

RESEARCH ARTICLE

Turbidity peaks in the Font de Dins of Peñíscola: a tool to determine recharge areas and transit periods. Acuífero of El Maestrazgo (Castellón)

Picos de turbidez en la Font de Dins de Peñíscola: una herramienta para determinar áreas de recarga y periodos de tránsito. Acuífero de El Maestrazgo (Castellón)

Jose Antonio Domínguez Sánchez¹, Belén Sánchez-Rubio Ruiz²

¹ Instituto Geológico y Minero de España – CSIC, Unidad de Valencia, 46004 Valencia, España.

² FACSA Ciclo Integral del Agua, 12001 Castellón, España.

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

ABSTRACT

Key points

Relationship between turbidity and precipitation.

Delay between 3 and 10 days.

High-speed underground flows through preferential circulation channels.

El Maestrazgo is a karstic aquifer of more than 2,400 km² that occupies the northern half of the province of Castellón. Its main discharge area is in the coastal mountains of Irta. One of the most important springs in the system is the Font de Dins of Peñíscola, which is characterized by its fresh water channeled through preferential circulation channels without contact with sea water. After intense rainfall events, both on a local and regional scale, the usual hydrochemistry of these waters changes almost immediately and remains altered for days or weeks, being able to present stages of marked turbidity. This fact is due to the rapid influx to this upwelling of infiltrated waters in different sectors of the aquifer that significantly increase its flow. This article analyzes the cause-effect relationship of the turbidity peaks that sporadically occur in the Font de Dins spring with very intense or prolonged rains in the area. Once the relationship has been verified, a space-time study allows turbidity to be used as a natural tracer and to establish transit periods, ground-water flow velocities and recharge areas.

Keywords: Coastal aquifers; Hydrodynamics; Maestrazgo; Spring; Turbidity.

Article History:

Received: 25/08/2022

Accepted: 22/02/2023

RESUMEN

Puntos clave

Relación entre la turbidez y las precipitaciones.

Retardo de entre 3 y 10 días.

Flujos subterráneos de gran velocidad por canales de circulación preferencial.

El Maestrazgo es un acuífero kárstico de más de 2400 km² que ocupa la mitad septentrional de la provincia de Castellón. Su principal área de descarga se encuentra en la sierra costera de Irta. Uno de las surgencias más importantes del sistema es la Font de Dins de Peñíscola que se caracteriza por sus aguas dulces canalizadas a través de canales de circulación preferencial sin contacto con aguas marinas. Tras eventos de precipitaciones intensas, tanto a escala local como regional, la hidroquímica habitual de estas aguas se modifica casi de forma inmediata y permanece alterada durante días o semanas, pudiendo presentar estadios de marcada turbidez. Este hecho se debe a la rápida afluencia a esta surgencia de las aguas infiltradas en diferentes sectores del acuífero que hacen aumentar sensiblemente su caudal. En el presente artículo se analiza la relación causa-efecto de los picos de turbidez que esporádicamente se dan en el manantial de Font de Dins con lluvias muy intensas o prolongadas acaecidas en la zona. Comprobada la relación, un estudio espacio-temporal permite utilizar la turbidez como un trazador natural y establecer periodos de tránsito, velocidades del flujo subterráneo y áreas de recarga.

Palabras clave: Acuíferos costeros; Hidrodinámica; Maestrazgo; Manantial; Turbidez.

Historial del artículo:

Recibido: 25/08/2022

Aceptado: 22/02/2023

1. Introducción y objetivos

Si bien son habituales los estudios que abordan la aparición de turbidez en manantiales y pozos tras lluvias intensas (Pernía, *et al.*, 2006; Rico *et al.*, 1993); los que correlacionan directamente este fenómeno con el aumento de caudal en las emergencias y ríos o con el incremento de contaminación bacteriana (Pérez-Santos, 2007; Huerta and Carrasco, 2018), son menos frecuentes los que tratan de analizar la turbidez como un trazador. Si se han realizado ensayos en esta línea, pero, en general, se comparan las curvas de turbidez con las obtenidas con trazadores químicos convencionales a modo de comprobación, tanto en estudios de canalizaciones antrópicas (Pecly and Roldao, 2011) como en medios naturales, ríos o manantiales (Segovia Rosales, 2008).

La novedad del presente estudio radica en que el enfoque se centra en exclusiva en demostrar la posibilidad de utilizar la turbidez en surgencias como un trazador natural, considerando el agua de lluvia infiltrada como el elemento catalizador que la provoca. Difiere, en esencia, de los ensayos con trazadores químicos en que, mientras en estos se conoce con precisión el punto de inyección y los resultados dependen de que sean válidos los puntos de control, es decir, de que se detecte o no el trazador en los mismos, aquí el punto de control es conocido y fiable, y del análisis posterior se deduce la zona o zonas de inyección.

En este caso, se comprueba inicialmente la posible relación causa-efecto de los picos de turbidez que esporádicamente se dan en el manantial de Font de Dins de Peñíscola (Castellón) tras precipitaciones muy intensas o prolongadas acaecidas en el ámbito del acuífero de El Maestrazgo (Figura 1). Posteriormente, se realiza un análisis espacio-temporal de estas relaciones.

Con la aplicación de esta metodología se espera obtener la misma información que con el empleo de trazadores químicos, es decir, establecer periodos de tránsito, velocidad del flujo subterráneo, caracterizar la hidrodinámica del acuífero, su vulnerabilidad frente a la contaminación, etc.

Se ha decidido relizar el estudio en el acuífero de El Maestrazgo por dos motivos fundamentales. Primero, por tratarse de un extenso sistema kárstico litoral poco explotado (régimen quasi natural) e hidrogeológicamente bastante conocido, que se caracteriza por encauzar sus flujos subterráneos a través de canales de circulación preferencial desde las áreas más interiores hasta la costa,



Figura 1. Situación del área de estudio (Modificado de Domínguez *et al.*, 2022b).

Figure 1. Situation of the study area (Modified from Domínguez *et al.*, 2022b).

donde se localizan los principales puntos de descarga del sistema (Las Fuentes, Torre Badum, Font de Dins y Prat de Peñíscola) (Figura 1).

Y en segundo, y no menos importante, por contar con el registro continuo de turbidez durante varios años del manantial de Font de Dins, que es un punto importante de emergencia del acuífero y cuyas aguas pueden vincularse en exclusiva a flujos de origen continental, sin influencia de aguas de intrusión.

2. Marco hidrogeológico

El acuífero de El Maestrazgo se extiende por los dos tercios septentrionales de la provincia de Castellón (España). Estructuralmente se sitúa en el sector oriental de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, en su zona de transición hacia las Cadenas Costeras Catalanas. Incluye parte de la zona Central Subtabular y de la zona Oriental Fallada definidas por Canerot (1974).

Tiene una extensión de unos 2.400 km² 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-Portlan-

diense 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). Otros tramos permeables, independientes del anterior, son los constituidos por los niveles de calizas del Aptiense y las calizas del Cenomaniense-Senoniense, que 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). La base impermeable del acuífero la conforman las arcillas y margas con yesos de la facies Keuper del Trías localizadas en la mayor parte del acuífero a profundidades muy elevadas, aunque llegan a aflorar en la sierra Espaniguera (Antón-Pacheco *et al.*, 2005; Mejías *et al.*, 2006).

El límite oriental del acuífero es abierto, coincidente con la línea de costa. En este margen se incluye el acuífero detrítico de la plana de Oropesa-Torreblanca. El margen meridional es cerrado por la presencia de materiales impermeables triásicos que ejercen de barrera al flujo subterráneo. En el flanco occidental actúan de cierre fallas normales y el eje del anticlinal Vilafranca-Portell. El trazado del límite del acuífero en este sector se ha prolongado hacia el oeste (trazo discontinuo) para incluir el poljé de Vistavella del Maestrazgo que constituye una importante zona de recarga del acuífero. Finalmente, el límite norte se considera cerrado en su mitad occidental, desde Bordón hasta el puerto de Torre Miró, por la presencia de cabalgamientos que ponen materiales cretácicos sobre los terciarios, y abierto en su extremo oriental, desde el anticlinal del río Servol hasta la costa (Ballesteros *et al.*, 2007a) (Figura 2).

