



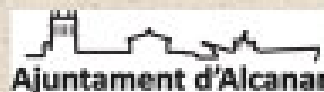
Asociación Internacional de Hidrogeólogos
Grupo Español

COLABORAN:

ENGINEERS
INTERNACIONAL



Agència Catalana
de l'Aigua



Un paseo hidrogeológico por la Plana d'Alcanar

22 de marzo de 2025



EXCURSIÓN GRATUITA Y GUIADA

Plazas limitadas.

Se recomienda llevar ropa y calzado cómodo.

Desplazamiento en autobús (gratuito).

PUNTO DE ENCUENTRO:

Alcanar, Ronda de Circunvalación,
a la altura del supermercado Bonpreu.

IMPRESCINDIBLE RESERVAR PREVIAMENTE

e-mail de contacto: mpbarrero@gencat.cat

Hora de encuentro: 9:00

Hora de vuelta (aproximada): 14:30

Información de la excursión en: <https://www.iah-ge.org/hidrogeodia/>

COLABORA

CON LA AIH-GE Y EL PROGRAMA 'APADRINA UNA ROCA'

PARA MEJORAR LA PROTECCIÓN DEL PATRIMONIO HIDROGEOLÓGICO

¿QUIERES
COLABORAR?



CSIC | IGME 175

EL HIDROGEODÍA

El **Hidrogeodía** es una jornada de divulgación de la Hidrogeología (rama de la geología que estudia las aguas subterráneas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas, químicas y sus interacciones con el medio físico, biológico y la acción del hombre), que se celebra con motivo del **Día Mundial del Agua** (22 de marzo).

Esta jornada está promovida por el Grupo Español de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH-GE) y para su realización se ha contado con la colaboración de l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA), del Col·legi d'Enginyers Tècnics Industrials de Tarragona (CETIT) y de l'Ajuntament d'Alcanar. La jornada consta de **actividades gratuitas**, guiadas por hidrogeólogos/as y abiertas a todo tipo de público, sin importar sus conocimientos en la materia.

En la **provincia de Tarragona**, el **Hidrogeodía 2025** se celebra en la Plana d'Alcanar. Se llevará a cabo una visita guiada por varios puntos representativos, siendo el hilo argumental de la visita las aguas subterráneas de esta zona y las particularidades de la gestión de los acuíferos costeros y su descarga al mar. Se realizarán cinco paradas temáticas:

- 1) Explanada exterior de la Ermita del Remei en Alcanar (contexto general).
- 2) Las captaciones de aguas subterráneas y la constitución de las comunidades de regantes.
- 3) Desembocadura del riu Sénia.
- 4) Cap de Timbes en Les Cases d'Alcanar.
- 5) Playa de l'Estanyet en Les Cases d'Alcanar.

ITINERARIO

El punto de encuentro de nuestro recorrido es la Ronda de Circunvalación en Alcanar a la altura del supermercado Bonpreu. Los participantes tienen zonas para aparcar sus coches en esta parte de la población de Alcanar.

Recepción. 9:00 h

Sobre las 9:10 salida en autobús hacia la Ermita del Remei.

Parada I. EXPLANADA EXTERIOR DE LA ERMITA DEL REMEI. Se explicará el contexto geológico e hidrogeológico de la Masa de agua subterránea Plana d'Alcanar. Es esta zona probablemente la mayor productora de cítricos de Cataluña, y por lo tanto con un gran volumen de explotación de aguas subterráneas.

El sistema está formado por 2 acuíferos: un acuífero inferior formado por las calizas mesozoicas que constituyen las sierras colindantes, como el Massís dels Ports o la Serra del Montsià, y un acuífero superior formado por materiales cuaternarios de relleno procedentes de la erosión de estas sierras.



Figura 1. Vistas del exterior de la ermita del Remei.

Parada 2. POZO “SOCIETAT AGRÍCOLA POU VERGE DEL REMEI”.

Es un pozo abierto con la maquinaria de elevación original. Está incluido en el inventario del Patrimonio Arquitectónico de Cataluña y a partir de su funcionamiento, se constituyó la comunidad de regantes más antigua del término municipal de Alcanar. Está constituida por 138 socios y se riegan unas 60 has de cítricos y huerta. Las comunidades de regantes son entidades asociativas de gran tradición en la Plana d’Alcanar.



Figura 2. “Pou de la Verge” en Alcanar.

Parada 3. DESEMBOCADURA DEL RIU SÉNIA.

El Sénia nace en Els Ports y está regulado en su tramo alto por el embalse de Ulldecona. En la zona de su desembocadura en el Mediterráneo, explicaremos la relación del río con el acuífero inferior carbonatado (acuífero Regional de la Plana de la Galera) y con el acuífero superior cuaternario.



Figura 3. Zona de la desembocadura del Sénia.

Parada 4. CAP DE TIMBES.

Frente a la costa de les Cases d’Alcanar se encuentra el antiguo yacimiento petrolífero Amposta, que mediante el Proyecto Castor iba a ser transformado en el mayor almacén subterráneo de gas natural de España. Explicaremos la estructura geológica y estructural de este yacimiento que representa la continuidad bajo la superficie del mar Mediterráneo del acuífero Regional de la Plana de la Galera.

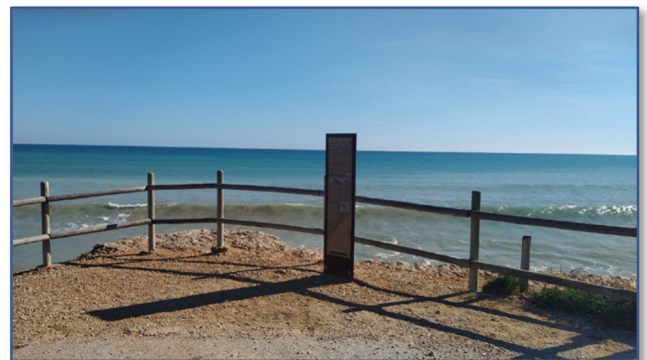


Figura 4. Cap de Timbes en Les Cases d’Alcanar, frente a la plataforma Castor.

Parada 5. PLAYA DE L’ESTANYET.

Con la sierra del Montsià de fondo, que representa la zona de recarga de la masa de agua subterránea de la Plana d’Alcanar, hablaremos de las redes de control existentes en la zona, y de la gestión de los acuíferos costeros.

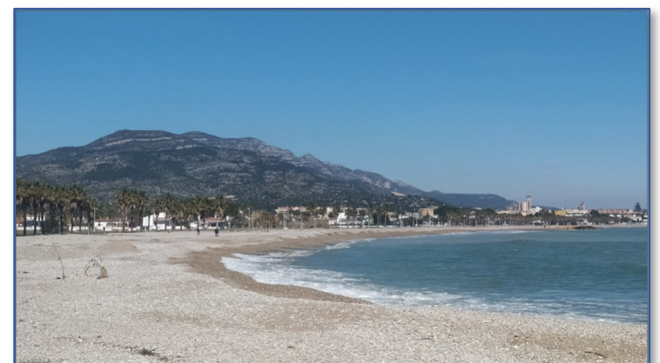


Figura 5. Playa de l’Estanyet con la Sierra del Montsià al fondo.

