitación sobre la superficie de la zona no saturada (flujos de agua verticales descendentes). La incertidumbre que presenta el medio natural, en cuanto a su estructura y a su predictibilidad hace que, a menudo, sea complicado

predecir el comportamiento de los hidrosistemas, tales como los acuíferos, entre otros. Es este hecho el que condiciona que frecuentemente, a pesar de que la correlación sea significativa, esta no sea muy elevada. Por ejemplo, el nivel piezométrico, si bien depende estrechamente de la aportación hídrica en forma de precipitación, también está vinculado a otras alternativas de recarga, como son el río o las conexiones hidráulicas con otras masas de agua subterráneas y/o superficiales (flujos horizontales y/o laterales). Tal y como establece la ACA (2002), la parte baja y media del río Tordera tiene un carácter influyente sobre el acuífero, por lo que cabe esperar que parte del modelo lineal sea explicado por este factor. Por otra parte, las extracciones de agua subterráneas modifican el campo de flujo, y, por lo tanto, el comportamiento natural del nivel freático y piezométrico. Es precisamente este último factor el que podría estar condicionando la ausencia de correlación significativa y, además, débil, con el acuífero profundo ( $R^2=0,12$ ). Las principales fuentes de abastecimiento de agua en la costa del Maresme Norte y Costa Brava Sur son las del acuífero fluviodeltaico profundo del Tordera; este hecho, tal y como se ha expuesto previamente, es aún más considerable durante la época estival por lo que es una variable que debería incluirse en el modelo estadístico. De forma adicional, cabe esperar que la respuesta del nivel piezométrico sobre el acuífero profundo, de tipo semi-confinado, tenga una cierta inercia y pérdida de señal con el tiempo respecto a las precipitaciones, teniendo en cuenta que la conexión hidráulica entre atmósfera y acuífero no es tan directa y participan otros factores.

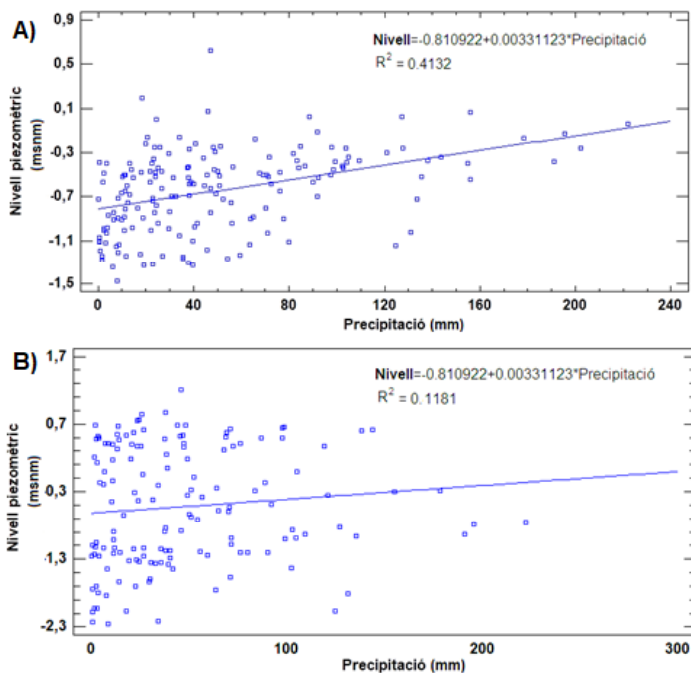


Fig. 3: Relación entre nivel piezométrico (msnm) vs. precipitación (mm) (WT, UR) en el acuífero fluviodeltaico A) superficial (08110-0007) y B) profundo (08110-0180) en el periodo 2000-2017.

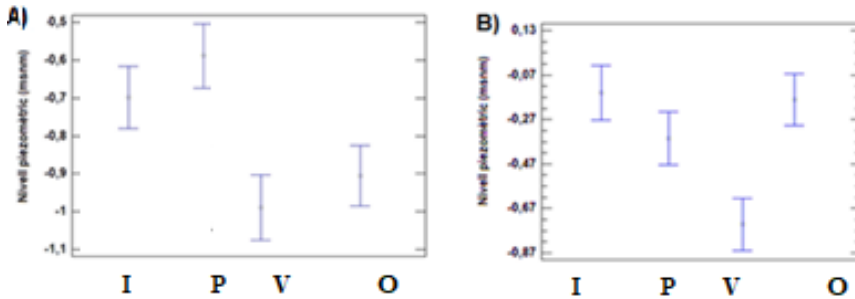


Fig.4: Gráfico de medias y dispersión en donde se muestra la relación entre nivel piezométrico (msnm) y la estación del año en el acuífero fluviodeltaico A) superficial (08.110-0007) y B) profundo (08110-0180) en el periodo 2000-2017. I: invierno, P: primavera, V: verano, O: otoño.

