

Identificación de flujos entre acuíferos a nivel regional en base a datos hidroquímicos (Alt Empordà, NE España)

J. Mas-Pla^{1,2}, A. Menció¹, J. Bach³, X. García-Bernat¹, M. Galan¹, M. Boy-Roura¹,
C. Roqué¹, A. Folch⁴, D. Soler¹, M. Zamorano¹ y D. Brusí¹

¹ Grup de Geologia Aplicada i Ambiental (GAiA), Centre de Recerca en Geologia i Cartografia Ambiental (Geocamb), Departament de Ciències Ambientals, Universitat de Girona, España.

² Institut Català de Recerca de l'Aigua, Girona, España.

³ Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia, Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, España.

⁴ Grup d'Hidrologia Subterrània, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, Barcelona, España

Mail de contacto: josep.mas@udg.edu

RESUMEN

A escala regional, los flujos de agua subterránea entre formaciones hidrogeológicas condicionan su balance hídrico y, con él, su régimen de explotación. En este estudio se caracteriza la dinámica hidrogeológica a nivel regional de la depresión del Alt Empordà (Girona, NE España) en base a datos hidroquímicos, con el objetivo de identificar flujos de agua subterránea entre las formaciones que constituyen la zona de recarga (relieves circundantes) y la depresión. En este sistema, el ión sulfato resulta un trazador adecuado para identificar los procesos hidroquímicos y de mezcla que acontecen en esta zona. Los datos presentados sugieren que la presencia de sulfato, y por consiguiente la recarga, se debe a aportaciones de flujos profundos, en algunos casos desde las unidades geológicas inferiores, ajenas a la recarga local por precipitación desde la superficie.

Palabras clave: flujos regionales, hidroquímica, sulfato, Empordà.

ABSTRACT

At a regional scale, groundwater flow between aquifer systems controls their water budget and, therefore, its exploitation regime. This study characterizes the hydrogeology at a regional level of the Alt Empordà Basin (Girona, NE Spain). Our goal consists in recognizing recharge flowpaths, based on hydrochemical data, between the aquifer systems located in the ranges (recharge) areas and these within the basin. Sulfate stands as an appropriate tracer to identify hydrochemical as well as mixing processes and, therefore, recharge relationships. Field data suggest that sulfate occurrence is related to deep groundwater fluxes unrelated to the local rainfall recharge.

Keywords: regional flow, hydrochemistry, sulfate, Empordà.

Introducción

La gestión del agua subterránea en Europa, basada en la Directiva marco del agua (DMA, Directiva 2000/60/CE) se basa en la caracterización de las distintas masas de agua para las cuales debe definirse un plan de gestión. Esta planificación comprende, entre distintos aspectos, un balance hídrico del sistema en el que los flujos subterráneos entre distintas masas de agua limitótrofos deben cuantificarse, ya sea como recarga o descarga. Ello permite definir, finalmente, su régimen de explotación, a la vez que prevenir impactos no deseados en otras masas, ya sean superficiales o subterráneas.

Sin embargo, el intercambio subterráneo entre masas de agua a escala regional es una tarea difícil de identificar. La complejidad geológica, especialmente aquella de tipo estructural, y la falta de suficientes puntos de muestreo impiden trazar piezometrías precisas que definan las relaciones de flujo entre masas de agua, especialmente cuando éstos pueden tener una componente vertical importante. Es por ello que el uso de datos hidrogeoquímicos se presenta como una herramienta útil para establecer estas relaciones y contribuir al diseño del modelo conceptual del sistema hidrogeológico regional necesario para asesorar la gestión del mismo.

