

RESEARCH ARTICLE

## Hydrodynamics of the coastal springs of the Sierra de Irta after torrential precipitation events. Maestrazgo Aquifer (Castellón)

### *Hidrodinámica de las surgencias costeras de la sierra de Irta tras eventos de precipitación torrencial. Acuífero de El Maestrazgo (Castellón)*

José Antonio Domínguez Sánchez<sup>1</sup>, Silvia Rosado Piqueras<sup>1</sup>, Miguel Mejías Moreno<sup>2</sup>, Bruno José Ballesteros Navarro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Unidad de Valencia

<sup>2</sup> Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas 23, 28003 Madrid

**Corresponding author:** ja.dominguez@igme.es (José Antonio Domínguez Sánchez)

### ABSTRACT

#### Key points

Under significant rain, springs of Playa de las Fuentes Centro, Torre Badum and Playa del Carregador rapidly reduce their saline content

Under significant rain, springs of Playa de las Fuentes Sur, Playa del Pebret and Playa del Russo, respond with a piston effect

Under significant rain, Font de Dins spring drains through channels without contact with marine waters (does not show notable alterations)

The Maestrazgo is a karst aquifer of more than 2400 km<sup>2</sup> that occupies the northern half of the province of Castellón. Its main discharge area is in the coastal sierra of Irta, between the towns of Alcocebre and Peñíscola. On the coastline of this carbonate elevation, there are several springs, permanent (Playa de las Fuentes Centro, Torre Badum y Font de Dins) and occasional (Playa del Carregador, Playa de las Fuentes Sur y Norte, Playa del Pebret y Playa del Russo), which can be grouped into different types depending on their chemical characteristics. This diversity is due to underground flow through preferential circulation conduits that may be more or less interconnected with each other and more or less affected by marine waters. Significant events of precipitation, on a local and / or regional scale, in addition to causing the appearance of occasional springs, temporarily modify the hydrochemistry of permanent upwellings. The springs of Playa de las Fuentes Centro, Torre Badum and Playa del Carregador rapidly reduce their saline content, while the springs of Playa de las Fuentes Sur, Playa del Pebret and Playa del Russo, respond with a piston effect and initially, the more saline waters that occupy the conduits of the environment near the springs are drained until they are replaced by those of a continental nature. Finally, the Font de Dins spring drains through channels without contact with marine waters, so it does not undergo notable alterations in its composition due to their influence, although its relationship with the detrital aquifer of Vinarós-Peñíscola alters its usual hydrochemistry.

**Keywords:** Coastal aquifers; Hydrodynamics; Irta; Maestrazgo; Upwellings.

#### Article History:

Received: 02/06/2020

Accepted: 15/09/2021

### RESUMEN

#### Puntos clave

Bajo fuerte precipitación, los manantiales de Playa de las Fuentes Centro, Torre Badum y Playa del Carregador reducen su contenido salino

Bajo fuerte precipitación, los manantiales de Playa de las Fuentes Sur, Playa del Pebret y Playa del Russo, responden con un efecto pistón

Bajo fuerte precipitación, el manantial de Font de Dins drena a través de canales sin contacto con aguas marinas, escapando a su influencia

El Maestrazgo es un acuífero kárstico de más de 2400 km<sup>2</sup> que ocupa la mitad septentrional de la provincia de Castellón. Su principal área de descarga se encuentra en la sierra costera de Irta, entre las localidades de Alcocebre y Peñíscola. En el frente litoral de esta elevación carbonatada se sitúan varios manantiales de carácter permanente (Playa de las Fuentes Centro, Torre Badum y Font de Dins) y otros de carácter ocasional (Playa del Carregador, Playa de las Fuentes Sur y Norte, Playa del Pebret y Playa del Russo), que se pueden agrupar en distintos tipos en función de sus características químicas. Esta diversidad se debe a que el flujo subterráneo se orienta a través de conductos de circulación preferencial que pueden estar más o menos interconectados entre sí, y más o menos afectados por aguas de origen marino. Eventos significativos de precipitación, a escala local y/o regional, además de provocar la aparición de manantiales ocasionales, modifican temporalmente la hidroquímica de las surgencias permanentes. Los manantiales de Playa de las Fuentes Centro, Torre Badum y Playa del Carregador reducen rápidamente su contenido salino, mientras que los manantiales de Playa de las Fuentes Sur, Playa del Pebret y Playa del Russo, responden con un efecto pistón que hace que inicialmente se drenen las aguas más salinas que ocupan los conductos del entorno próximo a las surgencias hasta que son reemplazadas por las de carácter continental. Por último, el manantial de Font de Dins drena a través de canales sin contacto con aguas marinas, por lo que no sufre alteraciones reseñables en su composición debidas a la influencia de estas, si bien su relación con el acuífero detrítico de Vinarós-Peñíscola altera su hidroquímica habitual.

**Palabras clave:** Acuíferos costeros; Hidrodinámica; Irta; Maestrazgo; Surgencias.

#### Historial del artículo:

Recibido: 02/06/2020

Aceptado: 15/09/2021

### 1. Introducción y objetivos

El acuífero de El Maestrazgo se extiende por los dos tercios septentrionales de la provincia de Castellón (España). Se recarga casi exclusivamente por infiltración del agua de lluvia. Constituye un sistema kárstico litoral debido a que las principales descargas se producen a lo largo del frente costero de la sierra carbonatada

de Irta, donde varios flujos subterráneos se canalizan a través de conductos de circulación preferencial (Domínguez, J.A. y Ballesteros, B.J. 2012) dando lugar a una serie de manantiales (Las Fuentes, Torre Badum, Font de Dins y Prat de Peñíscola) que drenan directamente al mar (Figura 1).



Figura 1. Situación del área de estudio.

Figure 1. Situation of the study area.

Tras lluvias torrenciales, aparecen nuevas surgencias de carácter ocasional en las playas del Carregador, las Fuentes, Russo y Pebret (Domínguez *et al.*, 2022), que drenan el acuífero durante varios días o semanas en los que se producen modificaciones significativas en su hidroquímica.

Desde el año 2006 el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), dentro del proyecto “Redes de Observación Hidrogeológica e Inventario de Manantiales”, ha realizado más de 70 campañas de muestreo y toma de datos de las aguas subterráneas del acuífero de El Maestrazgo en general y de las surgencias y captaciones del entorno de la sierra de Irta en particular. Estos trabajos han permitido ampliar la información hidrogeológica de la zona (Domínguez *et al.* 2016) y caracterizar hidroquímicamente las aguas subterráneas (IGME-CONSULMINA, 2006; Ballesteros *et al.*, 2007b). Estudios más recientes (Domínguez *et al.*, 2022) se han centrado en el comportamiento hidroquímico de las surgencias permanentes y ocasionales de la sierra de Irta durante un estadio temporal considerado “de hidrodinámica estable en aguas altas”, cuyos resultados permiten agruparlas en cinco tipos distintos según su contenido en iones mayoritarios.

El presente artículo complementa al anterior y profundiza en la hidrodinámica de dichos manantiales a partir de las variaciones de su quimismo provocadas por los episodios de precipitaciones torrenciales.

## 2. Metodología

Para el análisis se toman dos muestras de referencia en campañas en las que todos los manantiales se encuentran activos. La primera, correspondiente a la campaña de muestreo del 23 de octubre de 2018, es representativa de una situación de brusca alteración hidrodinámica caracterizada por concentraciones iónicas excepcionales. La segunda campaña, realizada el 11 de noviembre del mismo año, es representativa de una situación hidrodinámica estable de aguas altas con contenidos iónicos más habituales.