Se observa cómo, para ambos acuíferos, la estación del año que conlleva el menor nivel es, como cabría esperar en nuestro clima mediterráneo, el verano (Fig. 4). Además, la recarga de ambos acuíferos sería diferente: en el acuífero superficial la recuperación más importante se daría en primavera y otoño, las estaciones más lluviosas, y en el acuífero profundo en invierno y otoño. Nótese que una diferencia entre ambos acuíferos es que la primavera es la segunda estación que más contribuye a la recarga del acuífero superficial mientras que es el otoño en el acuífero profundo. Adicionalmente, se encontraron variaciones realmente significativas entre los niveles piezométricos en verano-otoño en el acuífero profundo a diferencia del acuífero superficial. Ambos resultados dan idea de que la extracción de agua en el acuífero profundo es repentina tanto en la puesta en marcha como en el cese de la extracción, por lo que la recuperación en este acuífero es rápida; en cambio, el acuífero superficial no presenta estas diferencias tan importantes porque depende de otros factores no tan vinculados a la extracción de agua como es la evapotranspiración, entre otros. Otro hecho es que, en primavera, donde se deberían dar también los picos de recarga más importantes como consecuencia de la mayor precipitación, no ocurren porque el acuífero profundo continúa con la inercia del otoño en invierno. Esto puede deberse al hecho de que el acuífero profundo no depende tanto de la precipitación en el área de estudio sino de la precipitación aguas arriba o del caudal circulante por el río. El carácter influyente del río estaría condicionando la recarga del acuífero profundo durante los meses de otoño e invierno en el Tordera medio; cuando el río se seca en primavera, el acuífero deja de recibir agua del río por lo que la única forma de recarga, a parte de la recarga lateral entre unidades acuíferas, sería la proveniente de las precipitaciones en el delta. Otro hecho remarcable en los resultados de esta figura es que, durante casi todo el año, el acuífero profundo tiene un mayor nivel piezométrico que el acuífero superficial, por lo que se estarían originando flujos verticales ascendentes que serían capaces de

atravesar el acuitado arcillo-limoso (materiales finos) que separa los dos acuíferos de tal manera que la hidroquímica y las propiedades fisicoquímicas del acuífero superficial durante esta época podrían quedar determinadas por las del acuífero profundo. De este modo, la entrada de la cuña salina en los años hidrológicos más secos o en las épocas más secas podría verse reflejada en el acuífero superficial.

### 5.1.2 Efectos de la desalinizadora sobre el estado cuantitativo

Existe una relación entre el caudal de producción de agua potable a partir de agua salada para la Instalación de Tratamiento de Aguas Marinas (ITAM) y el nivel piezométrico (Fig. 5). Los gráficos resultados de la tabla ANOVA muestran, con un p-valor=0,000 que, el aumento del caudal de producción de agua potable a partir de agua marina obligado por la sequía del 2007-2008 de 10 a 20 hm<sup>3</sup>, ha tenido un efecto altamente positivo en la recuperación de los niveles piezométricos en el acuífero fluviodeltaico superficial y profundo, especialmente en el segundo, donde la recuperación de los niveles ha sido de 1,5 m positivos aproximadamente. Los incrementos de los niveles piezométricos se ven reflejados en la fig. 6.