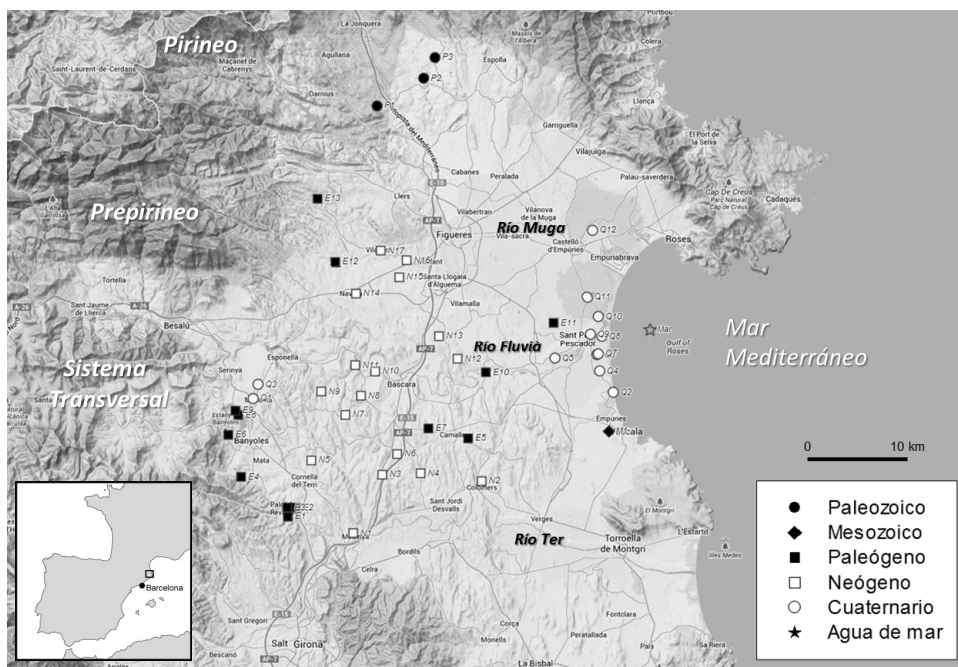


Figura 1. Situación geográfica/estructural de la depresión del Empordà y ubicación de los puntos de muestreo, diferenciados por edad geológica de los acuíferos, indicada por los símbolos y las iniciales: P, Paleozoico, M: Mesozoico, E: Paleógeno, N: Neógeno y Q: Cuaternario).

En esta contribución se interpretan los resultados obtenidos en distintos pozos profundos en la depresión del Alt Empordà (Girona, NE España; Fig. 1). El objetivo consiste en identificar y caracterizar, mediante datos hidroquímicos, las relaciones de flujo regionales entre las formaciones hidrogeológicas de las zonas de recarga (en los relieves circundantes) y las de la propia depresión, otorgando especial atención al papel de las estructuras tectónicas que definen la estructura geológica de esta zona.

Desde una perspectiva de gestión hidrológica, se considera la posibilidad de que estos flujos regionales puedan considerarse una alternativa a la explotación de los acuíferos superficiales (niveles aluviales y fluvio-deltaicos) actualmente afectados por presiones humanas, como la contaminación por nitratos y, en las zonas litorales, por la intrusión marina.

Por esta razón, se han considerado únicamente aquellos pozos de suministro con profundidades entre 50 y 150 m, aproximadamente, con la intención de caracterizar los flujos a gran escala, evitando la influencia de la

relación entre agua superficial y subterránea y la distorsión que la contaminación generalizada de los acuíferos más superficiales produce en la composición química de los recursos.

Contexto hidrogeológico

La depresión del Empordà se originó durante la etapa distensiva posterior a la orogénesis alpina, que dio lugar a la formación del Pirineo, y se halla asociada al desarrollo del Mediterráneo occidental a partir del Neógeno. Está limitada por el Pirineo, al Norte, y por el Prepirineo y Sistema Transversal, al Oeste. Este estudio comprende la zona norte de la depresión (Alt Empordà), separada de la mitad sud por los relieves de los materiales sedimentarios neógenos que la rellenan y por el río Ter. En la zona litoral, se hallan las formaciones fluvio-deltaicas de los ríos Fluvià y Muga (Fig. 1; para mayor detalle geológico, consúltense los mapas E 1:25.000 en IGC, 2013).

En este contexto se han identificado las siguientes unidades geológicas:

- Unidad pirenaica, correspondiente a la zona axial, formada por rocas ígneas y

metamórficas del Paleozoico, con importantes alineaciones estructurales resultantes de la orogénesis varisca. Constituye una extensa zona de recarga, caracterizada por la baja permeabilidad de sus materiales. La principal explotación se asocia a zonas de fractura.