El acuífero constituye un sistema kárstico litoral que se recarga casi en exclusiva por infiltración del agua de lluvia. No existen manantiales importantes en su interior, por lo que las descargas naturales se concentran en la costa, esencialmente en el entorno de la sierra de Irla, en forma de surgencias permanentes, esporádicas y difusas (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.

El número de captaciones es escaso y el volumen de explotación a partir de las mismas relativamente pequeño. Los sondeos se concentran

sobre todo en la zona costera con objeto de satisfacer la demanda agraria y la urbana. El acuífero se encuentra, por tanto, en un estado cuasi natural.

La dificultad para calcular de forma directa los volúmenes descargados al mar a través de dichas surgencias costeras ha impedido establecer un balance hídrico ajustado del acuífero. Además, las diferentes estimaciones 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.*, 2004, 2007) o basados en la disgregación de subcuencas hidrográficas (Ballesteros *et al.*, 2007a), se han ajustado con frecuencia a ámbitos geográficos distintos debido a las diferentes figuras administrativas que han delimitado este acuífero en las últimas décadas.

Los resultados así obtenidos son dispares, con valores de recarga comprendidos entre 440 hm³/a (183,3 mm/a) y 163 hm³/a (67,9 mm/a), o salidas por el frente costero de entre 175 hm³/a (72,9 mm/a) y 64 hm³/a (26,7 mm/a).

3. Hidrodinámica del manantial de Font de Dins

La hidrodinámica general del acuífero viene condicionada por su ubicación tectónica en la zona de tránsito entre la Cordillera Ibérica y las Cadenas Costeras Catalanas. Es decir, por la confrontación de las estructuras y principales ejes de fractura de ambos sistemas.

Ello origina la disposición de los materiales mesozoicos en bloques escalonados (grabens y horts) limitados por fallas lítricas de dirección NW-SE y fracturas perpendiculares a estas. Tal morfología crea un umbral estructural en el área central del acuífero que a su vez genera un escalón piezométrico, de más de 100 m de salto, de dirección NNE-SSO, en línea con las localidades de Albocàcer y Tírig (Figura 2). No obstante, este umbral no implica desconexión hidráulica entre ambos márgenes ya que los flujos subterráneos más importantes se encauzan a través de canales de circulación preferencial asociados a las principales fracturas (Mejías *et al.*, 2007; Domínguez and Ballesteros, 2012; Domínguez *et al.*, 2022b).

La circulación subterránea se organiza así a partir de tres ejes básicos que parten desde el vértice noroccidental del mismo, en el área del anticlinal de Bobalar, con cotas piezométricas en torno a los 600 m s.n.m., y se dirigen hacia la

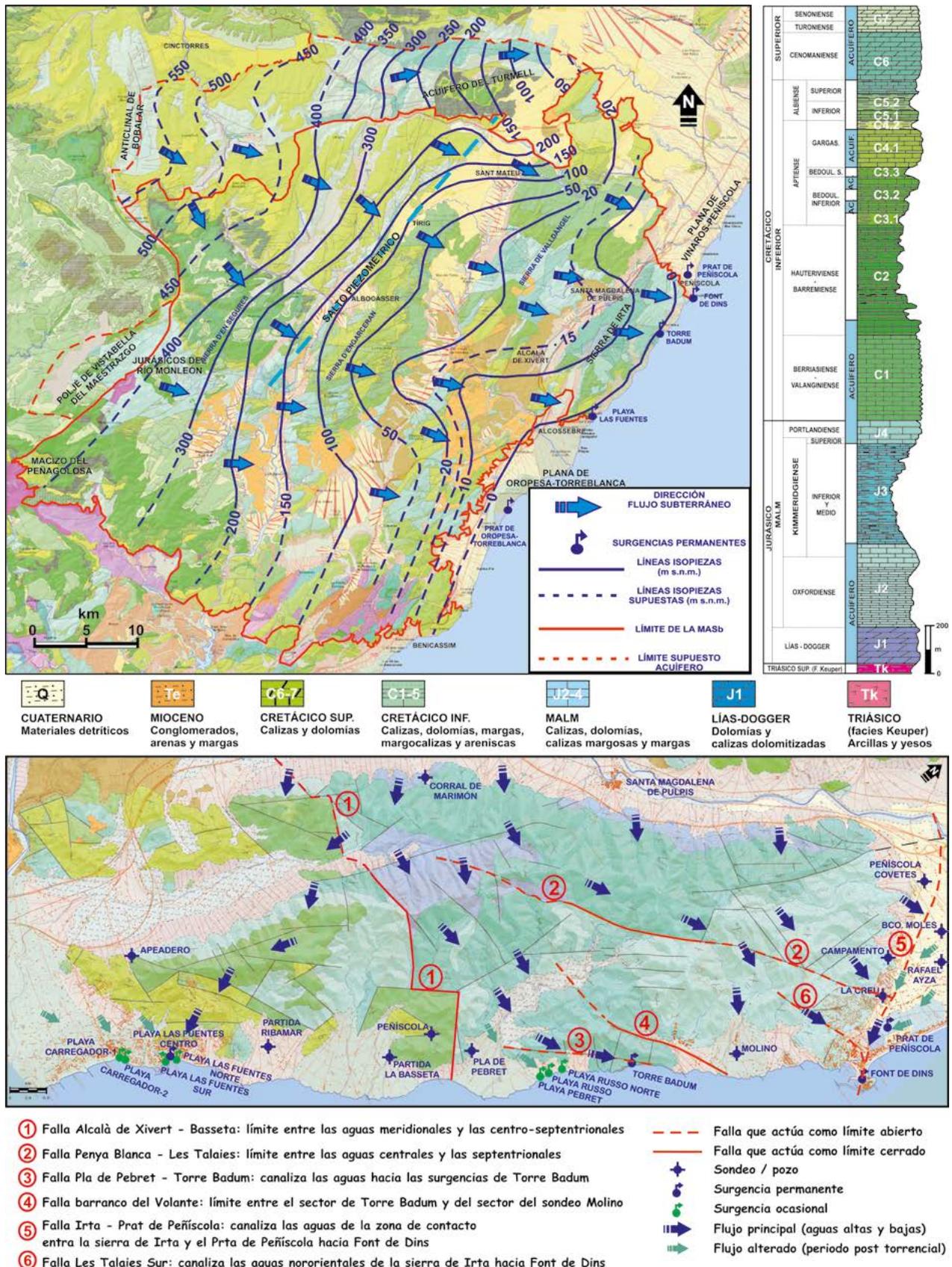


Figura 2. Mapa piezométrico y columna estratigráfica del acuífero de El Maestrazgo (imágenes superiores) e hidrodinámica de la sierra de Irta (imagen inferior) (Modificado de Domínguez *et al.*, 2022b).

Figure 2. Piezometric map and stratigraphic column of El Maestrazgo aquifer (upper images) and hydrodynamics of the Irta mountain range (lower image) (Modified from Domínguez *et al.*, 2022b).

costa en sentido E o ESE con un gradiente hidráulico bajo (1-2 ‰).

Por el margen septentrional circula un flujo, prácticamente independiente, con orientación W-E que se dirige hacia la sierra del Turmell. Un segundo flujo en este sector, algo más meridional, se dirige directamente hacia la costa hasta contactar con el acuífero de la Plana de Vinaroz-Peñíscola. Aquí se producen transferencias subterráneas tanto de forma difusa como a través de fracturas muy vinculadas con los principales “ullales” del Prat de Peñíscola.

En el margen sur, el flujo más importante circula de NW a SE desde el área de Villores-rambla de Celumbres hasta las proximidades de Cuevas de Vinromá, finalmente se dirige hacia las surgencias de Alcocebre (Playa de Las Fuentes) y hacia el acuífero de la Plana de Oropesa-Torreblanca. A este acuífero detrítico también llegan los flujos secundarios del tercio meridional del acuífero originados en las áreas más occidentales, en el sector de Vistabella del Maestrazgo.