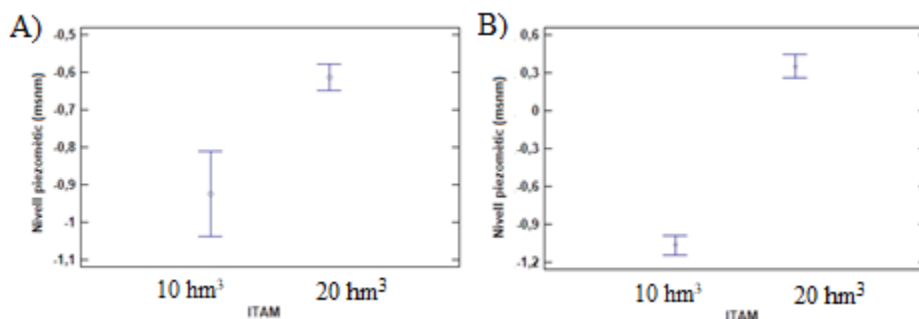


Fig. 5. Relación entre nivel piezométrico (msnm) y el funcionamiento de la ITAM estacional en el acuífero fluviodeltaico A) superficial (08110-0007) y B) profundo (08110-0180) en el periodo 2000-2017.

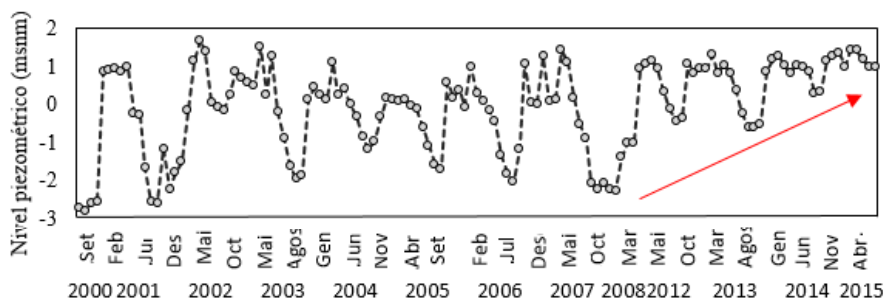


Fig. 6. Evolución del nivel piezométrico en el periodo 2000-2015 en el piezómetro 17023-0083 situado en el acuífero profundo. Fuente: propia a partir de datos de la ACA.

## 4.2 Diagnóstico general del estado actual del acuífero fluviodeltaico

El punto 08110-0180, a 680 m de la línea de la costa, presenta intrusión marina por su valor elevado en la relación  $rCl^-/rHCO_3^-$  ( $r=25,25$ ) debido a la alta concentración de cloruros ( $[Cl^-]=3095,4$  mg/L), asociada a un elevado contenido en sodio ( $[Na^+]=1790$  mg/L) y como consecuencia de su valor superior al del agua dulce en la relación  $rMg^{2+}/rCa^{2+}$  ( $r=2,21$ ). Esto lleva a definir el carácter de las aguas con una facies hidroquímica clorurada-sódica, típica del agua marina. Sin embargo, estos valores no fueron detectados en el punto 17023-0083, perteneciente al acuífero superficial, donde la facies es bicarbonatada-sódica, debido a que la relación  $rCl^-/rHCO_3^-$  fue baja ( $r=1$ ); esto denota el carácter influyente del río, que provoca la dilución de las sales. El carácter sódico de la última facies se debe a la composición del agua de lluvia (espray marino). Estos valores coinciden con los obtenidos por Mató (2015). El estado cualitativo del acuífero fluviodeltaico profundo del Tordera es relativamente bueno en referencia a la salinidad, ya que a pesar de que el piezómetro 08110-0180 tenga influencia por ascensión de la cuña salina, las concentraciones de cloruros y otros aniones y cationes mayoritarios son relativamente bajas. Además, hay también ausencia de salinidad en el acuífero superficial.

Así pues, actualmente, a pesar de la extracción de agua potable y regadío, la intrusión salina se mantiene en la costa con una reducción casi total respecto al año 2002 y los años de sequía. En el estudio de Regàs *et al* (2014) se explica que en 2002 el pico de intrusión marina en Malgrat de Mar llegó a su máximo, con concentraciones de cloruros de hasta 5000 mg/L y afirma que, a partir de entonces, con el funcionamiento de la planta desalinizadora, se han evitado nuevos procesos de intrusión. Por tanto, aunque en las últimas décadas se había inducido el proceso de intrusión de la cuña salina desde la sobreexplotación surgida del boom turístico en la costa Brava, la mejora en el estado cuantitativo, y, por tanto, el cualitativo, ha sido considerable.