- Unidades Prepirenaica y Sistema Transversal, constituidas por rocas sedimentarias, principalmente de edad paleógena; si bien también incluyen materiales mesozoicos en forma de láminas de cabalgamiento. El Prepirineo, de carácter alóctono, presenta una estructura geológica compleja a raíz de la orogénesis alpina; en tanto que el Sistema Transversal constituye el antepais autóctono. Hidrogeológicamente, los niveles acuíferos están determinados por la sucesión litoestratigráfica, ubicándose en calizas y areniscas, con importantes niveles confinantes constituidos por arcillas y margas. La geometría finita de estos acuíferos se halla determinada por la estructura tectónica. El sistema hidrogeológico cárstico de la cuenca lacustre de Banyoles, situado en el límite occidental de la zona de estudio y caracterizado por la presencia de importantes formaciones evaporíticas, se enmarca en esta unidad (Sanz, 1985).
- La depresión tectónica del Empordà se formó durante el Neógeno a partir de fallas distensivas que la separan de las unidades anteriores. En su interior, aparecen diversas unidades: 1) los materiales paleógenos que constituyen el sustrato afloran en la zona central dando lugar a una serie de acuíferos confinados y semiconfinados, afectados por fracturación; 2) los sedimentos neógenos son de tipo aluvial en la franja próxima a los relieves y de tipo fluvial y litoral hacia el Este, resultantes de la evolución tectónica de la depresión; los niveles acuíferos se ubican en los niveles detríticos con sedimentos más gruesos (gravas, arenas) lateralmente discontinuos; y 3) las formaciones fluvio-deltaicas cuaternarias de los ríos Fluvià y Muga, se desarrollaron a partir de las variaciones eustáticas más recientes, y recubren las unidades citadas anteriormente. Presentan acuíferos semiconfinados en los niveles inferiores, y libres en los superiores (Bach, 1986, 1991; Zarroca et al., 2011)).

Dado el origen tectónico de la depresión, las principales fallas, así como los demás rasgos estructurales se consideran elementos hidrogeológicos relevantes.

Metodología

El estudio se basa en los datos hidroquímicos de 47 pozos, todos ellos en activo, representativos de las unidades geológicas mencionadas. El muestreo se realizó entre marzo y mayo de 2013. En este estudio se basa en datos de los elementos/compuestos mayoritarios.

Los valores de conductividad eléctrica (CE), pH, potencial redox y oxígeno disuelto se midieron in situ. La alcalinidad se analizó mediante la titración de Gran. Los aniones (SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^-) y los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) por cromatografía iónica.

Resultados

La representación de los distintos iones mayoritarios en el diagrama de Piper-Hill muestra la existencia de diversos grupos de muestras en el sistema hidrogeológico (Fig. 2). Se identifican:

- A. El polo correspondiente a la unidad pirenaica, con una facies de tipo bicarbonatado-sódico, con valores de CE inferiores a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- B. El polo correspondiente al sistema hidrogeológico Prepirineo-Banyoles, en materiales paleógenos, con una facies sulfatada-cálcica. Los valores de CE oscilan entre 800 y 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, condicionada por la disolución de anhidrita y yeso en el sustrato.
- C. Las muestras ubicadas en los materiales paleógenos y neógenos del interior de la depresión abarcan un amplio rango en la facies bicarbonatada-cálcica, con porcentajes significativos de sulfato y cloruro, presentando una notable dispersión en el diagrama. Las muestras correspondientes a litologías paleógenas muestran una CE entre 600 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en tanto que las pertenecientes a litologías neógenas poseen valores de CE inferiores (450-700 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- D. Finalmente, las muestras procedentes de los materiales cuaternarios de la llanura fluvio-deltaica de los ríos Fluvià y Muga presentan una facies sulfatada-cálcica, o bien clorurada-sódica en aquellas con una mayor influencia de la intrusión marina (Bach, 1991). Los valores propios de CE se hallan entre 500 y 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, exceptuando aquellas muestras cercanas al litoral cuya CE asciende hasta 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por efecto de la intrusión marina. Las muestras asociadas a los depósitos travertínicos pliocuaternarios de Banyoles (Q1, Q3) son