Tras un prolongado periodo de escasas precipitaciones, que abarca todo el año 2017 y la práctica totalidad del 2018, en el cual solo drenan las surgencias permanentes de la sierra de Irta, se produce un episodio de lluvias torrenciales muy significativo, entre el 17 y el 19 de octubre de 2018, que activa de forma brusca todos los manantiales. Los registros de precipitación

facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) recogen para la estación termo-pluviométrica de Torreblanca una lluvia acumulada en esos días de 349 L/m<sup>2</sup>; en la de Alcalá de Xivert se contabilizan 200 L/m<sup>2</sup> y en la de Benicarló, 310 L/m<sup>2</sup>. Entre el muestreo de octubre y el de noviembre apenas se produjeron lluvias, concentradas principalmente el día 30 de este último mes, con un total de 21,5 L/m<sup>2</sup> (valor promedio de los registros en las estaciones de Alcalá de Xivert y Benicarló).

El estudio se centra en la evolución de las concentraciones de los elementos mayoritarios entre los dos estadios de referencia, es decir, entre un momento en el que repentinamente se modifica la hidrodinámica de la zona costera del acuífero, con todos los manantiales drenando caudales significativos y con concentraciones iónicas con valores máximos y mínimos destacados, y un contexto hidrodinámico más estabilizado, al que se llega tras varias semanas en las que no se producen precipitaciones o estas son poco significativas, y en el que las concentraciones iónicas fijan registros más próximos a la media.

Para determinar la influencia de la intrusión marina en los flujos continentales se presta especial atención, por un lado, a iones característicos del agua marina (Cl, Na, Mg) junto con la conductividad eléctrica (CE) y, por otro, a elementos propios de aguas dulces continentales y/o indicativos de contaminación por actividades agrícolas (NO<sub>3</sub>).

## 3. Marco hidrogeológico

El acuífero de El Maestrazgo se sitúa en el sector oriental de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, en su zona de transición hacia las Cadenas Costeras Catalanas. Tectónicamente incluye parte de la zona Central Subtabular y de la zona Oriental Fallada definidas por Canerot (1974). Tiene una extensión de unos 2.400 km<sup>2</sup> en los que afloran materiales que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cenozoico, con predominio de litologías carbonatadas y, en menor medida, detríticas. Un 30% de los afloramientos permeables los componen calizas y dolomías del Lías-Dogger y dolomías del Kimmeridgiense superior-Portlandiense y Valanginiense. Este conjunto carbonatado de entre 1.100 y 1.500 m de potencia presenta las mejores características hidrodinámicas y constituye el acuífero principal (Mejías *et al.*, 2007). En captaciones cercanas a

la costa se han establecido transmisividades de entre 1.000 y 4.000 m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup> (ITGE, 1989), caudales medios de explotación comprendidos entre 50 y 100 L s<sup>-1</sup> y caudales específicos entre 5 y 10 L s<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>. La modelación matemática llevada a cabo en algunos estudios (COPUT, 1990 y 1992) eleva dichas transmisividades hasta los 9.000 y 15.000 m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>. Ensayos de bombeo realizados en sondeos de la sierra de Irta en 2007 fijan valores de transmisividad del orden de 3.000 m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>, con caudales específicos de entre 5 y 60 L s<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup> para las formaciones jurásico-cretácicas. Otros tramos permeables, independientes del anterior, son los constituidos por los tramos de calizas del Aptiense y las calizas del Cenomaniense-Senoniense. Estos niveles generan acuíferos de menor entidad, de naturaleza detrítica o carbonatada, caracterizados por ocupar una extensión restringida y/o por albergar niveles elevados y colgados sobre la superficie piezométrica regional (Figura 2).

El impermeable de base lo constituyen las arcillas y margas con yesos de la facies Keuper, localizadas a gran profundidad en la mayor parte del acuífero, si bien, llegan a aflorar en la sierra Espaniguera (Antón Pacheco et al., 2005; Mejías et al., 2006).

El límite oriental del acuífero, coincidente con la línea de costa, es abierto. En el límite sur afloran materiales impermeables triásicos que ejercen de barrera al flujo subterráneo. En el margen oeste, la presencia de fallas normales y el anticlinal Vilafranca-Portell actúan también de cierre. Este margen se amplía (trazo discontinuo en la Figura 1) hacia el oeste para incluir el poljé de Vistavella del Maestrazgo por constituir una importante zona de recarga del acuífero. Finalmente, el límite norte se considera cerrado en su mitad occidental, por la presencia de cabalgamientos que ponen materiales cretácicos sobre los terciarios, y abierto en su extremo oriental hasta la costa (Ballesteros et al., 2007a) (Figura 3).

El acuífero se recarga casi en exclusiva por infiltración del agua de lluvia. No existen surgencias naturales importantes en su interior, de forma que los cursos fluviales son de carácter torrencial y la mayor parte de sus descargas se producen directamente al mar a través de manantiales o descargas difusas, situados en la sierra costera de Irta o en el lecho marino frente a la misma (ITGE, 1977, 1981; COPUT, 1990, 1992; Serrano et al., 1995; Antón-Pacheco et al., 2007; García-Orellana et al., 2006; García-Solsona et al., 2007, 2010a,

2010b). También se producen transferencias subterráneas a las planas costeras de Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peñíscola.

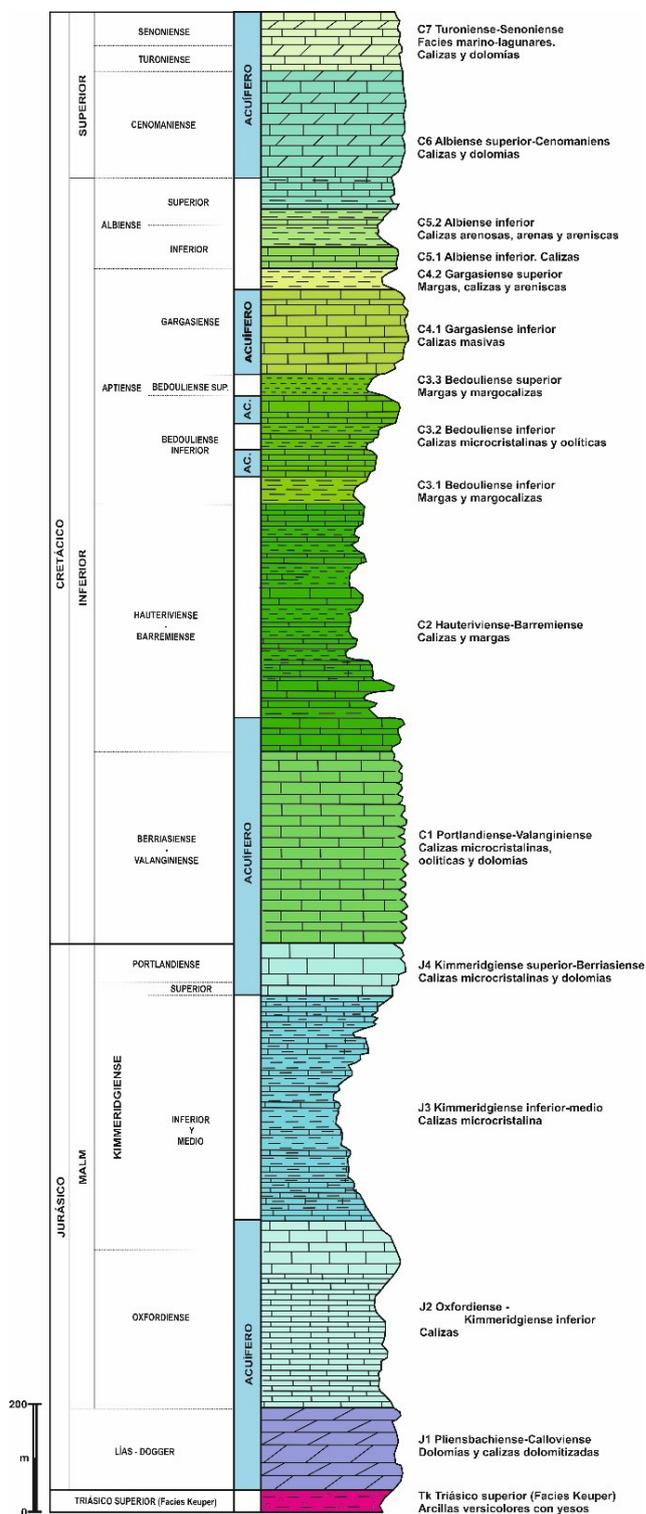


Figura 2. Columna litoestratigráfica tipo en la sierra de Irta (acuífero de El Maestrazgo). Indicación de tramos permeables.