#### 4.3 Relaciones entre precipitación y parámetros fisicoquímicos

En las fig. 7 y 8, correspondientes a dos piezómetros diferentes del acuífero confinado profundo, se observa cómo no hay un efecto de las precipitaciones sobre la conductividad eléctrica. Por lo tanto, no hay efecto en la salinidad del agua subterránea. Esto quiere decir que, considerando las precipitaciones que caen sobre la llanura aluvial del bajo Tordera, y teniendo en cuenta diferentes días de acumulación, no hay un efecto de dilución de sales. Esto puede ser consecuencia de dos factores no excluyentes: 1) que el agua que precipita tenga una conductividad similar a la del agua del acuífero como consecuencia del espray marino y 2) que los procesos geoquímicos de intercambio iónico hagan que nunca se alcancen concentraciones de sales más bajas.

El patrón observado en la fig. 7, no es seguido en la fig. 8 en la que se ilustra de forma gráfica las mismas relaciones que en la anterior figura, pero para el piezómetro 08110-0149, un piezómetro situado a 600 m en línea recta de la línea de la costa. Entre todas las posibilidades de correlación, la precipitación acumulada en 30 días ( $P_{30}$ ) es la que muestra una tendencia lineal más ascendente, es decir, una mayor precipitación conlleva un incremento sustancial de la conductividad eléctrica. Se ha obtenido, para esta última relación un  $R^2=0,40$  con un  $p$ -valor=0,000, por lo

que, se acepta que la relación es estadísticamente significativa con la siguiente relación lineal:

$$CE (\mu\text{S/cm}) = 1562,62 + 15,9176 * P_{30}$$

Teniendo en cuenta que, de todos los puntos de estudio en el que se tienen datos del quimismo de las aguas subterráneas, este (08110-0149) es el más cercano a la costa, parece deducirse que la influencia del mar es clara. Esto puede ser consecuencia de dos factores: 1) la salinización que sufrió el acuífero como consecuencia de la fuerte intrusión salina, con el máximo en 2002 (Regàs *et al.*, 2014), tiene aún huella en el material geológico de modo que, cuando llueve, los procesos de intercambio iónico hacen que, por el simple hecho de que el agua circule por el subsuelo, ésta se convierta en aún más salada; y 2) los episodios con mayor registro de precipitaciones, suelen estar asociados a vientos de componente este (E y NE) y, en general, fuerte oleaje. La afectación del oleaje sobre el acuífero profundo produciría que A) haya cierta conectividad hidráulica entre los acuíferos superficial-profundo y, por tanto, el agua salada al ser más densa que el agua dulce, tenga como destino final los compartimentos inferiores; y que, B) en las situaciones de inestabilidad aumente el nivel del mar -debido al oleaje ya la disminución de la presión atmosférica- y, por tanto, haya una mayor penetración de la cuña salina. Para verificar qué procesos se dan en esta zona donde se producen patrones inversos a los esperados, es importante recurrir al reanálisis de las situaciones sinópticas correspondientes al máximo de salinidad.

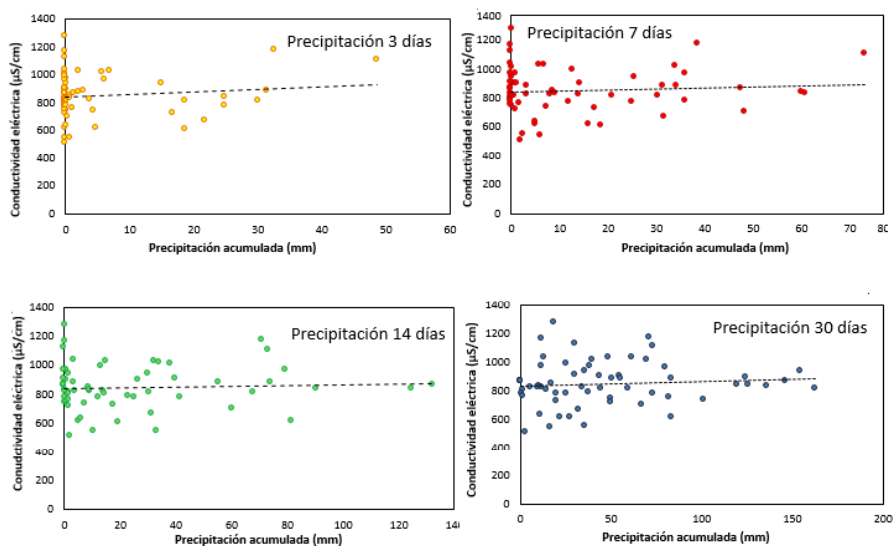


Fig. 7. Relación entre la precipitación acumulada (código estaciones: WT, UR) en Malgrat Mar y la conductividad eléctrica (CE) en  $\mu\text{S/cm}$  en el acuífero fluviodeltaico profundo del río Tordera en el piezómetro 08155-0096. Fuente: elaboración propia con datos públicos. Mediana CE: 837  $\mu\text{S/cm}$ , Media CE: 855  $\pm$  153,4  $\mu\text{S/cm}$ .