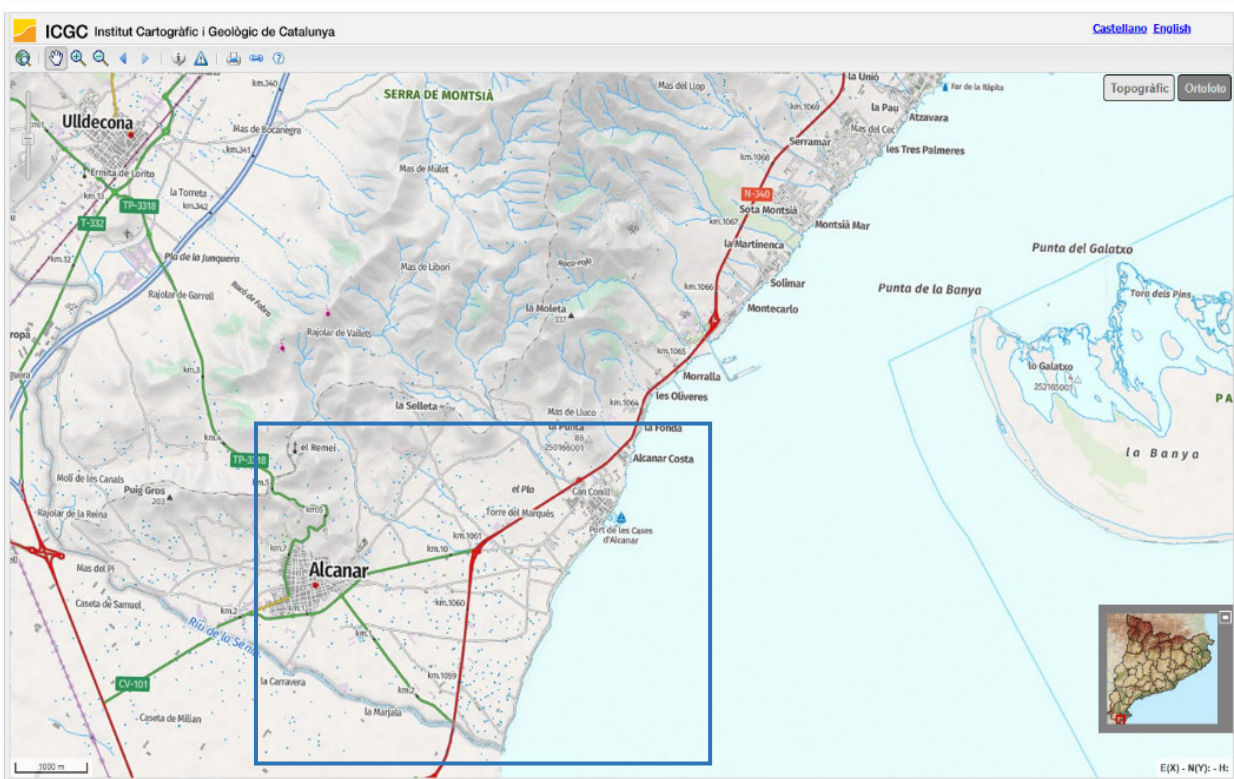


Figura 6. Mapa y ubicación de la zona de desarrollo del Hidrogeodia de la provincia de Tarragona 2025. (E: 1:1000, ICGC).



Figura 7. Ubicación de las paradas. (E: 1:1000, Google Maps).

INTRODUCCIÓN PARADA 1

El objetivo del Hidrogeodía es acercar a la sociedad la ciencia y la profesión hidrogeológica. Por ser una actividad dirigida a todos los públicos, al inicio de la jornada (en la Parada 1) y antes de hablar de hidrogeología, se explicarán unas nociones básicas de geología: qué es la Tabla Cronoestratigráfica Internacional, cómo se interpreta un mapa geológico y cómo y para qué se realizan los cortes geológicos.

PARADA 1. ERMITA DEL REMEI. CONTEXTO GEOLÓGICO – HIDROGEOLÓGICO

Nos encontramos en la Plana d'Alcanar, en el sur de la comunidad autónoma de Cataluña (provincia de Tarragona, comarca del Montsià), cuyo límite sur está representado por el riu Sénia que marca el límite administrativo con la provincia de Castellón.

Para hablar del contexto geológico e hidrogeológico de la Plana d'Alcanar hay que comenzar hablando del contexto geológico regional. Estamos en un área de marcado carácter tectónico que puede dividirse en dos grandes bloques: los Ports de Tortosa-Beceite y la fosa tectónica de la Plana de la Galera. La explicación de su contexto geológico puede hacerse en el marco geológico de la cuenca mediterránea occidental durante el Terciario. Una de las características de esta cuenca mediterránea son los bordes recortados montañosos que la circundan. La actividad tectónica ha sido muy activa hasta nuestros días de tal forma que la neotectónica es omnipresente en casi todas las costas y eso

hace que la configuración morfológica haya evolucionado rápidamente en las últimas edades geológicas.

Los Ports de Tortosa-Beceite se formaron en la etapa compresiva del Paleógeno. En esta etapa compresiva (orogenia alpina) se forman también los Alpes, los Pirineos y la Cordillera Ibérica durante el intervalo de tiempo comprendido entre el Cretácico superior y el Oligoceno, con las últimas fases en el Mioceno medio. La geometría de los Ports está definida por una compleja tectónica de pliegues y escamas de cabalgamiento de orientación NE-SO y de vergencia norte, formadas por materiales del Triásico (Facies Muschelkalk y Facies Keuper), Jurásico (calizas y dolomías del Lias, Dogger y Malm) y Cretácico inferior (calizas y calizas margosas del Barremiense-Aptiense). El cretácico superior en esta zona está reducido a pequeños afloramientos, mientras que el Jurásico aflora en los Ports principalmente como calizas y dolomías del Dogger. El despegue de los planos de cabalgamiento se realiza fundamentalmente en los materiales arcillosos del Triásico.

A finales del Oligoceno comenzó un periodo distensivo que provocó el adelgazamiento de la corteza y una acusada subsidencia, formándose la fosa tectónica conocida como Surco de Valencia. La fracturación de esta fase distensiva fue muy importante durante el Mioceno, generándose la fosa tectónica de la Plana de la Galera con una estructura de horst y grabens controlada por fallas y desarrollada en los materiales carbonatados del Mesozoico. Los bloques elevados de esta estructura están representados por los Ports de Tortosa-Beceite y por las sierras de Montsià y Godall. Esta fosa tectónica se prolonga decenas de kilómetros bajo el Mediterráneo de tal forma que se sitúa en el borde occidental de la fosa tectónica del Surco de Valencia.

Los materiales de relleno de la fosa de la Plana de la Galera son de edad cuaternaria y pliocuaternaria. Son depósitos aluviales y coluviales procedentes de la erosión de los relieves adyacentes.