Figure 2. Typical lithostratigraphic column of Sierra de Irta (Maestrazgo aquifer). Indication of permeable sections.

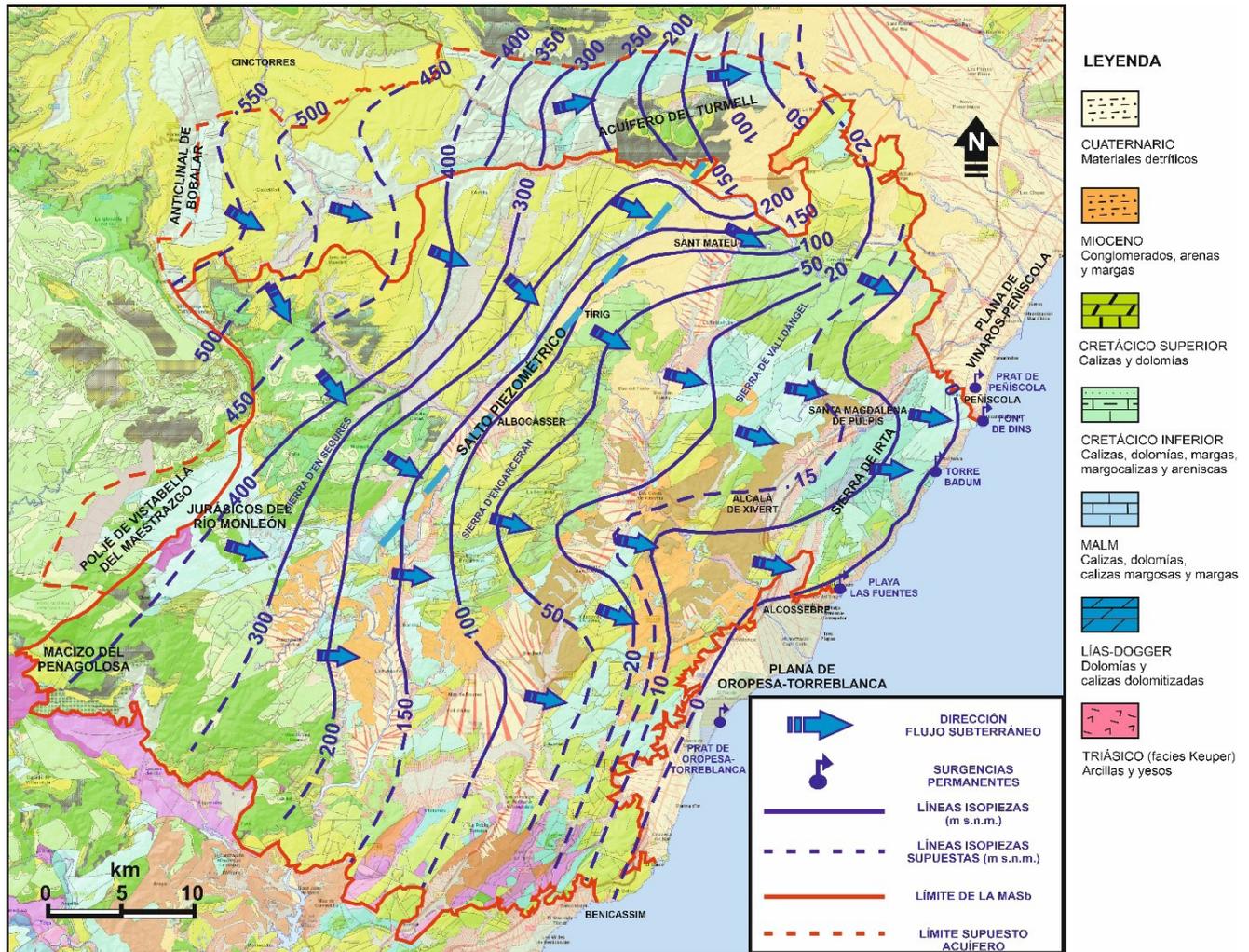


Figura 3. Mapa piezométrico.

Figure 3. Piezometric map.

El acuífero se encuentra en un estado cuasi natural ya que no sufre explotaciones importantes. Esto se debe a que, en la mayor parte del mismo, salvo en la costa, el espesor no saturado ronda los 500 m de potencia, por lo que los bombeos son escasos y se concentran en la franja litoral, donde además es mayor la demanda agrícola y turística. No obstante, es difícil establecer un balance hídrico ajustado. Las aproximaciones realizadas mediante métodos clásicos (ITGE, 1977, 1981; Ballesteros 1989; COPUT 1990, 1992), modelos matemáticos y GIS (Serrano *et al.*, 1995; IGME-EPTISA, 2005; Andreo *et al.*, 2007) o mediante la disgregación de subcuencas hidrográficas (Ballesteros *et al.*, 2007a) han dado resultados diversos, con valores de recarga comprendidos entre 440 hm<sup>3</sup>/a y 163 hm<sup>3</sup>/a, o salidas por el frente costero de entre 175 hm<sup>3</sup>/a y 64 hm<sup>3</sup>/a. Tal disparidad es consecuencia, por un lado, de haberse realizado los cálculos sobre ámbitos geográficos no

siempre idénticos y, por otro, de la imposibilidad de realizar medidas directas en los principales puntos de descarga del acuífero.

#### 4. Hidrodinámica general del acuífero de El Maestrazgo

La ubicación tectónica del acuífero en una zona de transición entre la Cordillera Ibérica y las Cadenas Costeras Catalanas provoca barreras de baja permeabilidad que condicionan la hidrodinámica general del acuífero (Mejías *et al.*, 2007).

El flujo principal va desde el borde noroccidental hasta la costa, en el entorno de la sierra de Irla (Figura 3), donde se producen las principales descargas del sistema a través de conductos de circulación preferencial (Domínguez y Ballesteros, 2012; Mejías *et al.*, 2012) que originan las surgencias permanentes de Torre Badum y Font de Dins.

Un ramal secundario e independiente circula por el margen septentrional hacia la sierra del Turmell, contactando con el acuífero de Puertos de Beceite y la Plana de Cenja. Aquí, se producen transferencias subterráneas hacia el Prat de Peñíscola (acuífero de la Plana de Vinaroz-Peñíscola), algunas de forma difusa y otras, muy probablemente, a través de fracturas relacionadas con los principales “ullals” del marjal.

Un tercer ramal, más meridional, circula de NO a SE desde el área de Villores-rambla de Celumbres hasta las proximidades de Cuevas de Vinromá y finalmente se dirige hacia las surgencias de Alcocebre (Playa de Las Fuentes) y hacia el acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca.

El gradiente hidráulico general del acuífero es bajo (1-2 ‰). La piezometría desciende progresivamente desde los 600 m s.n.m. en el área de Cincorres, hasta los 0 m s.n.m. en áreas costeras. En la zona central del acuífero existe un escalón piezométrico de dirección NNE-SSO con un salto de más de 100 m, aunque no implica desconexión hidráulica.