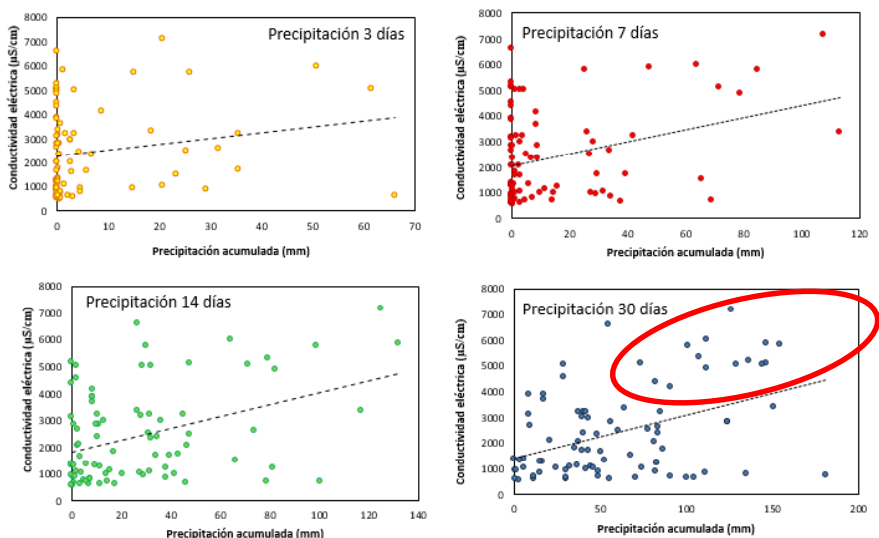


Fig. 8. Relación entre la precipitación acumulada (código estaciones: WT, UR) en Malgrat de Mar y la conductividad eléctrica (CE) en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el acuífero fluviodeltaico profundo del río Tordera en el piezómetro 08110-0149. Fuente: elaboración propia con datos públicos. Mediana CE:  $1802 \mu\text{S}/\text{cm}$ , Media CE:  $2432 \pm 1748,93 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 4.4 Situaciones sinópticas asociadas

En el gráfico de la fig. 8 donde se relaciona la  $P_{30}$  con la conductividad eléctrica, se observa que los puntos de máxima conductividad asocian a grandes rasgos, de acuerdo con Martín-Vide (1991), a situaciones sinópticas con una baja al mediterráneo. Durante estas situaciones, el viento del Este (E) o Noreste (NE), con alto contenido en energía, daría lugar al oleaje. Si este es suficientemente fuerte, puede penetrar por el delta, permitiendo pues la infiltración sobre el acuífero libre superficial y finalmente al profundo tal y como se explica en el apartado anterior. Algunas de las situaciones de E y NE para el 2001-2002 son: 19/12/2001, 06/03/2002, 04/04/2002, 07/05/2002, 28/05/2002, 12/06/2002, 08/06/2002, 02/07/2002, 27/08/2002.

#### 4.5 Limitaciones del trabajo de estudio

El trabajo presenta una serie de limitaciones, muchas de las cuales pueden ser resueltas con la prolongación del mismo. 1) Hay datos que no han podido ser adquiridos dado su escasez en la base de datos de la Agencia Catalana del Agua. Por un lado, es difícil encontrar en un mismo punto de estudio o piezómetro datos de niveles piezométricos y de calidad de las aguas, por lo que la relación entre estado cuantitativo y cualitativo, a menudo, se hace complicada. Por otra parte, durante la serie temporal hay algunos piezómetros y pozos que no registraron datos como consecuencia del desmantelamiento de la red de monitorización automática de la ACA fruto de la crisis económica a partir de 2008. 2) No se han contemplado en este

estudio los flujos laterales de aguas arriba o de zonas circundantes entre masas de agua, tanto del mismo río Tordera como de otros acuíferos circundantes, a fin de no complicar el modelo de estudio. La mayor incorporación de datos en el modelo conceptual implicaría la mejora del mismo y, probablemente, un aumento de la correlación como consecuencia de la incorporación de nuevas variables. 3) No se ha contemplado añadir un mayor número de estaciones meteorológicas para este estudio por el mismo motivo que en el anterior párrafo; lo ideal sería realizar polígonos de *Thiessen* y determinar las relaciones existentes entre la precipitación caída sobre todo el acuífero fluviodeltaico, teniendo en cuenta las diferentes estaciones meteorológicas, y los niveles piezométricos en cada piezómetro.