de tipología sulfatada/bicarbonatada-cálcica, resultante de la recarga subterránea de estos pozos asociada al sistema Prepirineo-Banyoles, y a la litología carbonatada de los depósitos. Su CE es de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Dentro de este esquema general, se observan distintas relaciones al considerar al ión sulfato como trazador de la hidrogeoquímica del sistema. La presencia de sulfato se relaciona principalmente con las formaciones evaporíticas paleógenas que, juntamente con los niveles carbonáticos inferiores, dan lugar al sistema

cárstico que enlaza el Prepirineo con la cuenca lacustre de Banyoles en el borde occidental de la depresión. Asimismo, estos materiales paleógenos constituyen el substrato de los depósitos neógenos, y localmente de los cuaternarios en la depresión. Además, también existen los niveles evaporíticos del Triásico superior (facies Keuper), los cuales han tenido un rol importante en la tectónica relacionada con la formación del Pirineo, especialmente con los mantos de corrimiento desplazados hacia el sur.

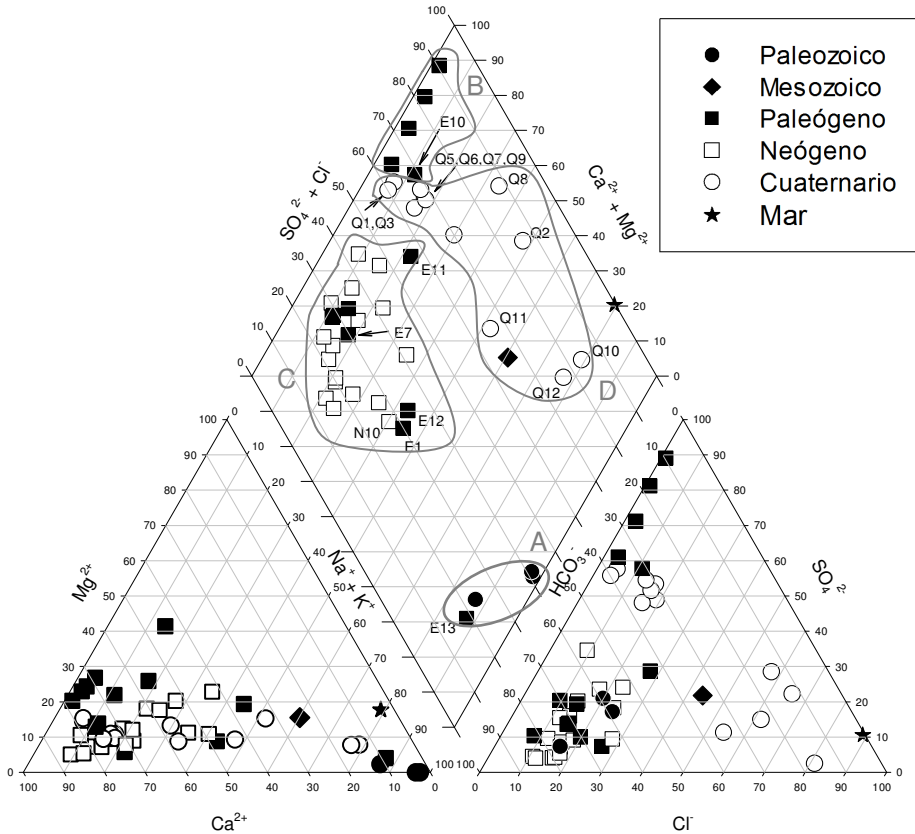


Figura 2. Diagrama de Piper-Hill de las muestras clasificadas por el tipo de acuífero al que pertenecen, según su edad geológica. El dato de agua de mar corresponden a una muestra del litoral de la zona de estudio (Golfo de Rosas, Mar Mediterráneo; Kruse y Mas-Pla, 2009).

En este sentido, tanto en los relieves circundantes donde se origina la recarga, como el substrato de la depresión del Empordà, existen litologías que justificarían la presencia elevada de sulfato en el agua subterránea a las profundidades alcanzadas por las captaciones. Cabe considerar también la influencia del río Fluvià con una concentración media de sulfato de 240 mg/L en su entrada a la llanura fluviodeltaica (estación de muestreo de Esponellà, ACA, 2013). La recarga procedente del río debe modificar el quimismo de los acuíferos superiores en los depósitos cuaternarios y posiblemente también el de los niveles inferiores, de tipo semiconfinado, dada la conexión entre ambos en la zona proximal de esta formación y el efecto de bombeo de las captaciones más profundas (Batlle et al., 1994).