## 5. Comportamiento hidroquímico de las surgencias de la sierra de Irta ante precipitaciones torrenciales

De forma habitual, las aguas de todas las surgencias de la sierra de Irta presentan facies clorurado-sódicas, salvo las aguas de Font de Dins que son bicarbonatadas cálcicas. No obstante, un análisis más profundo basado en las concen-

traciones medias de sus iones mayoritarios permite diferenciarlas en cinco tipos (Domínguez et al., 2022).

En la zona sur de la sierra, en el área de Alcocebre (Figura 4), afloran los manantiales tipo Playa del Carregador, con salinidades medias, las aguas de Playa de Las Fuentes Centro, de salinidad más elevada y las surgencias ocasionales de Playa de Las Fuentes Norte y Playa de las Fuentes Sur, que presentan amplios rangos de variación en sus concentraciones elementales, pero suelen ser las menos salinas de esta zona. En el área central de la sierra de Irta, las aguas se corresponden con el tipo denominado Torre Badum. Son aguas de salinidad intermedia, pero con amplios rangos de variación en sus concentraciones, sobre todo en los manantiales de carácter efímero (Playa del Russo y Playa del Pebret). Finalmente, en el extremo norte de la sierra, en Peñíscola, se ha definido el tipo de agua Font de Dins, con mínimos contenidos salinos (Figura 4).

Las variaciones más significativas en el quimismo de estas aguas se producen tras precipitaciones intensas de carácter local o lluvias torrenciales a escala regional que modifican durante días o incluso semanas la hidrodinámica general del acuífero y de forma especial la del entorno de estos manantiales. Se han comparado los resultados de análisis de aguas tomadas tras un episodio de lluvias torrenciales (23/10/2018) con muestras recogidas varias semanas después (8/11/2018), donde los efectos de estas precipitaciones se han at-

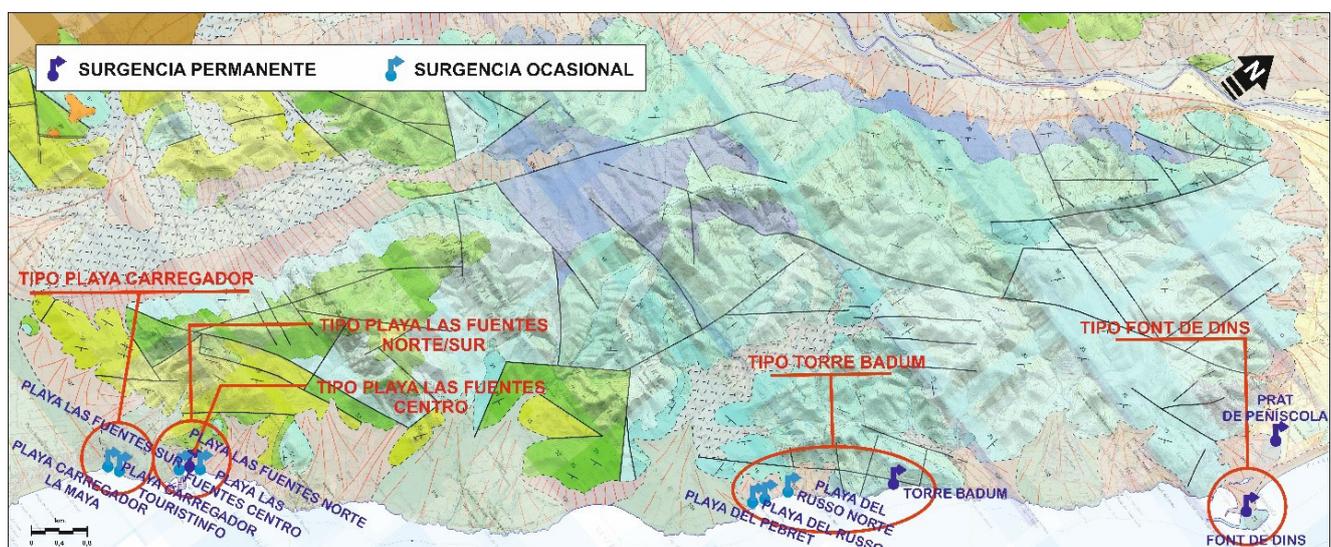


Figura 4. Tipos de aguas en la sierra de Irta según sus características hidroquímicas.

Figure 4. Water types in the Sierra de Irta, according to their hydrochemical characteristics.

nado, pero con todos los manantiales todavía activos. Este estadio temporal se ha definido como un “periodo de aguas altas de hidrodinámica estable” (Tabla 1).

Una respuesta común en todas las surgencias es que las aguas presentan una temperatura superior, en torno a 2 °C más, en la campaña de octubre respecto de la de noviembre.

Los manantiales de Playa del Carregador evolucionan tras las lluvias ganando salinidad, con una CE que pasa de 9.760  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (23/10/2018) a 12.150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  transcurridos 15 días. Iones que son abundantes en el agua de mar, como el Cl, el Na o el Mg, también aumentan, así como el K, mientras que los sulfatos permanecen prácticamente estables y descienden los nitratos.

La surgencia ocasional de Playa de las Fuentes Sur muestra aguas poco salinas en las dos fechas de muestreo, lo que las sitúa en el rango de aguas prácticamente dulces, en la muestra de octubre, tomada pocos días después de las lluvias, registra salinidades superiores a las medidas semanas después. Así, desciende la CE entre las campañas de muestreo de octubre y noviembre, pasando de 2.530  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1.784  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . También desciende la concentración de la mayoría de elementos, salvo de los nitratos que pasan de 9 mg/L a 13 mg/L.

Contrasta la evolución elemental de esta surgencia con la del manantial permanente de Playa de las Fuentes Centro, situado a escasas dece-

nas de metros y que, pese a reducir su CE (19.080  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en octubre a 17.880  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en noviembre) gana concentración en sales abundantes en el agua de mar, pasando los cloruros de 6.100 mg/L a 7.600 mg/L o el sodio de 2.600 mg/L a 3.772 mg/L. Aunque disminuye su contenido en sulfatos, de 950 mg/l a 824 mg/L, o en calcio, que pasa de 480 mg/L a 430 mg/L.

En el área central de la sierra de Irta los episodios torrenciales activan los manantiales de Playa del Pebret y Playa del Russo. Ambas surgencias siguen la misma tendencia, marcan picos iniciales de salinidad muy acusados que decrecen progresivamente con la disminución del caudal drenado. Así, por ejemplo, las aguas de las surgencias de Playa del Russo fijan un máximo de CE en octubre de 27.840  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , para situarse en 11.190  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en noviembre. Este descenso se debe a que la concentración en elementos como el Cl pasa de 10.200 mg/L a 4.200 mg/L. También disminuye el contenido en sulfatos que pasa de 1.470 mg/L a 508 mg/L o en K que desciende de 172 mg/L a 74 mg/L. Sin embargo, aumenta levemente la concentración en  $\text{HCO}_3$  de 183 mg/L a 207 mg/L o en nitratos, que pasa de 3 mg/L a 7 mg/L. Esta surgencia es, además, la que presenta una variación más grande de su temperatura, con 3,7 °C más en octubre que en noviembre.