Bajo la actual superficie del mar, el relleno de la fosa lo constituye el Neógeno marino. Su estratigrafía se conoce a través de las investigaciones petrolíferas y de la sísmica marina. Estos materiales tienen su origen en las distintas pulsaciones tectónicas y subsidencias, así como en las oscilaciones del nivel del mar que ocasionaron diferentes ciclos de sedimentación en las subcuencas independientes del Surco de Valencia.

En el sector de estudio se distinguen 3 unidades aloestratigráficas del Neógeno marino:

- El Grupo Alcanar: constituido por brechas y conglomerados depositados desde el inicio del Mioceno, en régimen progradante.
- El Grupo Castellón: se depositó durante el Mioceno tardío y está constituido por una importancia secuencia clástica progradante sobre la cuenca.
- El Grupo Ebro: para explicar su génesis, hay que hacer referencia a la gran regresión marina que tuvo lugar antes de finalizar el Mioceno, concretamente en el Messiniense. Se produjo una rápida desecación del mar Mediterráneo que produjo un descenso brutal del nivel de base y el depósito de potentes formaciones evaporíticas en las partes más deprimidas de la cuenca. A este episodio se le ha dado el nombre de “Crisis de Salinidad” y terminó con la misma brusquedad al sobrevenir la transgresión pliocena y el subsiguiente relleno marino de

la cuenca. En este ambiente progradante se depositaron sobre la discordancia erosiva intra-mesiniense las Lutitas del Grupo Ebro al inicio del Plioceno, y a continuación la formación Areniscas del Ebro que corresponden al frente deltaico (Delta del Ebro).

Las dos grandes unidades Ebro y Castellón construyen la amplia plataforma continental.

En la Figura 8 se muestra el mapa geológico y la traza del corte geológico realizado dirección NO-SE, desde la divisoria hidrogeológica situada en los Ports de Tortosa-Beceite (el Tossal del Rei con una altitud de 1356 metros sobre el nivel del mar) hasta el sondeo petrolífero denominado Castellón D-2 en el mar Mediterráneo.

La Figura 9 corresponde a un corte geológico-hidrogeológico que representa la síntesis del contexto geológico regional de la zona del valle bajo Ebro. Representa una longitud de 80 km y 4000 metros de profundidad y se ha elaborado a partir de columnas litológicas de pozos, piezómetros y sondeos petrolíferos, además de la cartografía geológica correspondiente. Los pozos y piezómetros en él representados están proyectados sobre la línea que define la orientación del corte geológico.

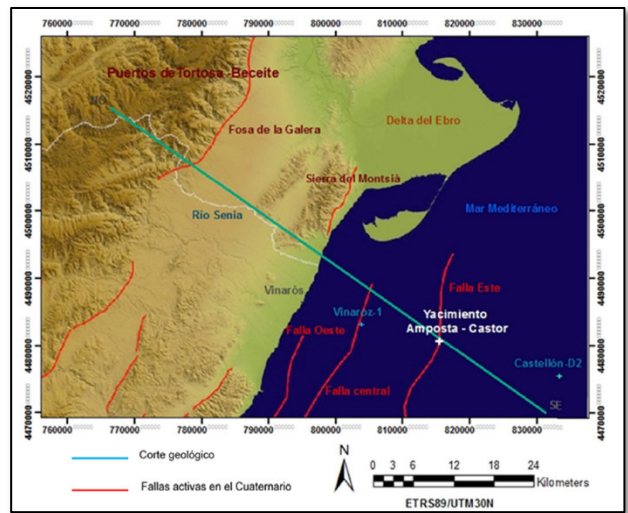
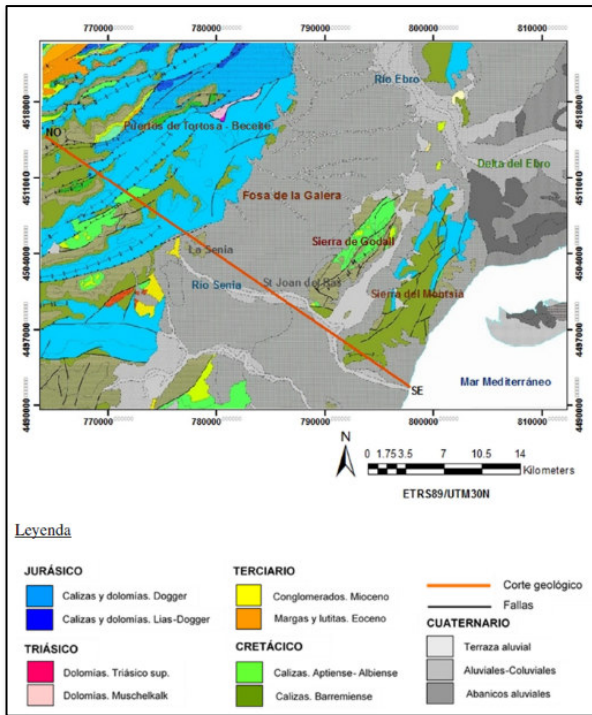


Figura 8. Mapa geológico y traza del corte geológico realizado dirección NO-SE (Barrero, P. 2015).

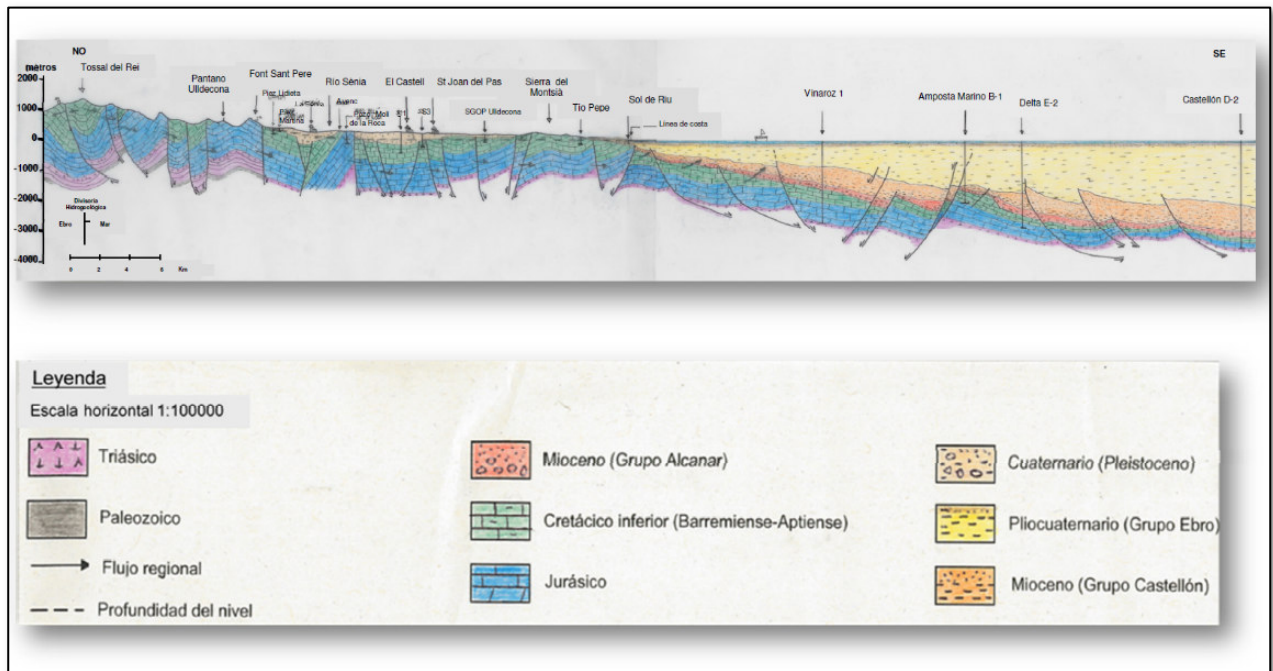


Figura 9. Corte geológico – hidrogeológico (Barrero P, 2015).