Sin embargo, el flujo principal del acuífero se establece por su eje central, de WNW a ESE (Figura 2). Es el que origina las mayores emergencias del sistema, situadas en la vertiente oriental de la sierra de Irta, ya sean manantiales permanentes, como los de Torre Badum y Font de Dins, ocasionales, como los de playa del Russo o del Pebret, descargas difusas o emergencias en el lecho marino alejadas de la línea de costa que, aunque conocidas, no están situadas con precisión (Domínguez and Ballesteros, 2012).

Todas estas surgencias ven alterada su hidroquímica habitual tras eventos o periodos de lluvias intensas. El aumento de su caudal y turbidez es significativo y prácticamente inmediato. Este estado alterado, que se puede prolongar durante días o incluso semanas, dependiendo de la intensidad y duración de las precipitaciones, se debe a que un importante volumen de agua infiltrada llega de forma rápida a los principales canales de circulación del acuífero generando un régimen turbulento con gran capacidad de arrastre de sedimentos.

Pese a este estado alterado, las aguas del manantial de Font de Dins permanecen dulces (C.E. $\approx 500 \mu\text{s/cm}$), con facies bicarbonatadas cálcicas y, salvo puntualmente por exceso de turbidez, aptas para el consumo humano. El resto de surgencias costeras drenan siempre aguas no potables por el elevado contenido en sales y clasificadas como cloruradas-sódicas (Domín-

guez *et al.*, 2022a). Esta clara diferencia entre las aguas de Font de Dins y el resto se debe que los flujos que llegan a este manantial desde áreas interiores del acuífero se canalizan, ya en el entorno de la sierra de Irta (Figura 2), únicamente a través de fracturas (fallas de Penya Blanca-Les Talaies, Irta-Prat de Peñíscola y Les Talaies Sur) que actúan como canales estancos que impiden el contacto con aguas de intrusión marina (Domínguez and Ballesteros, 2012; Mejías *et al.*, 2012; Domínguez *et al.*, 2022b).

4. Metodología

La metodología planteada se fundamenta en correlacionar durante el periodo 2016-2020, los picos más destacados de turbidez en Font de Dins, considerando estos los que superan los 5 UNF/UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez), límite máximo permitido por la legislación en la red de distribución urbana (R.D. 140/2003), con eventos de precipitación previos cuyas características (intensidad y duración) quedan registradas en estaciones meteorológicas de ubicación conocida.

Se asume que la lluvia infiltrada que provoca la turbidez es el trazador en sí, que el punto de inyección de este trazador, es decir, de la lluvia que se infiltra, coincide con el de ubicación de la estación pluviométrica, y que el momento de la inyección corresponde al día en que se registra un volumen acumulado de lluvia en 24 h considerado influyente o significativo ($> 20 \text{ mm/d}$).

Se cuenta con datos horarios de turbidez registrados mediante una sonda de la marca Endress Hauser (modelo CUS52D) instalada en el manantial de Font de Dins de Peñíscola. Estos registros han sido facilitados por la empresa FACSA, que gestiona el suministro de agua en la localidad de Peñíscola. Con los datos horarios se ha calculado el valor medio diario de turbidez, siendo estos valores los empleados en los diferentes cálculos.

Como datos climáticos se han utilizado los registros diarios de precipitación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de los observatorios climáticos de Benicarló, Alcalà de Xivert y Vilafranca del Cid (Tabla 1 y Figura 1).

Se han elegido estas tres estaciones climáticas para abarcar todo el ámbito espacial en el que las aguas meteóricas pueden influir, según el funcionamiento hidrodinámico descrito para el acuífero de El Maestrazgo, sobre el quimismo del

INDICATIVO	NOMBRE	ALTITUD (m s.n.m.)	COORDENADAS (ETRS89)		DISTANCIA A FONT DE DINS (Km)
			X	Y	
8489A	Vilafranca del Cid (Ayuntamiento)	1131	732768	4479473	57
8507	Alcalà de Xivert (AMJASA)	150	776513	4464100	16
8508U	Benicarló San Gregorio	25	788242	4480200	7
Surgencia	Font de Dins	0	789226	4473054	

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio y distancia respectiva hasta el manantial de Font de Dins.

Table 1. Meteorological stations used in the study and respective distance to the Font de Dins spring.

manantial de Font de Dins. En este sentido, se establecen tres áreas de precipitación y de recarga. Las lluvias acaecidas en el entorno de Vilafranca del Cid, localidad situada a 57 km del manantial, generarían la infiltración en las zonas más interiores del acuífero, es decir, las más alejadas a la emergencia. Por su parte, las lluvias registradas en los observatorios de Alcalà de Xivert (distancia a Font de Dins \approx 16 km) y Benicarló (distante 7 km del manantial), se incluyen dentro del entorno próximo a la surgencia (< 20 km). No obstante, la infiltración en la zona de Alcalà de Xivert, al SW del manantial, se produce directamente en los afloramientos mesozoicos de la sierra de Irta, mientras que las lluvias registradas en el observatorio de Benicarló, al norte de la surgencia, serían representativas de una recarga, también cercana, pero producida en el área de confluencia entre el acuífero carbonatado de El Maestrazgo y el detrítico de la Plana de Vinaròs-Peñíscola.

La investigación se desarrolla en tres fases:

En una primera fase se identifican de forma gráfica los picos de turbidez (turbidez > 5 UNT) en el manantial de Font de Dins.

En la fase dos de estudio se analizan en detalle estos episodios de turbidez y su posible relación con las precipitaciones acaecidas previamente en los observatorios climáticos de control. Se estima en 20 mm/d el valor mínimo de precipitación capaz de influir significativamente sobre la turbidez del manantial, es decir, con capacidad para causar una “crisis de turbidez” (Segovia Rosales, 2008) en el acuífero al tener el flujo subterráneo un régimen turbulento con gran capacidad de transporte de elementos arcillosos en suspensión.

Se establecen tres rangos de precipitación diaria: lluvias de incidencia media, comprendidas entre 20 mm/d y 40 mm/d; lluvias de alta incidencia, entre 40 mm/d y 75 mm/d, y precipitaciones

de muy alta incidencia, superiores a 75 mm/d. De igual forma, se asume que las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas de Benicarló y Alcalà de Xivert, por proximidad al manantial de Font de Dins, afectarán de forma mucho más rápida que las producidas en el interior del acuífero, área de Vilafranca del Cid. Para las primeras se analiza su posible influencia en los cuatro días anteriores a los picos de turbidez, mientras que para las segundas dicho análisis se inicia en torno a una semana antes de los repuntes de turbidez. El análisis gráfico de forma individualizada de cada valor anómalo de turbidez en el manantial y por cada una de las estaciones meteorológicas permite establecer periodos de tránsito aproximados y áreas de recarga.

En la tercera fase se realizan correlaciones cruzadas con objeto de corroborar los resultados gráficos mediante la estimación de periodos de desfase, medidos en días, en función del grado de correlación.

5. Resultados y discusión

5.1. 1ª Fase: Correlación gráfica Turbidez-Precipitación

En esta fase, para el periodo 2016-2020, se superponen gráficamente los eventos de turbidez (valores de turbidez media diaria) por encima de 5 UNT en el manantial de Font de Dins y las precipitaciones diarias previas acaecidas a los mismos en los ámbitos correspondientes a las estaciones climáticas de Benicarló (Figura 3a), Alcalà de Xivert (Figura 3b) y Vilafranca del Cid (Figura 3c).