Concretamente, la relación entre los iones calcio y sulfato muestran una composición hidroquímica dominada por la disolución de anhidrita y yeso en las muestras en materiales paleógenos del sistema Prepirineo-Banyoles (grupo B en Fig. 1) y en las muestras de las formaciones fluvio-deltaicas recientes (Q5, Q6, Q7, Q9), todas ellas con una relación Ca/SO_4 , expresada en meq/L, próxima a 1.0 (Fig. 3).

Las muestras en materiales paleógenos situadas en el interior de la depresión, y lejanas por tanto del sistema Prepirineo-Banyoles, presentan composiciones hidroquímicas diversas que deben interpretarse según su emplazamiento. Las captaciones E5 y E7 se hallan ubicadas en los materiales paleógenos que constituyen el substrato de las formaciones neógenas y ambas presentan la facies bicarbonatada-cálcica habitual. Sin embargo, las otras muestras en materiales paleógenos exhiben variaciones hidroquímicas atribuibles a su emplazamiento geológico. De este modo, el carácter sulfatado-cálcico de E10 se atribuye a la presencia de rocas evaporíticas relacionadas con las fracturas del substrato. La muestra E12 presenta un notable porcentaje de cloruro (27%; 54 mg/L) y de sodio (43%, 68 mg/L). Su contenido en cloruro se atribuye a procesos de polución antrópica, asociado a la presencia de nitrato (18 mg/L). El contenido en sodio se explica mediante procesos de intercambio catiónico. Finalmente, la muestra en materiales paleógenos E13 se distingue de las otras muestras por presentar una tipología hidroquímica similar a la de los materiales paleozoicos. La elevada proporción de sodio (87%; 171 mg/L) en esta muestra es más propia de la interacción agua-roca en materiales plutónicos que solamente de los cambios derivados de un intenso intercambio catiónico

en los niveles arcillosos paleógenos que, obviamente, constituyen acuícludos con escasa participación en el sistema de flujo.

El contenido en sulfato en los pozos ubicados en formaciones neógenas muestra un amplio rango de concentración, según la hidroquímica proceda de la disolución de calcita o anhidrita. La distribución de sulfato en los depósitos sedimentarios neógenos no muestra ninguna tendencia espacial influenciada por su proximidad al sistema Prepirineo-Banyoles.

Es significativo el hecho que cuatro de las captaciones localizadas en formaciones fluvio-deltaicas muestren elevadas concentraciones de sulfato (hasta 200 mg/L), pero bajas concentraciones de cloruro. Dado el carácter detrítico de estas formaciones no se considera probable que la disolución de minerales sulfatados se realice in situ, atribuyéndose su presencia al quimismo del agua de recarga. Asimismo, la baja concentración de sodio descarta la influencia marina, ya sea por intrusión desde el mar como desde el río Fluvià cuyo tramo inferior presenta una elevada salinidad (Mas-Pla et al., 1999a; ACA, 2013). Sin embargo, las proporciones iónicas del río Fluvià, al inicio de la llanura aluvial (ACA, 2013) indican su posible influencia en las aguas subterráneas.

En relación a la concentración de cloruro, diversas captaciones muestran la influencia de la intrusión marina, con concentraciones elevadas y equivalentes en cloruro y sodio (Fig. 4). El resto presentan valores de cloruro inferiores a 70 mg/L, con una mayor proporción de sodio debida a procesos de intercambio catiónico en los niveles arcillosos presentes en las formaciones sedimentarias paleógenas, neógenas y cuaternarias.

La abundancia en sodio destaca en la facies bicarbonatada-sódica de las muestras correspondientes a acuíferos en litologías ígneas y metamórficas y, excepcionalmente, en la muestra E13 obtenida en una captación en materiales paleógenos. Este tipo de facies es habitual en materiales ígneos con elevados tiempos de residencia que favorecen la disolución de silicatos y la pérdida por adsorción del calcio en beneficio del sodio.