Los materiales mesozoicos de la fosa tectónica de la Plana de la Galera limitada por los Ports de Tortosa-Beceite y las sierras de Godall y del Montsià, constituyen el **acuífero Regional de la Plana de la Galera**.

Es un acuífero permeable por carstificación, cuya heterogeneidad y anisotropía se reflejan en la gran variación de sus propiedades hidrodinámicas, de tal forma que puede ser considerado como un acuífero cárstico multicapa. La zona de recarga más importante se sitúa en los Ports de Tortosa-Beceite, y su descarga natural tiene lugar por transferencia profunda hacia la zona costera y hacia el acuífero aluvial del Ebro.

PLANA D'ALCANAR

Si hacemos un zoom en la parte central del corte geológico de la Figura 9, tenemos la estructura geológica y el funcionamiento hidrogeológico de la Plana de Alcanar. En realidad, representa la parte final, la zona de descarga de todo el sistema acuífero de la Plana de La Galera en el Mediterráneo.

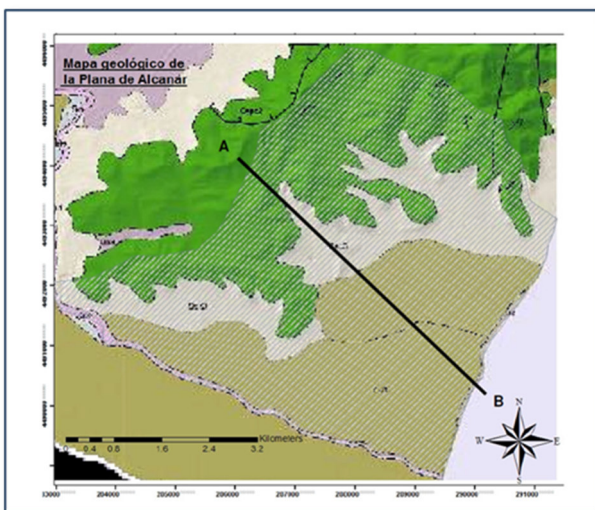


Figura 10. Mapa geológico (Fuente: Adaptado de l'Institut Cartogràfic de Catalunya).

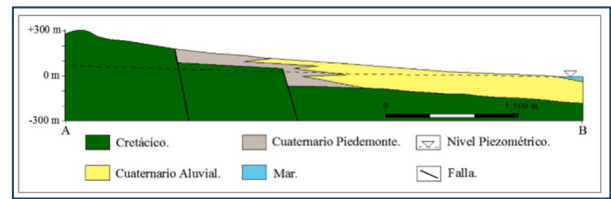


Figura 11. Esquema del funcionamiento hidrogeológico de la Plana d'Alcanar (Barrero & Fabregat 2014).

El sistema de la Plana d'Alcanar está representado por dos acuíferos: un acuífero inferior formado por materiales calcáreos del Cretácico con una estructura de horst y grabbens y cuyo bloque elevado corresponde a la Sierra del Montsià, y un acuífero superior formado por materiales cuaternarios de relleno procedentes de la erosión de las sierras adyacentes elevadas (Figura 11).

Además del flujo regional que procede del acuífero mesozoico de la Plana de la Galera, la gran zona de recarga de la Plana d'Alcanar es la Sierra del Montsià. Por piezometrías realizadas, se ha comprobado que ambos acuíferos descargan en el mar y que el acuífero inferior cretácico recarga al acuífero superior cuaternario.

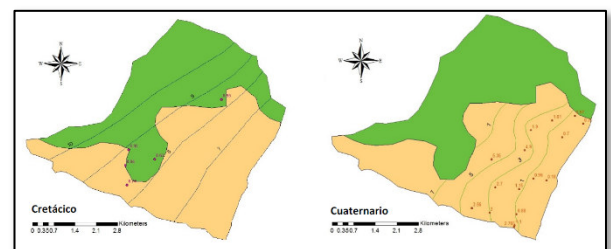


Figura 12. Piezometrías de los acuíferos cretácico y cuaternario (Barrero & Fabregat 2014).

PARADA 2. SOCIETAT AGRÍCOLA POU VERGE DEL REMEI.



Figura 13. Maquinaria original del pozo del año 1924.

La de los pozos es una de las primeras técnicas de construcción realizada por el ser humano. Los pozos más antiguos que se conocen están en la isla de Chipre y tienen unos 11000 años de antigüedad

Los pozos excavados manualmente o **pozos abiertos** existen a lo largo de todo el mundo. Tienen la característica principal de que pueden excavar sin ninguna herramienta sofisticada. Para conseguir un buen acabado y alineación puede ser necesaria la supervisión y acompañamiento técnico de un experto. Suelen tener profundidades de no más de 50 metros y en general se revisten de mampostería. El diámetro de estos pozos nunca será inferior de 1.40 metros, ya que tiene que haber el espacio suficiente para que dos personas puedan estar trabajando en su interior.

Un buen ejemplo de este tipo de captaciones es el pozo de la Societat Agrícola Verge del Remei. Se construyó en 1924, tiene una sección elíptica de 1000x4000 mm y está revestido de mampostería.

Conserva la maquinaria original, que consta de un motor Otto de gasoil con una rueda de inercia de hierro. Se trata del primer pozo del término municipal de Alcanar que adoptó el sistema de comunidad de regantes (inicialmente comunidad de propietarios), lo que permitió la puesta en regadío de zonas que estaban prácticamente abandonadas o infrautilizadas.

Actualmente la comunidad de regantes del Pou Verge del Remei está formada por 138 socios y se riegan 272 *jornals del país* (unas 60 has aproximadamente) de cítricos y algo de huerta.

LAS COMUNIDADES DE REGANTES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Aunque hay bastantes propietarios individuales que explotan sus propios pozos, existe en la Plana d'Alcanar una gran tradición de gestión colectiva del agua subterránea. Esto es importante ya que en general, la utilización de las aguas subterráneas no se ha caracterizado por el aspecto social colectivo que tradicionalmente ha acompañado a las iniciativas sobre aguas superficiales. Los aprovechamientos subterráneos fueron frecuentemente individuales y su funcionamiento no requiere, por lo general, establecer compromisos o acuerdos con otros usuarios de la misma zona.