Se comprueba que dichos estadios de turbidez son ocasionales. Durante el año 2016 no se supera en ningún momento el límite fijado, mientras que en el periodo 2017-2020 se registran un total de 15 picos de turbidez superiores a 5 UNT. Destacan los máximos de 45,14 UNT del 28/10/2018,

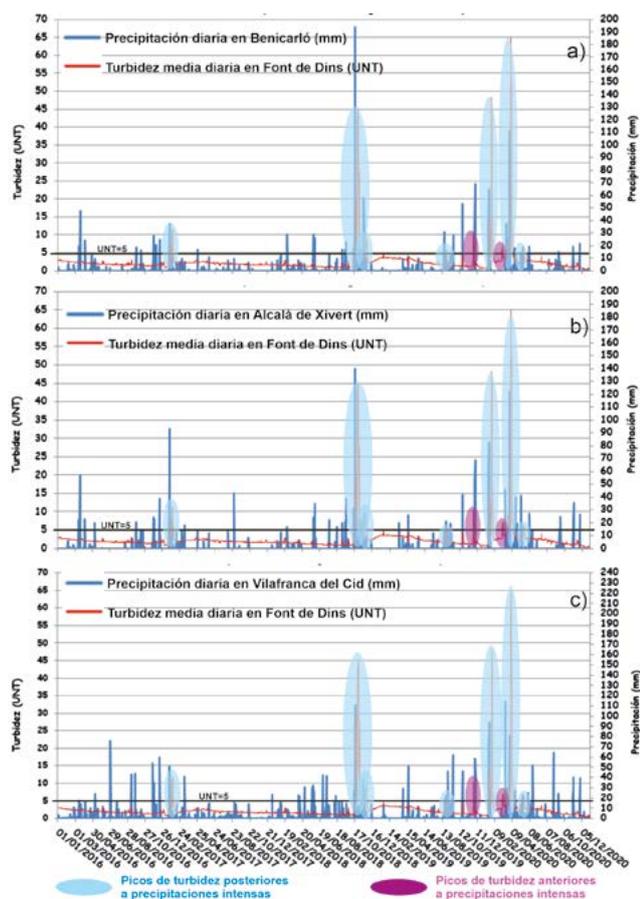


Figura 3. Análisis de la posible relación entre las precipitaciones registradas en los observatorios de Benicarló (Figura 3a), Alcalà de Xivert (Figura 3b) y Vilafranca del Cid (Figura 3c) y la turbidez media diaria en Font de Dins (periodo 2016-2020).

Figure 3. Analysis of the possible relationship between the rainfall recorded at the Benicarló (Figure 3a), Alcalà de Xivert (Figure 3b) and Vilafranca del Cid (Figure 3c) observatories and the average daily turbidity at Font de Dins (period 2016-2020).

los 48,2 UNT del 30/01/2020 y sobre todo los 65 UNT del 19/5/2020.

La mayoría de estos registros altos de turbidez están precedidos de episodios de lluvias significativas, por lo general, acaecidas en todo el ámbito del acuífero. No obstante, los picos de turbidez del 28/11/2019 (10,5 UNT) y del 7/3/2020 (7,09 UNT) no pueden asociarse con lluvias intensas anteriores.

5.2. 2ª Fase: Correlación gráfica de picos de turbidez y máximos de precipitación

En esta etapa se determina qué eventos de precipitación influyen de forma más acusada sobre los picos de turbidez y se analizan sus características (intensidad, duración y ámbito geográfico).

En enero de 2017 (Figura 4a y Tabla 2) se producen dos picos de turbidez registrados los días 23 y 30 con valores de 6,96 y 11,59 UNT, respectivamente.

El primer máximo parece ser consecuencia de las precipitaciones acaecidas fundamentalmente en el entorno de Alcalà de Xivert, donde el día 20, es decir, tres días antes del pico de turbidez, cayeron 93,2 mm (lluvia de muy alta incidencia). También se registró una lluvia de 37,5 mm en el observatorio de Benicarló el día 19 (lluvia de incidencia media).

Asumiendo que las lluvias producidas en zonas del interior del acuífero, de tener influencia sobre la turbidez, la producirán con un mayor retraso, se asume que este pico no habría estado influido por precipitaciones en el entorno de Vilafranca del Cid, ya que no se produjeron lluvias significativas durante las dos semanas previas al evento de turbidez en Font de Dins del día 23.

Sin embargo, el pico de turbidez alcanzado el día 30 del mismo mes, sí puede vincularse a estas lluvias, ya que entre los días 19 y 20 de enero se acumularon más de 87 mm en el área de Vilafranca del Cid (lluvia acumulada de muy alta incidencia) y es transcurridos entre 6 y 7 días cuando se inicia un repunte de la turbidez (27/1/2017) que culmina con los ya indicados 11,59 UNT del día 30. La precipitación de 22 mm registrada el día 27 en el observatorio de Alcalà de Xivert, aunque de menor intensidad, también puede haber influido en este pico.

A finales de octubre y principios de noviembre de 2018 (Figura 4b y Tabla 2) se producen tres picos sucesivos y muy acusados de turbidez con valores de 29,66 UNT (21/10/2018), 45,14 UNT (28/10/2018) y 27,42 UNT (3/11/2018).

En este caso, las intensas precipitaciones acaecidas entre el 17 y el 19 de octubre parecen ser las responsables de los dos primeros repuntes. La respuesta es casi inmediata y tan solo un día después de las lluvias ya se observa un claro incremento en la turbidez, pero los máximos se pueden vincular a los episodios más intensos de precipitación. El 17 de octubre se registraron 58,6 mm en el observatorio de Benicarló, el día siguiente, en esta misma estación climática, precipitaron 193,9 mm, en la de Alcalà de Xivert 140 mm y en Vilafranca del Cid 110,4 mm.

Mientras se asume que el primer pico de turbidez se debe a las lluvias más próximas a la surgencia, con un retardo respectivo de 3 días para el área de Alcalà de Xivert y de 4 para