El contenido de nitrato presenta una distribución bimodal. Un primer grupo de muestras presenta una concentración media de 8.5 ± 1.3 mg/L NO_3^- (~ 0.14 meq/L), atribuible a condiciones mínimamente influenciadas por actividades agrícolas. Un segundo conjunto de muestras, con una media de 65.7 ± 8.1 mg/L NO_3^- (~ 1.04 meq/L; Fig. 4), comprende captaciones perforadas en materiales paleógenos y neógenos.

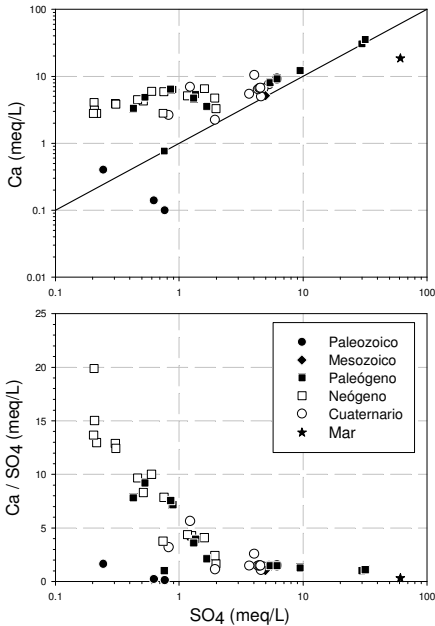


Figura 3. Relaciones iónicas correspondientes a la disolución de rocas evaporíticas (anhidrita y yeso) en los distintos acuíferos, según su edad geológica.

Es llamativa la baja concentración de nitrato en los pozos de la llanura fluvio-deltaica, a pesar de la intensa actividad agrícola que se desarrolla en superficie. Estas muestras que proceden del acuífero inferior, de carácter semiconfinado, indican una baja vulnerabilidad del mismo a la contaminación por nitrato.

A nivel hidráulico, ello sugiere una influencia limitada de la recarga vertical actual (ya sea natural o inducida por bombeo) hacia estos niveles fluvio-deltaicos inferiores a través de los acuitardos que los separan de los acuíferos libres superficiales (Mas-Pla et al., 1999b), o bien a procesos de atenuación natural del nitrato.

Discusión y conclusiones

Los datos hidroquímicos expuestos en el apartado precedente ponen de manifiesto las relaciones de flujo entre las distintas formaciones acuíferas usando como trazador el

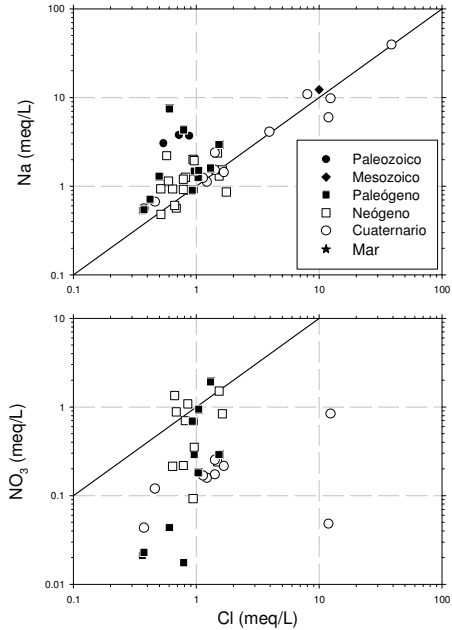


Figura 4. Relaciones iónicas de cloruro con sodio y nitrato para distinguir la influencia de la intrusión marina y de la contaminación por actividad ganadera respectivamente. Las muestras con concentraciones de nitrato inferiores a 6 mg/L (~0.01 meq/L) no se han representado.

contenido de sulfato en las distintas muestras de agua subterránea. El origen del sulfato, procedente de la disolución de rocas evaporíticas, se asocia al sistema hidrogeológico Prepirineo-Banyoles que se desarrolla en el borde oeste de la depresión del Empordà, y a la presencia de yesos del Triásico asociado a los mantos de cabalgamiento de materiales mesozoicos que se ubican en el sustrato de la depresión y afloran localmente en determinados parajes de la zona de estudio.