Las aguas del manantial permanente de Torre Badum sufren, por el contrario, una evolución in-

PUNTO	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	Na	Mg	Ca	K	pH	C.E.	rCl/rHCO <sub>3</sub>	T (°C) *
Carregador Oct-18	3370	464	193	20	1716	222	180	38	7.28	9760	30	20.9
Carregador Nov-18	4600	472	212	16	2317	280	308	52	7.17	12150	37.28	18.7
Fuentes Sur Oct-18	648	94	258	9	364	51	103	14	7.24	2530	4.32	21.5
Fuentes Sur Nov-18	540	89	233	13	286	42	96	10	7.36	1784	3.98	18.8
Fuentes Centro Oct-18	6100	950	185	8	2600	580	480	78	7.27	19080	56.66	20.7
Fuentes Centro Nov-18	7600	824	191	10	3772	510	430	91	7.18	17880	68.37	18.6
Playa Pebret Oct-18	6600	790	208	4	3329	450	300	96	7.18	17860	54.52	20
Playa Pebret Nov-18	4300	540	220	7	2403	272	196	75	7.34	11660	33.59	18.1
Playa Russo Oct-18	10200	1470	183	3	5109	750	460	172	7.19	27840	95.77	22.2
Playa Russo Nov-18	4200	508	207	7	2320	268	188	74	7.34	11190	34.86	18.5
Torre Badum Oct-18	780	125	242	9	402	55	107	12	7.33	2660	5.54	18.8
Torre Badum Nov-18	4400	532	217	7	2373	268	192	77	7.18	11980	34.84	18.6
Font de Dins Oct-18	75	175	232	60	96	24	59	75	8.12	924	0.16	18.6
Font de Dins Nov-18	12	68	193	8	10	15	72	1	7.26	546	0.11	17.6

**Tabla 1.** Analíticas de los manantiales (permanentes y ocasionales) de la sierra de Irta. Octubre y noviembre de 2018.

**Table 1.** Analysis of the springs (permanent and occasional) of the Sierra de Irta. October and November 2018.

versa a los anteriores y tras las precipitaciones alcanza contenidos iónicos propios del agua dulce, para ganar salinidad con el paso de los días. En octubre su CE es de apenas 2.660  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , mientras que en noviembre alcanza los 11.980  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , valores más habituales y muy similares a los de las otras surgencias de la zona en esa fecha. También aumentan las concentraciones de la mayoría de elementos, como los cloruros (780 mg/L a 4.400 mg/L) y el potasio (12 mg/L a 77 mg/L). Únicamente descienden levemente los bicarbonatos (242 mg/L a 217 mg/L) y los nitratos (9 mg/L a 7 mg/L). En cuanto a la temperatura de sus aguas, oscila mínimamente, con 18,8 °C en octubre y 18,6 °C en noviembre.

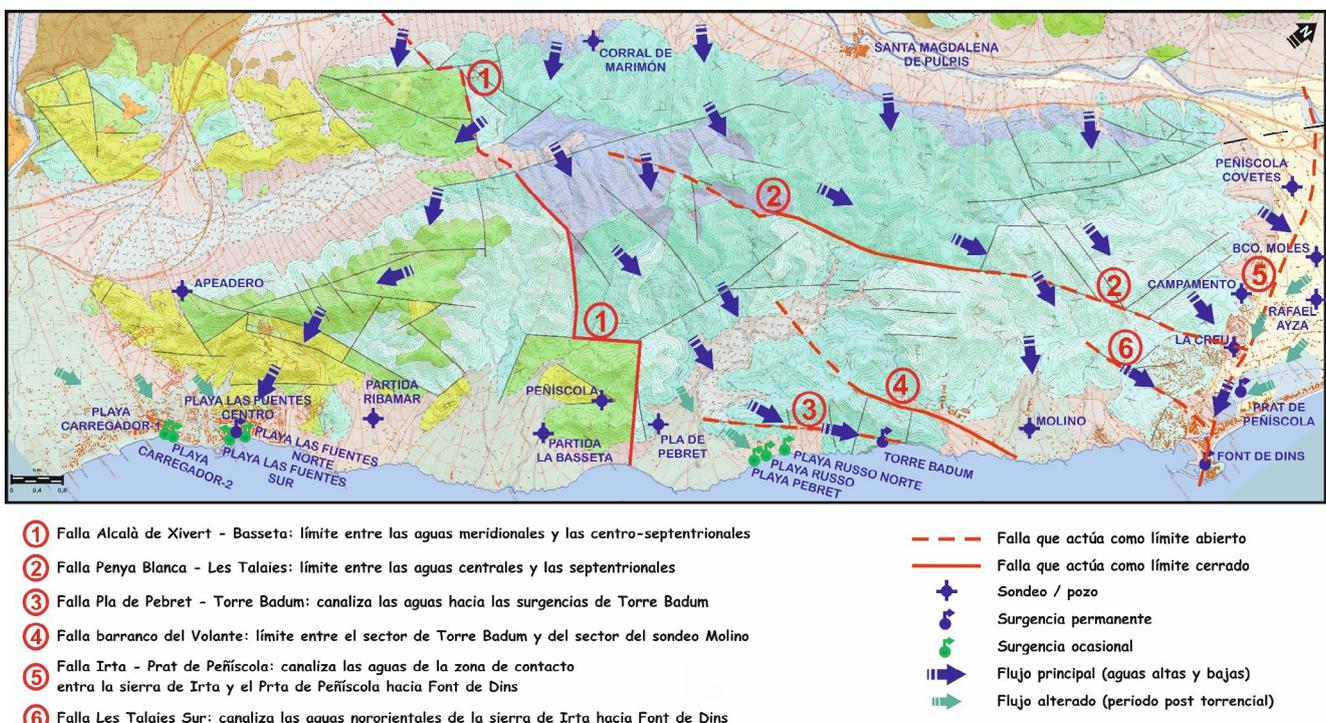
Finalmente, el manantial de Font de Dins se diferencia claramente del resto de surgencias por presentar aguas dulces que son empleadas en el abastecimiento urbano. Tras las intensas lluvias de octubre de 2018 marca picos de concentración en la mayoría de compuestos. Destacan los contenidos en potasio (75 mg/L), cloruros (75 mg/L), sulfatos (175 mg/L) o nitratos (60 mg/L). Estos últimos con valores que exceden los límites de potabilidad vigentes. También hay que resaltar que el agua de esta surgencia se ve afectada por pro-

cesos de turbidez durante los eventos de fuertes precipitaciones. Pasados unos días los valores retornan a sus cifras habituales y se estabilizan con una CE en torno a los 500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

## 6. Análisis de resultados

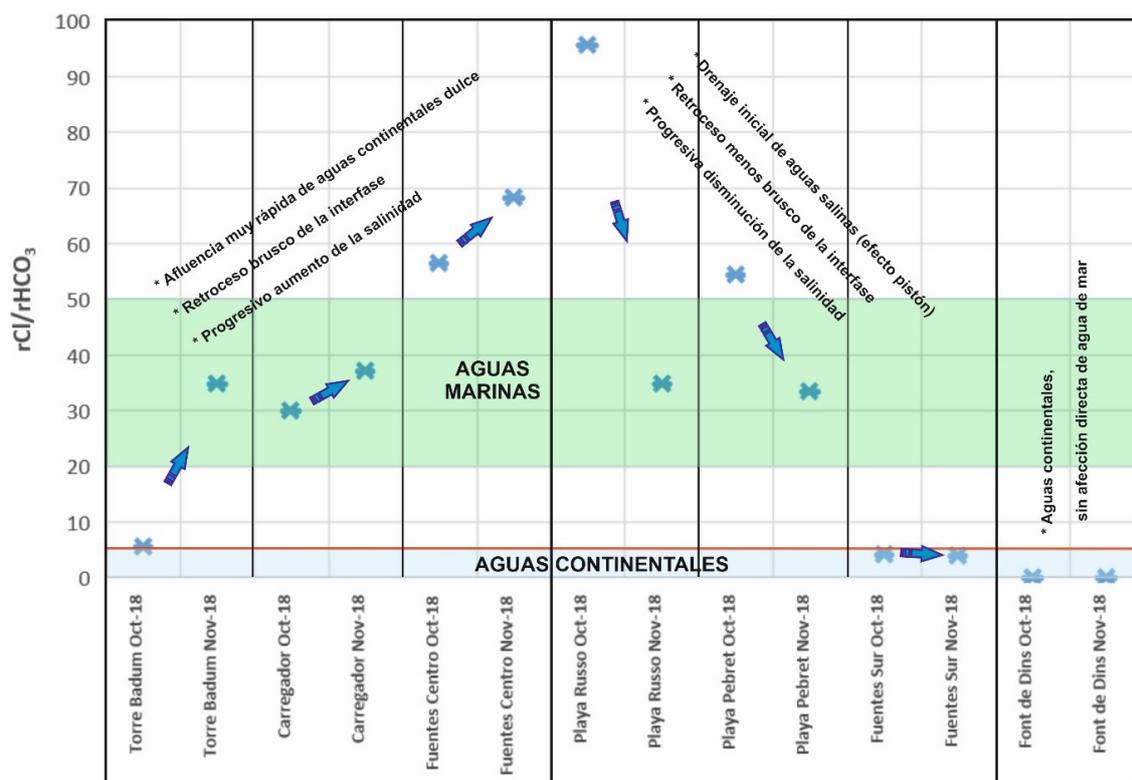
En función de las diferencias y evoluciones hidroquímicas observadas en los distintos manantiales se puede realizar una interpretación de la hidrodinámica en el entorno de la sierra de Irta tras fuertes lluvias. Los flujos subterráneos del margen meridional del acuífero se canalizan hacia las surgencias de Playa de Las Fuentes y Playa del Carregador a través de los materiales carbonatados cretácicos aflorantes al sur de la fractura Alcalà de Xivert-Basseta, perpendicular a la costa (Figura 5), que parece ejercer de semi-barrera entre las surgencias meridionales y las centro-septentrionales.