Las comunidades de regantes son corporaciones de derecho público adscritas al organismo de cuenca correspondiente y sujetas en su funcionamiento a lo que establecen sus propios estatutos, reglamentos o convenios. La finalidad es administrar colectivamente los derechos de uso de agua que les han sido concedidos o reconocidos. Y sus disposiciones tienden a facilitar la gestión del agua, e informar y asesorar a sus

miembros. Se trata por tanto de una institución esencial para llevar a cabo una buena política de aguas.

En muchos países áridos y semiáridos, como por ejemplo España, el principal uso del agua subterránea es el regadío. A escala mundial, el 70 % de las extracciones se destinan al regadío. Al igual que en el caso de los usos industriales, las aguas subterráneas constituyen un factor de producción generador de riqueza y empleo. Análisis existentes apuntan a una mayor productividad de los regadíos con aguas subterráneas comparados con aquellos que utilizan aguas superficiales. y generan también más puestos de trabajo por volumen de agua consumido Pero esta mayor productividad no debe atribuirse a una superioridad intrínseca de las aguas subterráneas. Las causas se deben buscar en el mayor control y garantía de suministro que proporcionan, y en el mayor dinamismo que ha caracterizado al agricultor que ha buscado fuentes propias de agua, y que ha soportado los costes totales de su captación, bombeo y distribución.

Valencia, lo que le convierte en un lugar de parada de aves migratorias.

Las características del agua de la laguna que se forma en la desembocadura favorecen la presencia de vegetación propia de río y de laguna (carrizo, enea, junco, fresno, sauce blanco, lentisco, coscoja y palmito). En los taludes y márgenes del río nos encontramos con vegetación de ambientes costeros como el hinojo de mar. Además, este rincón acoge una gran variedad de fauna propia de los espacios húmedos mediterráneos como las ánades reales, cormoranes y también tortugas mediterráneas lo que indica la excelente calidad ambiental de este paraje.

El riu Sénia nace en la sierra dels Ports, tiene una cuenca vertiente de 140 km² aproximadamente y una longitud de 50 km. Está regulado aguas arriba por el pantano de Ulldcona que tiene una capacidad de 11 Hm³. En general el Sénia es un río típicamente mediterráneo de carácter torrencial, con períodos de sequía y fuertes avenidas. Solamente en épocas de lluvias intensas puede llegar a descargar en el Mediterráneo.

PARADA 3. DESEMBOCADURA DEL RIU SÉNIA



Figura 14. Laguna de la desembocadura del riu Sénia.

La desembocadura del riu Sénia es un espacio de interés natural y paisajístico conocido como tal por presentar una gran diversidad de especies vegetales y animales y por situarse entre el Delta del Ebro y la Albufera de

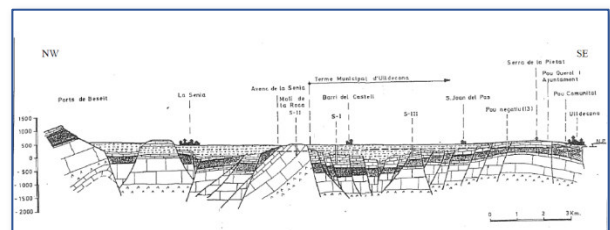


Figura 15. Corte geológico con la estructura del Avenc de la Sénia (Fuente: A. Bayó).

Durante su camino hacia el mar, en el riu Sénia se pueden diferenciar 3 zonas con las siguientes interacciones río-acuífero:

- La zona alta del río, donde aflora en varios lugares el Mesozoico con elevado grado de fisuración y donde el río actúa como ganador ya que el cauce se encuentra por debajo del nivel freático regional. Esto permite el drenaje del macizo calcáreo al río, existiendo de este modo una fuerte componente subterránea.
- En la zona media, se produce la práctica total infiltración del caudal del río. Este hecho se evidencia por la existencia de un pónor (sumidero) situado en la zona de Molí de la Roca, que representa el afloramiento de las calizas fisuradas del acuífero Regional de la Plana de la Galera (ver Figura 15). Aquí se pueden llegar a infiltrar hasta 0.5 m³/s.
- En el curso bajo, solo recarga el río al acuífero cuaternario en épocas de abundantes lluvias, recargando a través de las terrazas aluviales cuando se producen grandes crecidas.

La relación del riu Sénia con el acuífero superior cuaternario podemos verla en la siguiente piezometría.

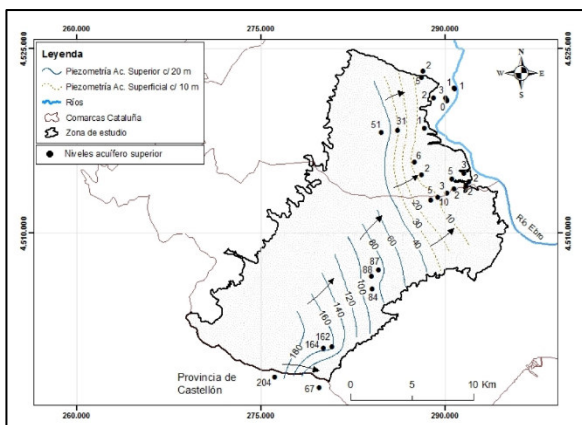


Figura 16. Piezometría del acuífero cuaternario de la Plana de la Galera (Fuente: 44 CIHS).

Vemos que en el tramo final el río Sénia no interactúa con el acuífero cuaternario

superior ya que las isopiezas corren perpendiculares al río. En conclusión, podemos decir que el riu Sénia se encuentra desconectado del acuífero cuaternario, pero que tiene una clara relación con el acuífero regional mesozoico.

PARADA 4. CAP DE TIMBES EN LES CASES D'ALCANAR. YACIMIENTO AMPOSTA

El Cap de Timbes en Les Cases d'Alcanar se encuentra frente a la plataforma Castor. El Proyecto Castor se desarrolla con el objetivo de convertir el antiguo yacimiento petrolífero Amposta en el mayor almacenamiento subterráneo de gas natural de España. Este yacimiento se encuentra en el mar Mediterráneo a unos 22 km de distancia frente a la costa de Alcanar (Tarragona) y Vinaròs (Castellón) y a unos 2000 metros de profundidad.

La serie de sismos registrados cerca de la costa entre septiembre y octubre de 2013 coincidiendo con las operaciones previas para la puesta en marcha del Proyecto Castor, generó además de alarma social, un replanteamiento total del proyecto.

Las instalaciones han permanecido en estado de "hibernación" y la decisión final sobre su uso fue adoptada por acuerdo del Consejo de ministros en 2019. Se acordó el desmantelamiento definitivo de las instalaciones y sellado de los pozos del Castor.

En 2015 se calculó el efecto que el desarrollo del Proyecto Cástor hubiera tenido sobre el sistema acuífero de la Plana de la Galera y por tanto también de la Plana d'Alcanar, mediante un modelo de flujo con Visual Transin (Barrero P, 2015). El primer paso fue establecer la geometría del acuífero en un perfil vertical (ver Figura 9).