## 5. CONCLUSIONES

- i. La mejora en la cantidad de recurso hídrico desde el año 2002 en el acuífero fluviodeltaico del río Tordera, como consecuencia del uso de recursos no convencionales de agua, ha permitido la recuperación de la calidad de las aguas subterráneas, por regresión de la cuña salina que afectaba buena parte de la baja Tordera. Esta recuperación ha sido más marcada en el acuífero profundo ya que es el que mayormente presentó intrusión salina durante la sobreexplotación del mismo.
- ii. A partir de 2008, el aumento del volumen tratado por la desalinizadora (ITAM) de 10 a 20 hm<sup>3</sup> ha permitido la recuperación, casi total, del estado ecológico hasta el punto de que la masa de agua no presenta intrusión salina, y ésta queda restringida a los primeros metros desde la franja costera. Así lo indican las relaciones iónicas y la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas en diferentes puntos situados en la llanura sobre el acuífero fluviodeltaico.
- iii. Las relaciones de las variables hidrometeorológicas (precipitación y nivel piezométrico) es notable sobre todo en el acuífero superficial, por ser la masa de agua más expuesta a las aguas meteóricas ( $R^2=0,41$ ;  $p\text{-valor}=0,000$ ). En el acuífero profundo no presenta una relación estadística significativa ya que el nivel piezométrico depende también de otros factores no contemplados en el modelo, por ej. bombes de aguas subterráneas.
- iv. Los episodios de levante (E) y NE influyen aumentando la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas del acuífero fluviodeltaico del río Tordera, sobre todo del profundo; este sería el efecto contrario de lo que cabría esperar. Durante los episodios de levante se produce la entrada de aguas marinas hacia la llanura deltaica, induciendo así los procesos de salinización.
- v. El cambio climático afectará a la salinidad de los acuíferos tanto por la subida del nivel del mar, como por la posible entrada de agua salada en el continente como consecuencia de la severidad de los episodios meteorológicos. Esto, teniendo en cuenta la posible disminución de recursos hídricos, podría inducir de nuevo un aumento de la intrusión salina y la salinización de los pozos de abastecimiento, así como la afectación de los ecosistemas.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Instituto de Investigación del Agua (IdRA) de la UB por la otorgación de la beca APIF para realizar mi programa de doctorado en Ciencias de la Tierra. Me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento al actual director del IdRA, el Dr. Javier Martín-Vide, a la Dra. Diana Puigserver y a José María Carmona, mis directores de tesis doctoral. Por último, agradecer a la Agencia Catalana del Agua (ACA) y al Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC) por sus aportaciones de datos.

## REFERENCIAS

- Agencia Catalana del Agua (ACA) (2002). Planificación del espacio fluvial de la cuenca del Tordera Recogido de: <http://aca-web.gencat.cat/>
- Custodio, E., Llamas, R. (1976). Hidrología subterránea. Barcelona: Omega, DL.
- Falgàs E. et. al (2004). Geophysical characterization of a mediterranean coastal aquifer: the Baixa Tordera fluvio-deltaic aquifer unit (Barcelona, NE Spain), en *Groundwater and Saline Intrusion*, IGME. Cartagena: Ed. Araguás, Custodio and Manzano, pp.395-404. ISBN: 84-7840-588-7.
- Generalitat de Catalunya (2016). Tercer Informe sobre el Canvi Climàtic en Catalunya (TICCC). Departament de Territori i Sostenibilitat. Recogido de: <http://canviclimatic.gencat.cat>
- Regàs, O., Menció, A., Mas-Pla J. (2014). Evaluación de la gestión del agua subterránea en un acuífero costero mediante el balance hídrico. Universitat de Girona. Recogido de: <http://geocamb.udg.edu/wp-content/uploads/2014/09/Poster-Regas-Valencia-FINAL CORREGIT.pdf>