Los manantiales de la playa del Carregador responden a las intensas precipitaciones de octubre con un descenso en su concentración en sales, de lo que se deduce un efecto de dilución provocado por la mayor infiltración de agua de lluvia, si bien, pasados unos días este se atenúa (Figura 6).



**Figura 5.** Hidrodinámica habitual (periodo de aguas bajas y altas) y pos-torrencial de los manantiales permanentes y ocasionales de la sierra de Irta.

**Figure 5.** Usual hydrodynamics (period of low and high waters) and post-torrential of the permanent and occasional springs of the Sierra de Irta.



**Figura 6.** Hidrodinámica de los manantiales de la sierra de Irta tras fuertes lluvias.

**Figure 6.** Hydrodynamics of the springs of the Sierra de Irta after heavy rains.

Más al norte, afloran los manantiales de la Playa de las Fuentes, separados por escasas decenas de metros, pero con composiciones hidroquímicas y evoluciones muy diversas. Inmediatamente después de las precipitaciones, la surgencia de Playa de las Fuentes Sur marca concentraciones en elementos propios del agua marina más altos que después de transcurridas varias semanas. Sin embargo, la evolución de los nitratos es inversa y aumenta en el segundo muestreo, lo que se relaciona con una mayor afluencia de aguas continentales y el efecto de lavado de terrenos agrícolas. Esta respuesta, aunque poco marcada, responde a un comportamiento tipo pistón en el que el empuje brusco de los flujos de aguas continentales hace que en un primer momento se drenen las aguas del entorno de la emergencia, más influenciadas por la cuña salina. Con el paso de los días los canales de desagüe se saturan paulatinamente con aguas más dulces y la salinidad se reduce (Figura 6).

Por su parte, las aguas de la Playa de las Fuentes Centro, pese a que presentan una CE más alta en octubre, fijan en este mes menor concentración en elementos abundantes en el agua de mar. En noviembre estos aumentan, al igual que los nitratos, pero disminuye el conteni-

do en sulfatos, calcio y magnesio. Así, esta surgencia no responde con un efecto pistón, solo se produce una dilución inicial por el retroceso de la interfase. Con el paso de los días aumenta la proporción de agua marina en la surgencia, pero también se evidencia la llegada de aguas de lavado de zonas dedicadas a la agricultura. Esta respuesta parece indicar la confluencia tanto de flujos superficiales continentales como de flujos más profundos de la base de la cuña salina. En cualquier caso, la interpretación de la hidrodinámica de este manantial es muy compleja debido a que sus aguas acceden a la playa a través de una canalización subterránea de origen y trazado desconocido.

Las surgencias de Playa del Pebret y Playa del Russo solo se activan tras eventos muy intensos de precipitación. En épocas de aguas bajas, o incluso en épocas húmedas alejadas temporalmente de dichos eventos, los flujos subterráneos no llegan a ellas, por lo que se encuentran secas. No obstante, al activarse estos manantiales actúan con un típico efecto pistón, por lo que inicialmente drenan caudales elevados con aguas muy salinas. Paulatinamente, la interfase retrocede al tiempo que los canales más cercanos a las surgencias se rellenan con

agua dulce. Pasados unos días la hidroquímica refleja salinidades mucho menores.

Los manantiales de Torre Badum constituyen el drenaje más importante del sistema hidrogeológico de El Maestrazgo, incluso en época seca. El flujo subterráneo se canaliza hacia ellos a través del corredor delimitado, al sur, por la falla Alcalà de Xivert-Bassetta y, al noroeste, por la falla Penya Blanca-Les Talaies. Con la aproximación a la costa, la fractura de Pla de Pebret actúa como conducto de circulación rápida y favorece que las aguas infiltradas en las áreas altas de la sierra y en su vertiente occidental alcancen la costa en poco tiempo. En consecuencia, las precipitaciones torrenciales provocan un incremento notable y repentino de agua dulce en el entorno del manantial, tanto más acusado cuanto más intensas son las lluvias. La interfase salina retrocede rápidamente y solo con el paso de los días la hidrodinámica se estabiliza en condiciones más habituales (Figuras 5 y 6).

La baja mineralización del manantial de Font de Dins de Peñíscola, al norte de la sierra, indica que no se encuentra afectado por procesos salinos y que sus vías de circulación no deben de conectar en ningún momento con fracturas relacionadas con la interfase marina (Figura 6). El flujo subterráneo que da lugar al manantial proviene de las zonas internas del acuífero. Ya cerca de la costa, en el tercio septentrional de la sierra de Irta, el flujo probablemente circula de forma preferencial con dirección este, en paralelo con la falla denominada Penya Blanca-Les Talaies y, en menor medida, por la denominada Les Talaies Sur. Estas fracturas contactan perpendicularmente con la falla Irta-Prat de Peñíscola, que debe constituir un canal o vía de drenaje directo hacia Font de Dins y actúa, además, de límite entre el acuífero carbonatado de El Maestrazgo y el detrítico de la Plana de Vinaroz-Peñíscola (Figura 5). En esta zona de contacto entre ambos acuíferos los materiales mesozoicos se hunden bajo los depósitos pliocuaternarios del marjal y les ceden importantes recursos hídricos subterráneos que pueden estar muy relacionados con las principales surgencias (ullals) de este humedal.

Tras las lluvias de octubre de 2018, las aguas de Font de Dins se enriquecen inicialmente en sales características del agua marina (Na, Cl, K, SO<sub>4</sub>...) y, sobre todo, en nitratos (< 10 mg/L a 60 mg/L) lo que refleja la influencia de aguas continentales procedentes de zonas agrícolas.