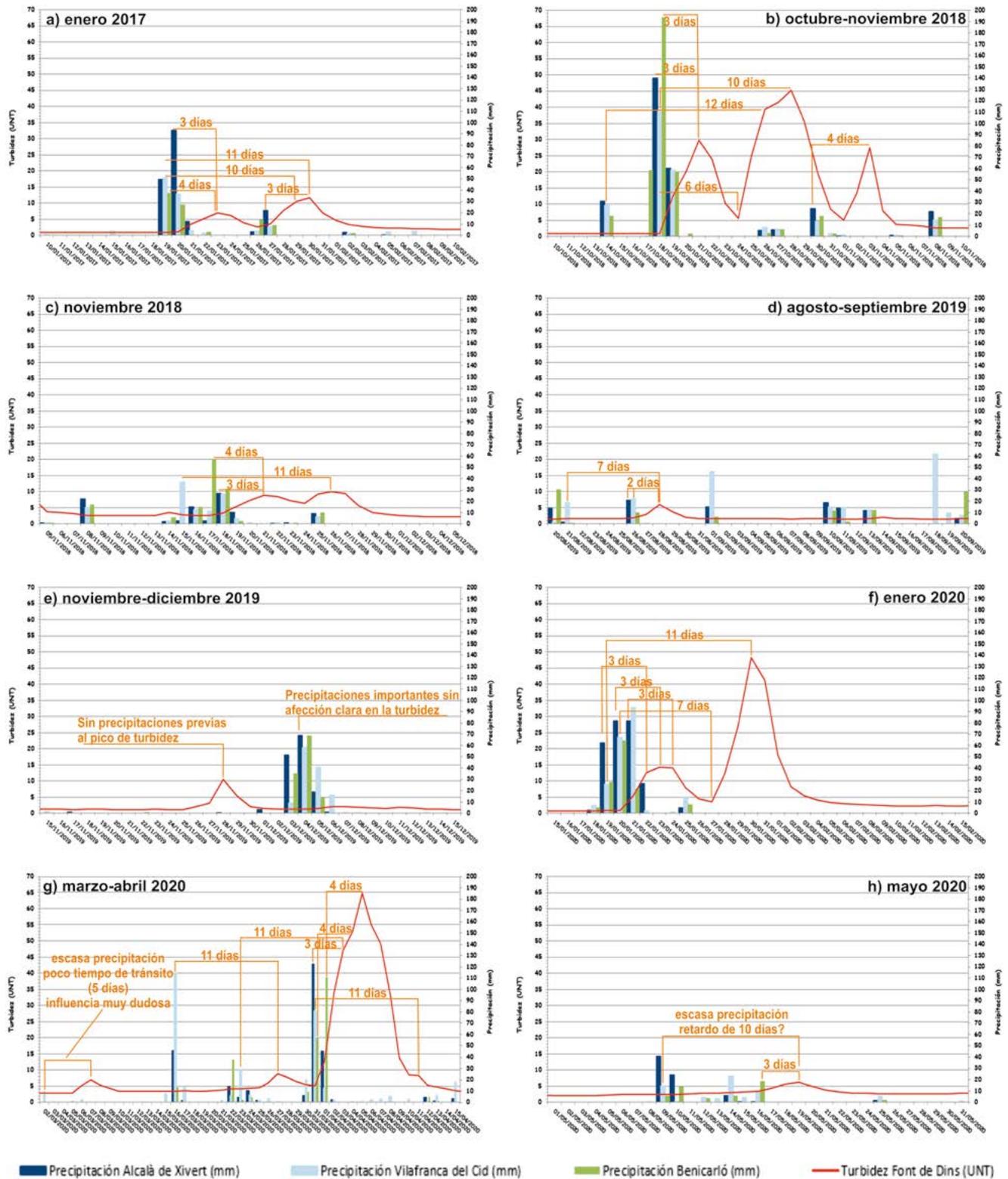


Figura 4. Análisis de la posible influencia de las precipitaciones registradas en los observatorios de Benicarló, Alcalà de Xivert y Vilafranca del Cid con los eventos de turbidez (UNT>5) en Font de Dins.

Figure 4. Analysis of the possible influence of rainfall recorded at the Benicarló, Alcalà de Xivert and Vilafranca del Cid observatories with turbidity events (UNT>5) at Font de Dins.

Benicarló, pese a vincularse esta estación climática a un área más cercana a Font de Dins, el segundo máximo se considera consecuencia

de precipitaciones en áreas mucho más alejadas (entorno de Vilafranca del Cid), estableciendo el inicio del repunte 6 días después de las

PICOS DE TURBIDEZ EN FONT DE DINS > 5 (UNT)		PRECIPITACIONES SIGNIFICATIVAS PREVIAS (mm acumulados en 24 h)								
		BENICARLÓ (DISTANCIA ≈ 7 Km)			ALCALÀ DE XIVERT (DISTANCIA ≈ 16 Km)			VILAFRANCA DEL CID (DISTANCIA ≈ 57 Km)		
Valor (UNT)	Fecha	Valor (mm)	Fecha	Desfase (días)	Valor (mm)	Fecha	Desfase (días)	Valor (mm)	Fecha	Desfase (días)
6.96	23/01/2017	37.5	19/01/2017	4	93.2	20/01/2017	3	3.6	15/01/2017	8
11.59	30/01/2017	13.8	26/01/2017	4	22	27/01/2017	3	51	19/01/2017	11
29.66	21/10/2018	58.6	17/10/2018	4	140	18/10/2018	3	27.2	14/10/2018	7
45.14	28/10/2018	6.3	27/10/2018	1	6	27/10/2018	1	110.4	18/10/2018	10
27.42	03/11/2018	18.4	30/10/2018	4	24.5	30/10/2018	4	7.9	26/10/2018	8
8.82	21/11/2018	57.7	17/11/2018	4	27	18/11/2018	3	14.5	14/08/2018	13
9.99	26/11/2018	10.3	25/11/2018	1	8.9	25/11/2018	1	37.2	18/11/2018	11
5.96	28/08/2019	9.9	26/08/2019	2	21	26/08/2019	2	19	21/08/2019	7
10.5	28/11/2019									
14.29	23/01/2020	27.9	19/01/2020	4	62.5	19/01/2020	4			
48.2	30/01/2020							26	19/01/2020	11
7.09	07/03/2020									
8.94	27/03/2020	4.5	24/03/2020	3	10	24/03/2020	3	114.3	16/03/2020	11
65	05/04/2020	111.2	01/04/2020	4	45	01/04/2020	4	29.1	23/03/2020	13
6.18	19/05/2020	18.8	16/05/2020	3	0.5	16/05/2020	3	14.2	09/05/2020	10

Tabla 2. Picos de turbidez en Font de Dins (> 5 UNT) y máximos de precipitación en 24 h. previos en los observatorios de Vilafranca del Cid, Alcalà de Xivert y Benicarló.

Table 2. Turbidity peaks in Font de Dins (> 5 NTU) and precipitation maximums in 24 h. previous ones in the observatories of Vilafranca del Cid, Alcalà de Xivert and Benicarló.

lluvias en esa zona y alcanzando el pico transcurridos unos 10 días.

El tercer pico, de primeros de noviembre, se asocia a precipitaciones de incidencia media, de 18,4 mm en Benicarló y 24,5 mm en Alcalà de Xivert producidas el día 30 de octubre, con un desfase en ambos casos de 4 días.

En el último tercio de noviembre de 2018 (Figura 4c y Tabla 2) se vuelven a detectar valores altos de turbidez con dos mesetas de 8,82 UNT el día 21 y 9,99 UNT el día 26. La primera se considera causada por los 57,7 mm acumulados en 24 h en el observatorio de Benicarló el día 17 (4 días de desfase) y los 27 mm del día 18 medidos en Alcalà de Xivert (3 días de retardo). Sin embargo, el segundo repunte se asocia a las lluvias iniciadas el día 15 en la zona de Vilafranca del Cid con 37,5 mm, marcando en este caso un retardo de 11 días entre la precipitación y el pico máximo de turbidez.

El pequeño pico de 5,96 UNT registrado el 28 de agosto de 2019, únicamente se puede asociar a una precipitación de incidencia media (21 mm) producida dos días antes en el entorno de Alcalà de Xivert (Figura 4d y Tabla 2).

Uno de los pocos registros elevados de turbidez que no pueden asociarse con precipitaciones

previas es el producido el 28 de noviembre de 2019 (Figura 4e y Tabla 2), cuando se miden 10,5 UNT sin que se produzcan lluvias durante los días anteriores ni en las proximidades del manantial ni en áreas alejadas.

En enero de 2020 (Figura 4f y Tabla 2) se registran dos nuevos eventos de turbidez con máximos respectivos de 14,29 UNT el día 23 y 48,2 UNT el día 30.

El primer repunte es más laxo que el segundo y se debe a las lluvias que se inician el día 19 con 27,9 mm en Benicarló, 62,5 mm en Alcalà de Xivert y 26 mm en Vilafranca de Cid. Estas lluvias se prolongan durante varios días, de tal forma que entre el 19 y el 22 de enero se llegaron a acumular 253 mm en Alcalà de Xivert, 200,3 mm en Benicarló y 188,9 en el área de Vilafranca del Cid. Tal como se puede observar en el gráfico correspondiente (Figura 4f), cada día de lluvia en las inmediaciones de la surgencia marca un valor elevado de turbidez con un retardo de tres días.

El segundo pico, mucho más agudo, se considera producto, únicamente, de las precipitaciones en el interior del acuífero (área de Vilafranca del Cid), ya que no se producen lluvias en zonas próximas al manantial en los tres o cuatro días

anteriores a este repunte. Se inicia el mismo unos 7 días después de comenzar las lluvias y se fija el máximo con un desfase de entre 10 y 11 días.

El 7 de marzo de 2020 (Figura 4g y Tabla 2) se registra un pequeño pico de turbidez de 7,09 UNT que no puede vincularse con ningún episodio significativo de lluvias.

Sin embargo, el día 27 del mismo mes se alcanza un valor de turbidez de 8,94 UNT que parece provocado por las lluvias (114,3 mm) registradas 11 días antes en el área de Vilafranca del Cid.

El 5 de abril se alcanzó el valor más alto de turbidez del periodo de registro con 65 UNT. Este máximo viene precedido de otros valores muy destacados, 47,18 UNT el día 3 y 53 UNT el día 4.

Aunque la turbidez aumenta de forma casi inmediata en el manantial tras precipitaciones intensas, los valores máximos se pueden asociar a los acumulados máximos en 24 h de precipitación. Así, por ejemplo, los altos valores de turbidez del día 3 se correlacionan con los registros de precipitación de 122 mm medidos en el observatorio de Alcalà de Xivert el día 31 de marzo y los 29,1 mm precipitados 11 días antes en Vilafranca del Cid.