Ello sugiere que la presencia de facies sulfatada-cálcicas en formaciones hidrogeológicas carentes de este tipo de litologías debe atribuirse a flujos regionales, profundos, procedentes de los contactos geológicos laterales o del sustrato. Éste es el caso de las captaciones en materiales neógenos. Para los acuíferos fluvio-deltaicos también debe considerarse la infiltración de aguas superficiales del río Fluvià como origen del sulfato.

Del mismo modo, las facies bicarbonatadas-sódicas detectadas en el pozo E13, similares a las observadas en rocas cristalinas, apuntan la existencia de estructuras geológicas profundas que permite la recarga de las formaciones suprayacentes. Cabe mencionar que esta recarga procede de niveles acuíferos inferiores situados a profundidades no precisadas, pero que se estiman muy superiores al alcance de los pozos más profundos.

En conclusión, los datos hidroquímicos han permitido discernir la existencia de flujos profundos, posiblemente con una componente vertical ascendente importante, del efecto de otras entradas al sistema, como son la precipitación o la intrusión marina. Concretamente, algunas de las captaciones muestreadas evidencian que una parte notable de los recursos explotados no procede de la precipitación resultante en el área inmediata a su emplazamiento, sino de flujos regionales cuya recarga tiene lugar en los relieves circundantes a la depresión del Alt Empordà.

Estos resultados deben considerarse con la debida prudencia, debiendo ser verificados posteriormente mediante estudios hidroquímicos de mayor detalle y con el uso de isótopos, tales como ^{18}O y deuterio, para discernir el origen de la recarga, y por ^{34}S para ilustrar la procedencia del sulfato y, con ello, verificar el modelo geológico que sustenta esta interpretación hidrogeológica.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Gobierno de España, CGL-2011-29975-C04-04. Los autores agradecen a las empresas Prodaisa y Sorea las facilidades para el muestreo de las captaciones.

Referencias

- ACA 2013. *Consulta de datos hidrológicos en línea*. Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya. <http://aca-web.gencat.cat/aca/>. [Consulta: Mayo 2013].
- Bach J. 1986. Sedimentación holocena en el litoral emergido de "l'Alt Empordà" (NE de Catalunya), *Acta Geologica Hispánica*, 21 - 22, 195-203.
- Bach J. 1991. *L'ambient hidrogeologic de la plana litoral de l'Alt Empordà (NE de Catalunya)*. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.
- Battle A., Bach J., Murillo, J.M. 1994. Implicaciones ambientales de la contaminación de las aguas subterráneas en el Parque Natural de los "Aiguamolls de l'Empordà" (Girona).

En: AIH-GE, *Análisis y evolución de la contaminación de las aguas subterráneas*, Tomo II, pp. 265-282.

- IGC 2013. *Catàleg de cartografia geològica i geotèrmica*. Institut Geològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya. <http://www.igc.cat>. [Consulta: Mayo 2013].
- Kruse, E. y Mas-Pla, J. 2009. Procesos hidrogeológicos y calidad del agua en acuíferos litorales. En: Mas-Pla J. y G.M. Zuppi (ed.). *Gestión ambiental integrada de la zonas costeras*. Rubes Editorial, pp. 29-54.
- Mas-Pla J., Montaner J. y Solà J. 1999a. Groundwater resources and quality variations due to gravel mining in coastal streams. *Journal of Hydrology*, 216 (3/4): 197-213.
- Mas-Pla J., Bach J., Viñals E., Trilla J. y Estalrich J. 1999b. Salinization processes in a coastal leaky aquifer (Alt Empordà, NE Spain). *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans & Atmosphere*, 24(4):337-341.
- Sanz M. 1985. *Estudi hidrogeològic de la regió de Banyoles-Garrotxa*. Quaderns del Centre d'Estudis Comarcals de Banyoles. 125pp.
- Zarroca M., Bach J., Linares R. y Pellicer X.M. (2011). Electrical methods (VES and ERT) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region (Alt Empordà, Northern Spain). *Journal of Hydrology*, 409(1-2): 407-422.