La interpretación hidrodinámica de esta evolución química no es sencilla. Un posible modelo hidrogeológico que justificaría estos cambios se basa en que en el periodo pos-torrenciales volúmenes importantes de agua de distinto origen alcanzan el humedal del Prat de Peñíscola, que ejerce de embalse natural de retención y mezcla. Por un lado llegan las transferencias laterales desde los acuíferos carbonatados de borde entre las que se incluyen las descargas en los “ullals” de flujos profundos del acuífero de El Maestrazgo, con contenidos salinos más elevados y posibles fenómenos de termalismo (Domínguez *et al.*, 2016). Otro aporte proviene de las aguas de lluvia precipitadas en toda la cuenca hidrográfica del marjal. Estas aguas al infiltrarse en los terrenos agrícolas que rodean el humedal realizan un lavado de las sales y contaminantes del terreno, aumentando, entre otros, la concentración en nitratos. Destaca, en este sentido, el área de los pozos “Barranco Moles” y “Rafael Ayza”, en donde la concentración media en este elemento es superior a los 115 mg/L NO<sub>3</sub> (Domínguez *et al.*, 2016). Todas las aguas del acuífero detrítico y del humedal se mezclan y remobilizan, incluidas las aguas más costeras y más afectadas por la intrusión marina. El excesivo volumen de agua tanto superficial como subterránea se canaliza hacia el extremo suroriental de la zona húmeda. Las aguas superficiales hacia la gola del marjal y las subterráneas hacia la falla Irta-Prat de Peñíscola y es al entrar en esta vía de drenaje cuando afectan a la calidad de las aguas de Font de Dins (Figura 5).

La hidrodinámica de los manantiales de la sierra de Irta es similar a la de otras surgencias del arco mediterráneo. En la isla de Mallorca, el manantial de s'Almadrava, asociado a un acuífero kárstico costero, se caracteriza por presentar aguas de baja salinidad durante las épocas húmedas, en las que la mayor carga hidráulica hace retroceder a la cuña salina, Y aguas más salinas durante los periodos secos, o entre episodios lluviosos, en los que avanza la cuña de intrusión tierra adentro pudiendo llegar incluso a secar el manantial. Si esto sucede, los canales más próximos a la surgencia se salinizan y al producirse un nuevo evento lluvioso capaz de activarlo, los primeros caudales drenados alcanzan picos de salinidad destacados. Posteriormente, conforme las aguas de infiltración rellenan las fracturas, la concentración en sales disminuye progresivamente (Sanz *et al.*, 2002).

Otro manantial costero, relativamente próximo a la sierra de Irta, que también drena un acuífero carbonatado, es el de Font Salada, en el extremo oriental de la sierra de Mustalla, en el límite entre las provincias de Valencia y Alicante. Esta surgencia, sin embargo, tiene un comportamiento contrario a las anteriores y se caracteriza por drenar aguas menos salinas en las épocas secas que en las húmedas. En este caso, el modelo hidrodinámico favorece los procesos de removilización y mezcla de aguas profundas de la base de la cuña de intrusión con aguas continentales más superficiales, fenómeno que además eleva la temperatura del agua del manantial (Domínguez y Ballesteros, 2008).

## 7. Conclusiones

Un manantial kárstico costero incrementa su salinidad cuando los conductos que le suministran agua dulce contactan con otros conductos llenos de agua marina a mayor presión (Maramathas *et al.*, 2006). De igual forma, sus aguas pierden salinidad cuando la presión ejercida por las aguas continentales se incrementa. En este tipo de medios, en los que la velocidad de circulación del flujo subterráneo puede ser muy elevada, la infiltración de agua de lluvia puede alcanzar la zona de descarga rápidamente y ejercer una fuerte y repentina presión sobre las aguas marinas haciendo retroceder la interfase y modificando bruscamente la composición química de las surgencias.

Estos cambios se han podido analizar en los manantiales de la sierra de Irta a partir de su evolución hidroquímica tras las precipitaciones de octubre de 2018. La respuesta de los mismos ha permitido definir tres tipos de hidrodinámica.

Las surgencias de Playa del Carregador, Playa de las Fuentes Centro y Torre Badum, sufren de forma inmediata un claro efecto de dilución, muy acentuado en Torre Badum, que llega, los primeros días tras las lluvias, a drenar aguas prácticamente dulces. Las aguas infiltradas que alcanzan las surgencias, además de reducir la concentración en elementos propios del agua marina, hacen aumentar la concentración en nitratos ya que, durante su recorrido, han producido un efecto de lavado en sectores agrícolas. Transcurridas unas semanas la hidrodinámica se estabiliza, la interfase vuelve a posiciones más habituales y las concentraciones salinas aumentan.

Los manantiales de Playa de las Fuentes Sur, Playa del Pebret y Playa del Russo, que se encuentran secos la mayor parte del año, responden a las precipitaciones que los activan con un efecto pistón que hace que inicialmente drenen aguas muy cargadas en sales. Estas aguas provienen directamente de la interfase, que ha ido avanzando tierra adentro durante los periodos inter lluvias ocupando el entorno más próximo a los puntos de descarga. Este comportamiento es más evidente en las surgencias de Playa del Pebret y Playa del Russo, cuyo carácter efímero u ocasional es mucho más destacado. Progresivamente, las aguas de infiltración van ocupando los canales de drenaje próximos a los manantiales y las concentraciones en elementos como el cloro o el sodio disminuyen. En este estadio, tanto las surgencias de Playa del Russo, del Pebret, como de Torre Badum, pese a tener distintas respuestas hidroquímicas iniciales, alcanzan concentraciones elementales muy similares.

Finalmente, el manantial de Font de Dins, ve alterada su hidroquímica habitual no por un efecto directo de contacto con agua marina, sino por la llegada colateral a este punto de descarga, de aguas procedentes del marjal de Peñíscola y su acuífero asociado. Las aguas del acuífero detrítico de la Plana de Vinarós-Peñíscola, modifican su quimismo con las intensas precipitaciones y se enriquecen de forma brusca tanto en elementos de origen marino (Cl, Na, K) como en otros propios de la actividad antrópica (NO<sub>3</sub>). Parte del excedente de agua que recoge el humedal y que no es drenado de forma difusa al mar o directamente al mismo por la gola del marjal, se canaliza a través de la falla Irta-Prat de Peñíscola, afectando a las aguas de Font de Dins.

Comparando el comportamiento hidrodinámico de estas surgencias con los de otras de acuíferos similares (manantiales de s'Almadrava en Mallorca y Font Salada en Alicante), considerando el hecho de que las variaciones en la temperatura de las aguas son relativamente pequeñas ( $\approx 2^{\circ}\text{C}$ ), que las muestras tomadas en noviembre tienen menor temperatura que las de octubre y ante la ausencia de fenómenos de termalismo en todos los casos, se puede concluir que en la sierra de Irta, tras lluvias intensas, los manantiales drenan aguas con mucha mayor influencia de flujos superficiales, menos salinos y menos calientes, que profundos y que la dinámica habitual es la de drenar aguas tanto más saladas conforme más seco es el régimen climático, la presión hi-

drostática de las aguas dulces continentales es menor, y avanza más la cuña de intrusión.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la inestimable ayuda ofrecida por la empresa FACSA y en especial a sus operarios en la localidad de Peñíscola que han facilitado amablemente, a lo largo de los últimos años, el acceso a puntos de abastecimiento para la toma de datos y muestras de agua.