El dato de turbidez del día 4 (53 UNT) está precedido de una precipitación de 57,3 mm medidos en la estación climática de Benicarló el día 31 de marzo (4 días de retardo) y de 45 mm en Alcalà de Xivert el día 1 de abril (3 días de retardo).

Mientras que el valor de 65 UNT es fruto de la lluvia del día 1 de abril registrada en el área de Benicarló (111,2 mm).

Este episodio de turbidez abarca desde el día 1 al 10 de abril y se caracteriza por una respuesta

muy rápida a las precipitaciones, por unos máximos muy destacados y por reflejar la influencia de lluvias persistentes durante varios días y en áreas geográficas diversas. Incluso, se puede asociar un ligero repunte de la turbidez el día 11 de abril (8,34 UNT) que rompe la tendencia descendente y que puede deberse a los 81 mm de lluvia registrados el 31 de marzo en el observatorio de Vilafranca del Cid, es decir, la respuesta se produce con un retardo de 11 días (Figura 4g y Tabla 2).

El último registro de turbidez por encima de 5 UNT se produce el 19 de mayo de 2020 (Figura 4h y Tabla 2) con un valor de 6,18 UNT. Este pico no tiene una clara relación con lluvias previas, solo pueden vincularse con el mismo precipitaciones escasas, de baja incidencia, en la zona más próxima al manantial. Así, en el observatorio de Benicarló, precipitan 18,8 mm el día 16, es decir, tres días antes. No se estima que los 14,2 mm de lluvia caídos en Vilafranca del Cid el día 9 tengan mucha influencia sobre dicho repunte, pese a que el retardo temporal de la respuesta (10 días) entra dentro del rango estimado para otros eventos de turbidez asociados a precipitaciones en esta zona.

5.3. 3ª Fase: Análisis estadístico de los datos. Correlación cruzada entre las precipitaciones y la turbidez

En esta fase se comprueba, mediante la realización de correlaciones cruzadas, el grado de correlación entre las precipitaciones registradas en cada observatorio y los valores de turbidez en Font de Dins y a partir de los mismos se determinan los periodos de desfase más ajustados para cada área de precipitación.

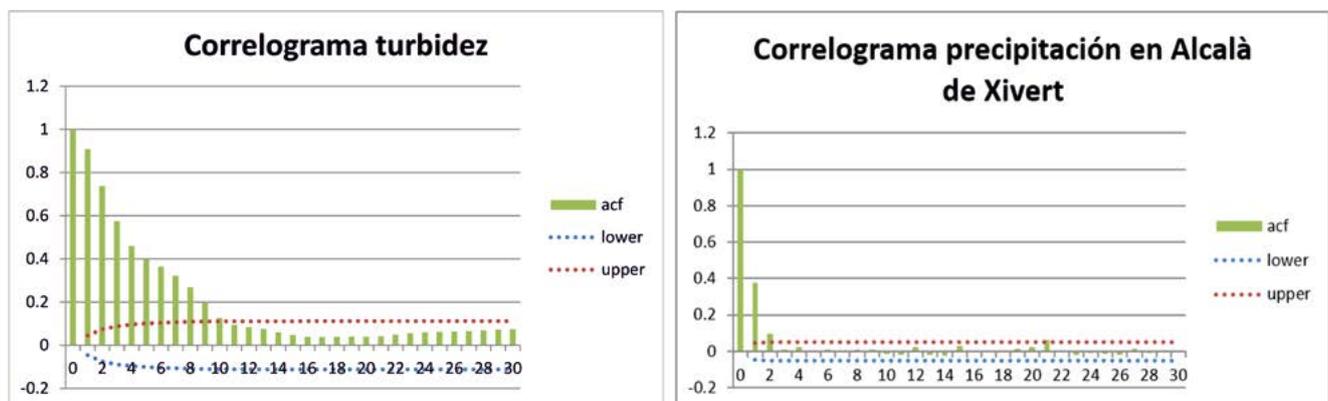


Figura 5. Correlogramas de la turbidez en Font de Dins y la precipitación registrada en el observatorio de Alcalà de Xivert para el periodo 2016-2020.

Figure 5. Correlograms of the turbidity in Font de Dins and the precipitation recorded in the Alcalà de Xivert observatory for the period 2016-2020.

Se ha comprobado la estacionariedad de las series mediante la ejecución de los correlogramas de la precipitación y la turbidez (Figura 5). El descenso rápido de los correlogramas indica que, en ambos casos, se analizan variables estacionarias. Esta circunstancia, es decir, que sus medias y varianzas sean independientes del tiempo, es un requisito a exigir para el cálculo de la correlación cruzada (Guevara, 2014).

La precipitación se toma como variable independiente, mientras que la turbidez en Font de Dins es la variable dependiente.

Se parte de la premisa de que las precipitaciones en el área de Vilafranca del Cid, distante 57 km del manantial, ejercen una influencia sobre la turbidez de Font de Dins con un retraso mucho mayor (> 6 días) al que se da con lluvias acaecidas en los entornos de Alcalà de Xivert (distancia a Font de Dins de 16 km) o Benicarló (distancia a Font de Dins de 7 km). De esta forma, se consideran no vinculadas correlaciones elevadas en los entornos de Benicarló y Alcalà de Xivert con retardos superiores a 5 días y en Vilafranca del Cid con retardos menores a 6 días. Es decir, correlaciones altas durante los primeros días tras las lluvias se asocian a precipitaciones acaecidas cerca del manantial y posteriores picos de correlación a lluvias más lejanas (Tabla 3 y Figura 6).

Las correlaciones cruzadas entre la precipitación producida en los entornos de Benicarló y Alcalà de Xivert y la turbidez en el manantial muestran, para ambos casos, una respuesta rápida. El día siguiente a precipitaciones significativas ya se observa un repunte claro en la turbidez de las aguas.

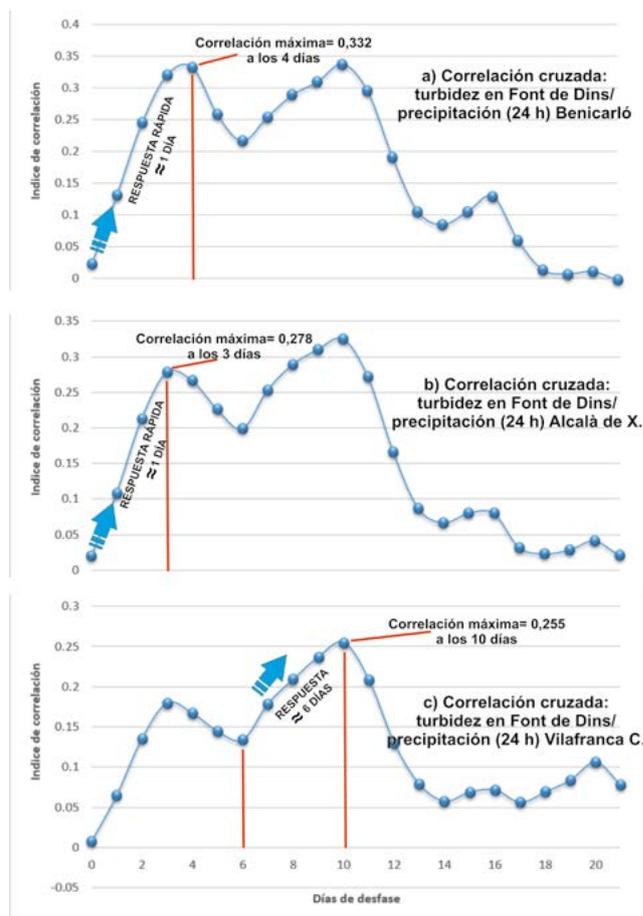


Figura 6. Gráficos de correlación cruzada entre la turbidez en el manantial de Font de Dins y las precipitaciones registradas en los observatorios de Benicarló (Figura 6a), Alcalà de Xivert (Figura 6b) y Vilafranca del Cid (Figura 6c).

Figure 6. Cross-correlation graphs between the turbidity in the Font de Dins spring and the rainfall recorded at the Benicarló (Figure 6a), Alcalà de Xivert (Figure 6b) and Vilafranca del Cid (Figure 6c) observatories.