DESCRIPCIÓN DEL ALMACÉN Y DEL YACIMIENTO AMPOSTA

El yacimiento Amposta está situado a unos 2000 metros de profundidad, bajo una lámina de agua de mar de 60 metros, y con unas dimensiones aproximadas de 5x3 km en planta. Por sus dimensiones y características geológicas, es comparado con la Sierra del Montsià, pero sumergida bajo el mar.

El campo petrolífero Amposta estuvo en explotación desde el año 1973 hasta el año 1989. En 2004 la empresa ESCAL UGS construyó el sondeo Castor I con el objetivo de validar las condiciones dinámicas del almacén y la integridad de su sello. La construcción de las instalaciones del Proyecto Castor comenzó en marzo de 2010 y se distribuyen entre tierra y mar. En tierra se construyó la planta de operaciones, en el término municipal de Vinaròs (Castellón) a 8 km de la costa. En el mar se instaló la plataforma de cabezas de pozos y la plataforma de procesos

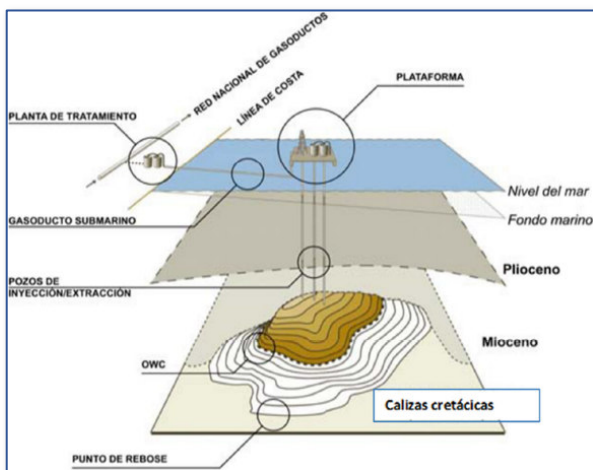


Figura 17. Croquis general de la estructura del Proyecto Castor (Fuente: Juárez, sin fecha).

Con respecto al yacimiento, el Grupo Ebro aporta la mayor parte de la columna sedimentaria de la zona, proporcionando la profundidad necesaria para posibilitar la maduración de la roca madre jurásica y facilitar la carga de petróleo en la estructura

del yacimiento Amposta. La potente sección de lutitas de la base de esta secuencia parece constituir un sello regional extenso, dado que los hidrocarburos tienden a aparecer en esta región por debajo de su base. En el yacimiento, un horst inclinado constituye la trampa de tipo estructural (Figura 18). El cierre occidental es una falla normal, cuyo bloque hundido está formado por los materiales arcillosos de los grupos Castellón y Ebro. El resto de los cierres de la estructura los proporcionan los materiales de la formación Lutitas del Grupo Castellón. En la Figura 9 (corte geológico), la estructura Amposta se encuentra representada en el entorno del sondeo petrolífero Amposta Marino B-1.

El almacén de la estructura Amposta, está compuesto por unas calizas micríticas del Cretácico inferior (Barremiense). Estas calizas fueron sometidas a karstificación intensa durante la fase de elevación y erosión del Paleógeno, dando como resultado una porosidad secundaria muy importante.

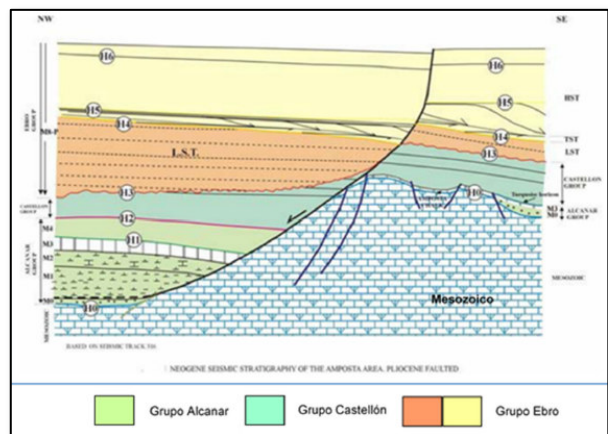


Figura 18. Estratigrafía del yacimiento Amposta (Fuente: Juárez, sin fecha).

SISMICIDAD Y EL PROYECTO CASTOR

La secuencia sísmica que se originó coincidiendo con las operaciones previas a la puesta en marcha del Proyecto Castor comenzó el 5 de septiembre de 2013 y duró

hasta octubre de 2013. La intensidad máxima de la serie fue alcanzada el 1 de octubre con un terremoto de 4.3 en la escala Richter.

En esta zona se encuentra el sistema de fallas denominado Fosa de Amposta, formado por varias fallas con una orientación en general NE-SO, prácticamente paralelas y cercanas a la línea de costa. Tres de estas fallas (Amposta Oeste, Amposta Central y Amposta Este) están situadas en las proximidades de la región en la que se concentraron los epicentros de los terremotos. Se trata de fallas normales, y relacionado con este sistema de fallas no había habido episodios sísmicos significativos y conocidos en el pasado

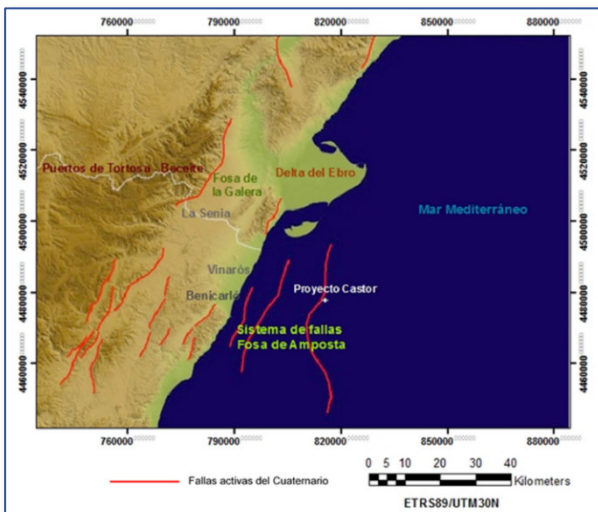


Figura 19. Sistema de fallas Fosa de Amposta (QAFI-IGME, 2015).

Las pruebas iniciales de inyección del gas colchón comenzaron en junio de 2013 sin que entonces se registrara actividad sísmica. El volumen total de gas inyectado fue de aproximadamente 100 hm³, en unas condiciones standard de 25 °C y 1 bar, de acuerdo con los protocolos que establece la legislación española. La sismicidad comenzó a incrementarse el 5 de septiembre con las últimas operaciones de inyección, pero los mayores episodios sísmicos tuvieron lugar a partir del 24 de septiembre, cuando la inyección había sido paralizada.

La actividad sísmica generada se concentró en una pequeña región de menos de 5 km de longitud y a poca profundidad (entre los 0 y los 3000 metros), en las cercanías de los pozos de inyección de gas del Proyecto Castor.

FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO

En la Figura 9 se muestra el esquema del funcionamiento hidrogeológico del acuífero, su estructura y su geometría. Este corte hidrogeológico está trazado siguiendo una línea de flujo del acuífero, desde los Puertos de Tortosa-Beceite hasta su descarga en el mar.