## Referencias

- Andreo Navarro, B., Vías Martínez, J. M., Marín Guerrero, A. I., Mejías Moreno, M., and Ballesteros Navarro, B. J. (2007). Estimación de la recarga mediante el método APLIS en el acuífero Jurásico de El Maestrazgo (Castellón, NE España). Los acuíferos costeros: retos y soluciones. TIAC 07. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas, 23, 893-902. ISBN 978-84-7840-712-5.
- Antón-Pacheco, C., Araguás, L., Ballesteros, B., Barnolas, A., Casas, A., Gil, I., Gumiel, J. C., López-Gutiérrez, J., Mejías Moreno, M., Plata, J. L., Samsó, J. M., Jiménez, I., Marina Rojo, M., Mediato, J., and Núñez, I. (2005). Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07 (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico. Recopilación y síntesis de la información. Informe preliminar. Centro de documentación IGME, H1-002-05, 535 pp.
- Antón-Pacheco, C., Ballesteros, B. J., Mejías Moreno, M., de Miguel, E., Gumiel, J. C., Gómez, J. A., and Callejo, P. (2007). Identificación y cartografía de surgencias costeras en el acuífero kárstico de El Maestrazgo (Castellón) mediante técnicas de teledetección aeroportada en el infrarrojo térmico. Boletín Geológico y Minero, 118 (Núm. Especial), 649-670. ISSN 0366-0176
- Ballesteros, B.J. (1989). Estudio Hidrogeológico del Maestrazgo, Castellón. En: Fondo documental del IGME, 158 pp.
- Ballesteros, B. J., Mejías Moreno, M., Marina Rojo, M., and Domínguez Sánchez, J. A. (2007a). Estimación de la recarga natural por subcuencas hidrológicas en el acuífero regional Jurásico de El Maestrazgo (Castellón). Fondo documental del IGME.
- Ballesteros, B. J., Marina Rojo, M., Mejías Moreno, M., and Domínguez Sánchez, J. A. (2007b). Caracterización hidroquímica del acuífero carbonatado profundo de El Maestrazgo (Castellón). Los acuíferos costeros: retos y soluciones. TIAC 07. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas, 23, 549-564. ISBN 978-84-7840-712-5.
- Canerot, J. (1974). Recherches géologiques aux confins des chaînes ibérique et catalane (Espagne). Tesis Doctoral Universidad de Toulouse. ENADIM-SA, 5(2), 517 pp.
- COPUT (1990). Estudio de identificación de las descargas al mar del acuífero del Maestrazgo en la zona litoral entre Alcocebre y Peñíscola. Inédito.
- COPUT (1992). Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irtá. Mancomunidad del Baix Maestrat (Castellón). Inédito.
- Domínguez Sánchez, J. A., and Ballesteros, B. J. (2008). Análisis hidrogeológico de manantiales salinos asociados al acuífero carbonatado de Albuerca-Gallinera-Mustalla en el entorno de la zona húmeda de Pego-Oliva (Valencia-Alicante). Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Vol. XXVII. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, 209-222.
- Domínguez Sánchez, J. A., and Ballesteros, B. J. (2012). Identificación de descargas submarinas en la plataforma continental mediterránea procedentes del acuífero kárstico de El Maestrazgo (Castellón – España). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 29. Volumen 1, 255-269.
- Domínguez Sánchez, J. A., Rosado Piqueras, S., and Mejías Moreno, M. (2016). Redes de observación MASb Maestrazgo Oriental y Plana de Vinaroz. Informe recopilatorio 2012-2015. Documento interno IGME.
- Domínguez Sánchez, J. A., Rosado Piqueras, S., Mejías Moreno, M., and Ballesteros, B. (2022). Caracterización hidroquímica de las surgencias costeras de la sierra de Irtá. Acuífero de El Maestrazgo (Castellón). Boletín Geológico y minero, 133(1), <http://dx.doi.org/10.21701/bolgeomin/133.1/007>.
- García-Orellana, J., García-Solsona, E., Masqué, P., Ballesteros, B.J., López, J., Mejías Moreno, M., and Marina Rojo, M. (2006). Evaluación de la descarga de un manantial costero mediante isótopos de radio: Las Fuentes de Alcossebre (Castellón). Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, Nº 17, 301-309. Madrid.
- García-Solsona, E., Garcia-Orellana, J., Masqué, P., Mejías Moreno, M., and Ballesteros, B. J. (2007). Radium isotopes as tracers of submarine groundwater and nitrogen discharge in karstic area. 17th Annual V.M. Goldschmidt Conference. 20-24 Agosto 2007, Colonia (Alemania). Goldschmidt Conference Abstracts Volume, A308.
- García-Solsona, E., Garcia-Orellana, J., Masqué, P., Rodellas, V., Mejías Moreno, M., Ballesteros, B. J.,

- and Domínguez Sánchez, J. A. (2010a). Groundwater and nutrient discharge through karstic coastal springs (Castelló, Spain). *Biogeosciences*, 7, 2625-2638. DOI: 10.5194/bg-7-2625-201.
- García-Solsona, E., García-Orellana, J., Radakovitch, O., Domínguez Sánchez, J. A., Masqué, P., Rodeillas, V., Mejías Moreno, M., and Ballesteros, B. J. (2010b). Comparison of groundwater discharge estimates from Ra Isotopes,  $^{222}\text{Rn}$  and direct measurements in the Península bay (eastern Spain). Radium and Radon isotopes as Environmental Tracers. Jerusalem (Israel), March 14-19.
- IGME-CONSULMINA (2006). Caracterización hidroquímica e isotópica del acuífero profundo de El Maestrazgo. Informe de resultados. Inédito. 136 pp.
- IGME-EPTISA (2005). Mejora del conocimiento hidrogeológico de la unidad hidrogeológica 08.07 El Maestrazgo – Estudio hidroclimático. Inédito
- ITGE (1977). Plan nacional de investigación de aguas subterráneas. Investigación hidrogeológica de la cuenca media y baja del río Júcar (Sistema nº 55: Javalambre y Maestrazgo). Inédito.
- ITGE (1981). Análisis de posibilidades para la regulación de la descarga subterránea de los acuíferos del Maestrazgo a través de la sierra de Irta. Posibilidades de utilización en las planas litorales de Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peníscola. Inédito.
- ITGE (1989). Estudio hidrogeológico del Maestrazgo. Informe inédito.
- Maramathas, A., Pergialiotis, P., and Gialamas, I. (2006). Contribution to the identification of the sea intrusion mechanism of brackish karst springs. *Hydrogeology Journal*, 14(5), 657-662.
- Mejías Moreno, M., Plata, J. L., Ballesteros, B., López, J., and Marina Rojo, M. (2006). Metodología de caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas. Aplicación al acuífero regional del Maestrazgo. Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. López Geta, J.A., Fernández Rubio, R. y Ramos González G. (ed.), AQUAinMED 2006. Publicaciones del IGME. Serie: Hidrogeología y aguas subterráneas 17, 47-56. ISBN 84-7840-631-X.
- Mejías Moreno, M., García –Orellana, J., Plata, J. L., Marina Rojo, M., García-Solsona, E., Ballesteros, B. J., Masqué, P., López, J., and Fernández-Arrojo, C. (2007). Methodology of hydrogeological characterization of Deep carbonate aquifers as potential reservoirs of groundwater. Case of study: The jurassic aquifer of El Maestrazgo (Castellón, Spain). *Environmental Geology*. DOI: 10.1007/s00254-007-0845-0.
- Mejías Moreno, M., Ballesteros, B. J., Antón-Pacheco, C., Domínguez Sánchez, J. A., Garcia-Orellana, J., Garcia-Solsona, E., and Masqué, P. (2012). Methodological study of submarine groundwater discharge from a karstic aquifer in the Western Mediterranean Sea. *Journal of Hydrology*, 464–465, 27–40.
- Sanz, E., Custodio, E., Carrera, J., Ayora, C., Barón, A., and González, C. (2002). Modelling coastal salty springs: first approach in carbonate media (s'Almadrava, Mayorca, Sapin). 17 Salt Water Intrusion Meeting, Deltt, The Netherlands, 6-10 May 2002.
- Serrano Orts, V., Roca Mauri, A., Pérez Baviera, A., Nieto Salvatierra, M., Obarti Segrera, F., Ortiz Pérez, S., and Capilla Roma, J. (1995). Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irta (U.H. 08.07: Maestrazgo). Mancomunidad del Baix-Maestrat, Castellón. 6th Hydrogeology Symposium in Seville, Spanish Association of Underground Hydrology, XIX, 679-697.