ÁREA DE PRECIPITACIÓN					
BENICARLÓ		ALCALÀ DE XIVERT		VILAFRANCA DEL CID	
ÍNDICE DE CORRELACIÓN	RETARDO (días)	ÍNDICE DE CORRELACIÓN	RETARDO (días)	ÍNDICE DE CORRELACIÓN	RETARDO (días)
0,022	0	0,020	0	NO VINCULADO	6
0,131	1	0,108	1	0,179	7
0,244	2	0,213	2	0,209	8
0,32	3	0,278	3	0,237	9
0,332	4	0,267	4	0,255	10
0,258	5	0,226	5	0,208	11
0,216	6	0,199	6	0,13	12
NO VINCULADO	7	NO VINCULADO	7	0,078	13

Tabla 3. Índice de correlación cruzada entre la precipitación en las áreas de Benicarló, Alcalà de Xivert y Vilafranca del Cid y la turbidez en el manantial de Font de Dins.

Table 3. Cross-correlation index between rainfall in the Benicarló, Alcalà de Xivert and Vilafranca del Cid areas and turbidity in the Font de Dins spring.

En la correlación de las precipitaciones en el entorno de Benicarló y la turbidez en Font de Dins (Figura 6a y Tabla 3), transcurrido solo un día desde las lluvias se pasa de un índice de correlación de apenas 0,022 a uno de 0,13, para alcanzar su máximo (0,33) a los cuatro días de producirse las lluvias, si bien, el índice de correlación el tercer día roza dicho máximo con 0,32. A partir del cuarto día el índice de correlación muestra un descenso claro.

La respuesta de la turbidez en el manantial como consecuencia de las lluvias en la zona de Alcalà de Xivert (Figura 6b y Tabla 3), igualmente, es casi inmediata. Los índices de correlación pasan de 0,020 a 0,11 el día posterior a las precipitaciones, pero, en este caso, la máxima correlación se alcanza al tercer día con un valor de 0,28 que prácticamente se mantiene el cuarto día (0,27). Posteriormente este índice decrece bruscamente.

Finalmente, la posible afección de lluvias alejadas a la surgencia se ha valorado realizando la correlación cruzada de la turbidez con los registros de precipitación de la estación pluviométrica de Vilafranca del Cid, situada a 57 km de la emergencia (Figura 6c y Tabla 3). En este caso el análisis se centra en el repunte del índice de correlación que se produce a partir del sexto día tras las lluvias. El máximo se alcanza el día diez con un valor de 0,25, si bien el noveno día tras las lluvias el índice de correlación se fija ya en 0,24. A partir de ese día la correlación entre ambas variables desciende de forma significativa.

El análisis de todos los resultados permite establecer periodos de tránsito (días de retardo en la respuesta) y calcular velocidades aproximadas (m/d) del flujo subterráneo (Tabla 4).

Se comprueba que las lluvias en las áreas más cercanas al manantial (< 20 km) influyen sobre su turbidez de forma casi inmediata, marcan ascensos claros en las curvas apenas transcurridas 24 horas desde las mismas y provocan los picos

máximos de turbidez pasados entre 3 y 4 días, mientras que las lluvias en sectores alejados (ámbito de Vilafranca del Cid) tardan unos 6 días en afectar al manantial y el pico de turbidez se produce con unos 10 días de retardo.

Es clara la proporcionalidad entre el valor máximo de estos picos y la intensidad de las lluvias, así como la persistencia de la turbidez y la duración y extensión espacial de las precipitaciones. Así, se producen modificaciones en la turbidez por lluvias muy intensas precipitadas en cortos espacios de tiempo y muy locales, acaecidas cerca o lejos de la surgencia, que dan picos agudos de turbidez, y por precipitaciones menos intensas, pero que se prolongan durante varios días acumulando volúmenes importantes o que afectan a amplios sectores del acuífero y que ocasionan ascensos en los registros de turbidez más laxos y más prolongados en el tiempo.

En cuanto a las velocidades de circulación del flujo subterráneo, las aguas infiltradas en la sierra de Irta (observatorio de Alcalà de Xivert) viajan a mayor velocidad ($v \approx 4667$ m/d) que las originadas por lluvias registradas en el observatorio de Benicarló ($v \approx 2042$ m/d). Si bien, la velocidad estimada más alta ($v \approx 5758$ m/d) es la calculada para las aguas infiltradas a mayor distancia (sector de Vilafranca del Cid).

Se trata de velocidades elevadas (2042 – 5758 m/d), pero hay que tener en cuenta que estos resultados se deben a que las estimaciones se realizan, precisamente, en periodos en los que el flujo subterráneo tiene un régimen turbulento debido a la irrupción brusca de un volumen importante de agua infiltrada que aprovecha las fracturas o conjuntos de fracturas más desarrollados como vías de circulación de alta velocidad (Domínguez and Ballesteros, 2012; Mejías *et al.*, 2012; Domínguez *et al.*, 2022b). El caudal drenado por el manantial aumenta sensiblemente al incrementarse la velocidad del fluido que, a su vez, gana capacidad para removilizar sedimentos

ÁREA DE PRECIPITACIÓN	DISTANCIA APROX AL MANANTIAL DE FONT DE DINS (m)	RETARDO (días)	RANGO VELOCIDAD (m/d)	VELOCIDAD MEDIA (m/d)
BENICARLÓ	7000	3 - 4	2333 - 1750	2042
ALCALÀ DE XIVERT	16000	3 - 4	5333 - 4000	4667
VILAFRANCA DEL CID	57000	9 - 11	6333 - 5182	5758

Tabla 4. Periodos de tránsito de las aguas infiltradas en el acuífero desde diferentes áreas y velocidades de circulación.

Table 4. Transit periods of water infiltrated into the aquifer from different areas and circulation speeds.

ACUÍFERO KÁRSTICO	VELOCIDAD (m/d)	REFERENCIA
LARRA	500	Eraso, A. 1985/86
OJO GUAREÑA	1450 (estiaje) 4970 (en carga)	
SIERRAS DE URBIÓN Y NEILA	648-912 (aguas bajas)	Sanz-Pérez, E. 1996
FUENTONA DE MURIEL	500 (aguas bajas) 3000 (aguas altas)	Pérez-Santos, J.J. 2007
CAÑÓN DEL RÍO LOBOS	460 (aguas bajas) 3000 (aguas altas)	Segovia-Rosales, R. 2008
SIERRA DE GRAZALEMA	500 - 2160	IGME-Agencia Andaluza del Agua. 2010
MARMORÉ-MONTE PERDIDO	340-440 (aguas bajas)	Lambán, L.J. <i>et al.</i> 2020

Tabla 5. Velocidades del flujo subterráneo estimadas mediante trazadores químicos en acuíferos kársticos de la península ibérica.

Table 5. Groundwater flow velocities estimated by chemical tracers in karstic aquifers of the Iberian Peninsula.

y generar turbidez. En este sentido, podría asumirse que en los largos periodos en los que la turbidez no muestra picos significativos, la circulación del flujo subterráneo en el acuífero es lenta, y las variaciones de caudal en las emergencias mínimas, mientras que durante los esporádicos episodios de crisis de turbidez el flujo es rápido y el caudal drenado en los manantiales aumenta notablemente y de forma casi inmediata.

Otros factores que pueden influir en la temprana afección del manantial con las lluvias son que, a diferencia de los ensayos con trazadores químicos en los que el vertido del trazador es prácticamente instantáneo y muy localizado, las estimaciones realizadas en el presente estudio emplean como trazador precipitaciones que, en general, se producen sobre amplias zonas geográficas y se prolongan durante periodos temporales de horas o días. Así, una lluvia vinculada al observatorio de Vilafranca del Cid puede haberse producido en zonas mucho menos distantes de esos 57 km que separan el observatorio y el manantial. De igual forma, las aguas de escorrentía se encauzan rápidamente por la red de barrancos y regueros que actúan como áreas de recarga preferencial (Ballesteros *et al.*, 2007a) pudiendo infiltrarse en sectores más cercanos a la surgencia.