En todo este sistema acuífero se puede establecer que el flujo de agua subterránea se mueve en dirección NO-SE, y en este recorrido se pueden definir tres zonas claramente diferenciadas: la zona preferencial de recarga que son los Puertos de Tortosa – Beceite, la zona de transporte representada por la plana y la zona de descarga en la costa, donde las aguas vierten al mar Mediterráneo.

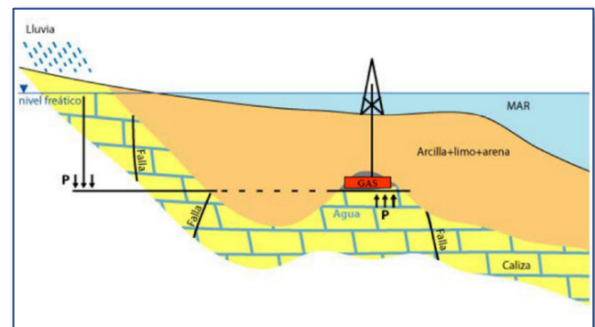


Figura 20. Yacimiento Amposta con empuje de agua (ESCAL UGS, 2008).

Se tienen datos del funcionamiento del acuífero en el entorno del yacimiento Amposta que proceden de la actividad petrolífera desarrollada en el mismo durante el período comprendido entre los años 1973 y 1989. De esta actividad petrolífera, se dedujo una fuerte actividad del acuífero subyacente,

ya que, durante los años de producción a máxima capacidad, la caída de presión del yacimiento fue únicamente de 4.8 bar recuperándose la presión original tan pronto como se redujo el caudal diario de producción en el año 1979.

Por la alta permeabilidad y conectividad del karst y la alta actividad del acuífero, se dedujo que el yacimiento se comporta como un pistón hidráulico, manteniéndose la presión constante a lo largo del mismo y ascendiendo el plano de agua uniformemente. A este tipo de almacén se le da el nombre de “water drive” o yacimiento con empuje de agua. Este mecanismo lo describió la empresa Shell durante la fase de producción (Barat, 2011).

MODELO NUMÉRICO

El objetivo final del modelo realizado fue poder valorar cuál hubiera sido el efecto sobre el acuífero regional de la Plana de la Galera de la puesta en marcha y desarrollo del Proyecto Castor, mediante la elaboración de un modelo de flujo en dos dimensiones. Para la realización del modelo se utilizó el método de los elementos finitos mediante el programa Visual Transin. Una de las características de este método es que la malla se ajusta perfectamente a la geometría del sector de estudio.

Tras realizar el modelo en régimen estacionario y calibrarlo manualmente, se planteó realizar el modelo en régimen transitorio simulando el efecto sobre el acuífero de las inyecciones de gas que se realizaron en el yacimiento Amposta entre junio y septiembre de 2013. Estas inyecciones generaron la serie sísmica registrada cerca de la costa de Alcanar y Vinaroz.

Una vez realizada esta simulación, se consultó documentación existente sobre el plan de explotación prevista para el Proyecto Castor, es decir, el ritmo y caudales de inyección y

extracción de gas calculados por la empresa para el desarrollo del almacén al 100%. Visto que el calendario de explotación era muy detallado, se decidió realizar tres simulaciones más, también en régimen transitorio. Las simulaciones realizadas fueron:

- Inyección de todo el gas colchón en el almacén.
- Operaciones de inyección y extracción de gas correspondientes a la Fase I.
- Desarrollo completo del almacén, es decir, desarrollo del Proyecto Castor.

CONCLUSIONES DEL MODELO DE FLUJO REALIZADO

En lo referente a la piezometría, la puesta en marcha del Proyecto Castor hubiera tenido una gran incidencia en el entorno inmediato del antiguo yacimiento petrolífero Amposta. Es probable que se hubiera registrado un aumento piezométrico de orden milimétrico (5-10 mm) en la parte emergida de la zona de estudio, pero prácticamente en la línea de costa y no más al interior.

El modelo de flujo realizado es un modelo de tipo conceptual. Hay que recordar que el Proyecto Castor ha estado en “hibernación” porque se llegó a la conclusión de que la serie sísmica registrada entre septiembre y octubre de 2013 estaba relacionada con las operaciones previas iniciadas para la puesta en marcha del Proyecto. Es decir, que podríamos pensar que el desarrollo de un proceso sísmico más o menos intenso a pocos kilómetros de la costa hubiera podido tener también incidencia en la piezometría del sistema, que se hubiera sumado a los efectos del proceso de inyecciones y extracciones de gas en el antiguo yacimiento petrolífero Amposta.

**PARADA 5. PLAYA DE L'ESTANYET.
ACUÍFEROS COSTEROS Y SU GESTIÓN**



Figura 21. Masa de agua subterránea de la Plana d'Alcanar (Fuente: Agència Catalana de l'Aigua).

La Masa de agua subterránea de la Plana d'Alcanar es un sistema acuífero costero. Los acuíferos costeros son susceptibles de contener naturalmente o de forma inducida agua salina. El agua marina, que es más densa que el agua dulce, puede penetrar hacia el continente desde escasos metros hasta varios km, en función de las características hidrogeológicas (espesor de las formaciones permeables y conductividad hidráulica) y del caudal de descarga de agua continental en la costa.

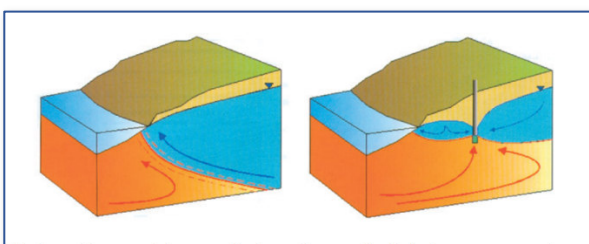


Figura 22. Flujo de agua dulce y agua salada en una sección de un acuífero costero libre idealizado con recarga y en estado natural (izquierda) y afectado por la extracción de un pozo (derecha). (Fuente: Custodio, E, 2020).

La descarga de agua dulce o salobre a lo largo de la costa tiene importancia para la existencia y características peculiares de los humedales costeros y de las aguas marinas litorales junto a la costa. Esa descarga crea determinadas condiciones de salinidad, composición química

y contenido en nutrientes, que son importantes ecológicamente y que se asocian a servicios económicos de gran interés social.

ESTADO DE LA MASA DE AGUA

Las administraciones hidráulicas se encargan de realizar los controles para determinar el estado cualitativo y cuantitativo en el que se encuentran las masas de agua subterránea, mediante redes de calidad y redes piezométricas.

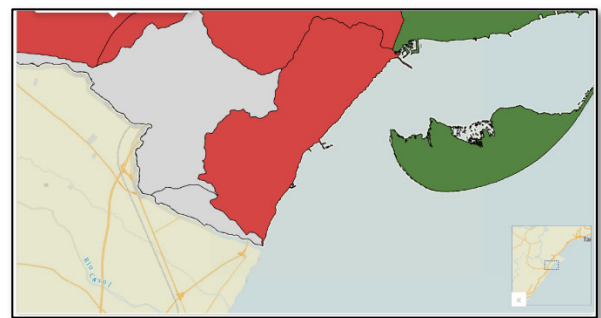


Figura 23. Estado general de la masa de agua subterránea de la Plana d'Alcanar (Fuente: Agència Catalana de l'Aigua).