Incluso con estos condicionantes, los resultados obtenidos son similares a los de estudios en medios kársticos de la península ibérica, de simi-

lares características, mediante trazadores químicos convencionales, especialmente en ensayos realizados en épocas de aguas altas (3000 – 4970 m/d), cuando el acuífero se encuentra en carga (Tabla 5).

7. Conclusiones

Se ha comprobado la validez del empleo de la turbidez como un trazador natural.

La metodología empleada ha permitido comprobar, para el periodo 2016-2020, que el 90% de los picos de turbidez con valores superiores a 5 UNT registrados en el manantial de Font de Dins está relacionado con precipitaciones superiores a 20 mm/24h producidas en el acuífero de El Maestrazgo.

Se ha determinado, gráfica y estadísticamente, que a la surgencia de Font de Dins llegan aguas procedentes tanto de su entorno más próximo como de puntos muy alejados del acuífero, estableciendo áreas de recarga y vulnerabilidad.

También se han establecido tiempos de retardo aproximados y velocidades del flujo subterráneo que resultan algo elevadas (2042 – 5758 m/d), pero que se consideran válidas y orientativas de la velocidad máxima del flujo subterráneo en acuíferos kársticos.

Si bien la metodología planteada tiene como principal inconveniente, al compararla con los ensayos con trazadores químicos, la falta de in-

mediatez en los resultados, puesto que necesita recopilar durante un prolongado periodo de tiempo registros continuos de turbidez para establecer la correlación con las lluvias. Es decir, se requiere instalar turbidímetros fijos en una o varias surgencias del sistema, presenta numerosas ventajas:

- Abre la vía para estudios a medio-largo plazo con costes realmente bajos.
- Puede implementarse en acuíferos en los que no se cuenta con puntos de inyección conocidos (sumideros, pozos o sondeos).
- Al poder asociarse la turbidez con precipitaciones cercanas o lejanas del punto de control y de carácter local y/o regional, los resultados se vinculan a ámbitos geográficos que pueden ser muy extensos y se define con mayor precisión la hidrodinámica general del sistema.
- Permite identificar las áreas de recarga preferencial, las de mayor vulnerabilidad o sectores no vinculados al manantial.

Finalmente, conviene indicar que la instalación de turbidímetros, especialmente en manantiales destinados al abastecimiento urbano, además de para aplicar esta metodología, permite la alerta temprana de otros posibles fenómenos de contaminación (afección bacteriana, por cenizas tras incendios, etc.)

Agradecimientos

Los autores agradecen la inestimable ayuda ofrecida por la empresa FACSA que ha cedido de manera desinteresada los registros de turbidez del manantial de Font de Dins que han permitido la realización del presente artículo.

Referencias

- Andreo Navarro, B., Vías Martínez, J. M., López Geta, J. A., Carrasco, F., Durán Valsero, J. J., and Jiménez, P. (2004). Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos. *Boletín Geológico y Minero*, 115(2), 177-186.
- 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). En: *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 Navarro, 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., Mediatto, 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, pp. 535.
- Antón-Pacheco, C., Ballesteros Navarro, 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.
- Ballesteros Navarro, B. J. (1989). Estudio Hidrogeológico del Maestrazgo, Castellón. Fondo documental del IGME, 158 pp.
- Ballesteros Navarro, 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.
- Canerot, J. (1974). Recherches géologiques aux confins des chaînes ibérique et catalane (Espagne). Tesis Doctoral Universidad de Toulouse. ENADIM-SA 5(2), 517 p.
- 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 Irla. Mancomunidad del Baix Maestrat (Castellón). Inédito.
- Domínguez Sánchez, J. A., and Ballesteros Navarro, 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*, 29 (Vol. 1), 255-269.
- Domínguez Sánchez, J. A., Rosado Piqueras, S., Mejías Moreno, M., and Ballesteros Navarro, B. (2022a). Caracterización hidroquímica de las surgencias costeras de la sierra de Irla. Acuífero de El Maestrazgo (Castellón). *Boletín Geológico y Minero de España*, 133(1), 103-117.
- Domínguez Sánchez, J. A., Rosado Piqueras, S., Mejías Moreno, M., and Ballesteros Navarro, B. (2022b). Hidrodinámica de las surgencias costeras de la sierra de Irla. *Boletín Geológico y Minero de España*, 133(1), 103-117.

- rra de Irta tras eventos de precipitación torrencial. Acuífero de El Maestrazgo. Castellón. Boletín Geológico y Minero de España, 133(1), 141-153.
- Eraso, A. (1985-86). Método de predicción de las direcciones principales de drenaje en el karst. KOBIE (Serie Ciencias Naturales). Bilbao. Bizkaiko Foru Aldundia – Diputación Foral de Viizcaya. N°. XV, 1985/86.
- García-Orellana, J., García-Solsona, E., Masqué, P., Ballesteros Navarro, 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. N° 17. 301-309. Madrid.
- García-Solsona, E., García-Orellana, J., Masqué, P., Mejías Moreno, M., and Ballesteros Navarro, 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., García-Orellana, J., Masqué, P., Rodellas, V., Mejías Moreno, M., Ballesteros Navarro, 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., Rodellas, V., Mejías Moreno, M., and Ballesteros Navarro, B. J. (2010b). Comparison of groundwater discharge estimates from Ra Isotopes, ^{222}Rn and direct measurements in the Peñíscola bay (eastern Spain). Radium and Radon isotopes as Environmental Tracers. Jerusalem (Israel), March 14-19, 2010.
- Guevara Díaz, J. M. (2014). Uso correcto d la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. Terra, 30, n° 47. Caracas, jun 2014.
- Huerta, P., and Carrasco, P. (2018). La geología del manantial de Los Caños (Vizcaínos, sierra de la Demanda, Burgos) y su relación con los problemas de turbidez. Geogaceta, 64, 55-58.
- IGME-Agencia Andaluza del Agua. Consejería de Medio Ambiente (2010). El agua subterránea en el parque Natural Sierra de Grazalema (Cádiz y Málaga). Colección: Hidrogeología y espacios Naturales.
- IGME-EPTISA (2005). Mejora del conocimiento hidrológico 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 n° 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-Peñíscola. Inédito.
- Lambán Jiménez, L. J., Jódar Bermidez, J., and González Ramón, A. (2020). Avances en el conocimiento hidrogeológico del sistema kárstico que drena el macizo Marboré-Monte Perdido. VI Jornada de Investigación, 2 de diciembre de 2020. Parque nacional de Ordesa y Monte Perdido.
- Mejías Moreno, M., Plata, J. L., Ballesteros Navarro, 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. In: López Geta, J. A., Fernández Rubio, R., Ramos González, G. (Eds.), 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 Navarro, 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 Navarro, B. J., Antón-Pacheco, C., Domínguez Sánchez, J. A., García-Orellana, J., García-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.
- Pecly, J. O. G., and Roldao, J. S. F. (2011). Using the effluent turbiditu as an environmental tracer: application to a domestic sewage and comparison with dye tracer data. International Symposium on Outfall Systems, May 15-18, 2011, Mar del plata, Argentina.
- Pérez Santos, J. J. (2007). Hidrogeología del sistema kárstico de la Fuentona de Muriel (Soria). Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Pernía Llera, J. M., Meléndez Asensio, M., and López Gutiérrez, J. (2006). Estudio Hidrogeológico sobre el estado de los manantiales situados en la traza del túnel de la línea de alta velocidad León-Oviedo. Fuente Vieja de Beberino; Abastecimiento a Beberino. IGME. Inédito.
- Rico, G., Juignet, P., and Meyer, R. (1993). Groundwater turbidity in Normandy chalk aquifers; a natu-

- ral tracer. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie 2, Mecanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre* 316(2), 225-230.
- Sanz Pérez, E. (1996). Hidrodinámica de los acuíferos kársticos de las sierras de Urbión y Neila (Burgos). *Estudios Geológicos*, 52, 279-305.
- Segovia Rosales, R. (2008). El drenaje subterráneo en el acuífero kárstico del cañón del río Lobos (Soria-Burgos). Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 146 pp.
- 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.