El estado de una masa de agua subterránea se establece a partir de la valoración del estado químico y del estado cuantitativo. El estado final resultante será la combinación de ambos: bueno o malo tomando la peor calificación de las dos valoraciones.

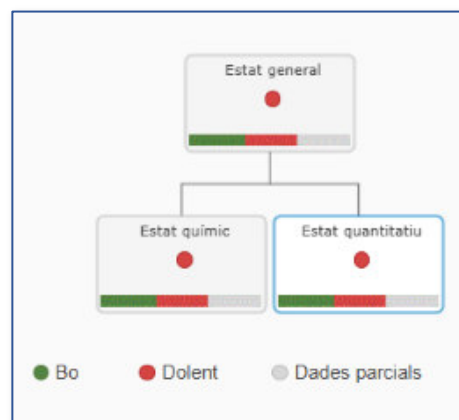


Figura 24. Informe de la masa de agua subterránea de la Plana d'Alcanar de 2021 para datos de 2016-2021 (Fuente: Agència Catalana de l'Aigua).

Como podemos ver en las Figuras 23 y 24, el resultado final del estado general de la Masa de agua subterránea de la Plana d'Alcanar es malo, porque incumple tanto en el estado químico (contenido en cloruros) como en el estado cuantitativo (test de intrusión salina y contenido en cloruros).

Los datos de valoración de cada una de las masas de aguas se obtienen de la información recogida en uno o varios puntos de muestreo. Aunque estos puntos son representativos, eso no significa que en la totalidad de la masa de agua se den estas condiciones. De hecho, se tiene constancia de que el problema importante de cloruros y de proceso de intrusión marina se encuentra en la parte norte de la masa de agua, hacia el término municipal de la Rápita.

RED DE CONTROL PIEZOMÉTRICO

L'Agència Catalana de l'Aigua tiene dos puntos de control piezométrico en la Plana d'Alcanar. Uno de ellos capta el acuífero carbonatado mesozoico (piezómetro Tío Pepe) y el otro el acuífero cuaternario (piezómetro Sol de Riu). En ambos piezómetros se tienen registros mensuales y continuos desde 1999 hasta la actualidad.



Figura 25. Situación de ambos piezómetros (Fuente: Agència Catalana de l'Aigua).

Se muestran a continuación de forma gráfica estos registros piezométricos a partir de los cuales se sacan conclusiones hidrogeológicas

del funcionamiento del sistema acuífero en esta zona:

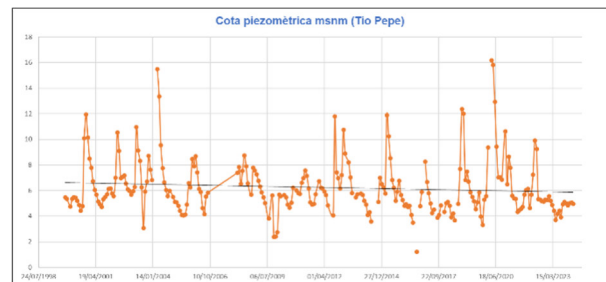


Figura 26. Registro piezométrico acuífero mesozoico (Fuente: Agència Catalana de l'Aigua).

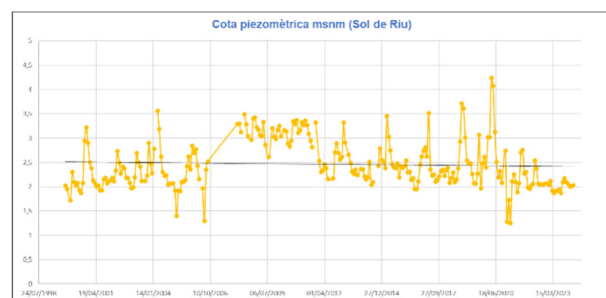


Figura 27. Registro piezométrico acuífero cuaternario (Fuente: Agència Catalana de l'Aigua).

Gracias a esta red de control piezométrica, podemos afirmar que el acuífero inferior mesozoico es el que recarga al acuífero cuaternario. También podemos afirmar que entre 1999 y 2025 este registro muestra una tendencia descendente de la piezometría, que sigue una tendencia coherente con la secuencia climatológica.

Como conclusión diremos que la línea de costa supone una conexión con una masa de agua de volumen infinito, y que una excesiva explotación de las aguas subterráneas en este tipo de acuíferos costeros puede inutilizar los recursos a causa del proceso de salinización. El objetivo es contener la penetración de la cuña marina con la existencia de un flujo continuo de agua hacia el mar.

COLABORADORES DEL HIDROGEODÍA TARRAGONA 2024

Pilar Barrero Justes (ACA)

Joan Gabriel Talarn Maigí (CETIT)

Jordi Marsal Lleberia (ACN)

PARA SABER MÁS....

Agència Catalana de l'Aigua (2025). *Estat de les masses d'aigua a Catalunya*.

Ansón Oseñalde, M. y Yañez López, J. (2010). *Estudio hidrogeológico de la Plana de la Galera (Montsià, Baix Ebre – Tarragona)*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 44 edición CIHS.

Barrero Justes, P. (2015). *Evaluación de los posibles efectos del almacenamiento de gas en el antiguo yacimiento petrolífero Amposta (Proyecto Castor) sobre el sistema acuífero regional de la Plana de La Galera en el ámbito de las comarcas del Montsià y del Baix Maestrat (Tarragona-Castellón)*. Máster profesional en hidrología subterránea, 3ª Edición (2014-2015). FCIHS y UPC.

Barrero, P. y Fabregat, S. (2015). *Modelo de flujo del sistema acuífero de la Plana de Alcanar*. Máster profesional en hidrología subterránea, 3ª Edición (2014-2015). FCIHS y UPC.

Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. (2009). *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*.

Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Primera Edición. Barcelona.

Custodio, E. (2020). *Consecuencias de la intrusión marina en la España mediterránea e insular según el informe SASMIE*. Boletín Geológico y Minero, 131 (4): 775-794.

García Mollá, M. y Sanchis Ibor, C. (2009). *Las entidades de riego en común*. Agricultura: 448-452.

https://www.eldiario.es/economia/10-anos-caso-castor-agujero-multimillonario-contribuyente-responsables_1_10566838.html.

Instituto Geológico y Minero de España. (2009). *Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo*. Fundación Marcelino Botín.

Llamas, R., Hernández-Mora, N. y Martínez, L. (2000). *El uso sostenible de las aguas subterráneas*. Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas. Fundación Marcelino Botín.

Piñana, E. y Valleján, B. (1999). *Estudio Hidrogeológico de la cuenca del río de La Sènia (Castellón – Tarragona)*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 33 edición CIHS.

NOTAS