

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL DELTA DEL EBRO

Alfons Bayó Dalmau.

Ceólogo/Hidrogeólogo.

Junta de Aguas de Cataluña, Tarragona.

Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona.

Emilio Custodio Gimena.

Dr. Ingeniero Industrial.

Departamento de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Cataluña.

Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona.

Carlos Loaso Vierbücher.

Ceólogo/Hidrogeólogo.

Junta de Aguas de Cataluña, Tortosa.

RESUMEN

Las formaciones arcilloso-limasas holocenas del Delta del Ebro soportan la parte subaérea actual y la separan de los niveles fluviales profundos e inferiores. Su estructura sedimentaria es similar a la de los otros deltas de la cuenca mediterránea y responde al ascenso de unos 100 m del nivel del mar al iniciarse el Holoceno. La escasa elevación del terreno hace que dominen las aguas salinas. Por eso los niveles permeables del Delta del Ebro no han estado sometidos a explotación significativa y explica la escasez de datos. Cabe distinguir entre los niveles arenosos superiores y los acuíferos profundos. Los primeros se utilizaron mediante pozos someros para el abastecimiento local y rural allí donde el agua era dulce. Actualmente estos niveles están afectados por los canales de riego y los arrozales, pudiendo existir agua dulce flotando sobre agua salada y salmueras. El delta funciona hidráulicamente como un tapón para los acuíferos aluviales y carbonáticos del Bajo Ebro, cuya descarga debe hacerse lateralmente al delta en forma de surgencias de agua dulce o salobre (ullals).

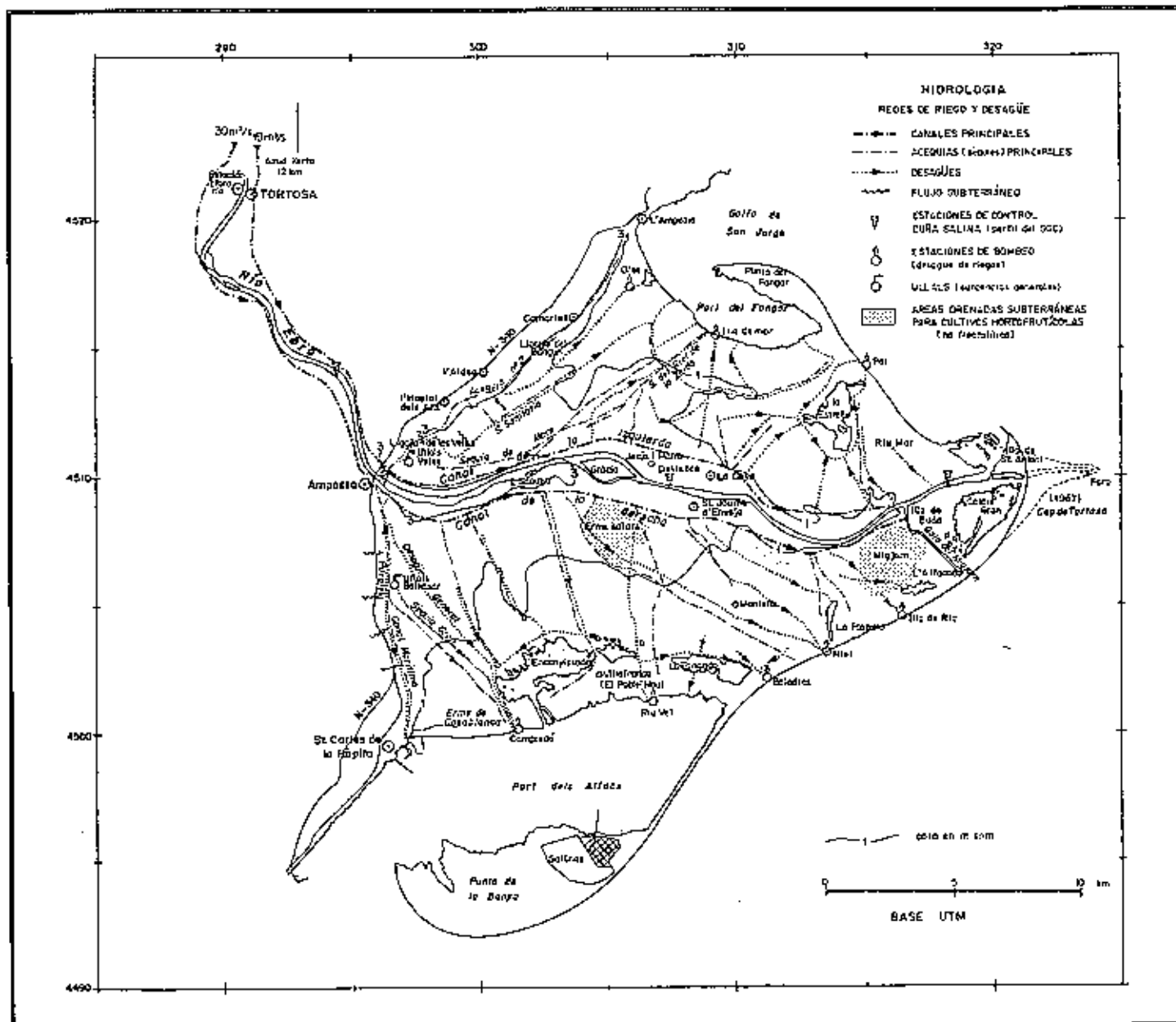
El agua de los acuíferos profundos del delta es dulce en la embocadura, donde se explota para abastecimiento, pero rápidamente se hace salobre y finalmente se asemeja al agua marina. Se han explotado ocasionalmente para cultivos biológicos marinos.

ABSTRACT

In the Ebro Delta area the clay-silt Holocene pro-deltaic formations of the Ebro Delta are covered by the present subaerial part and separates it from the deep alluvial formations. The sedimentary structure is similar to that of other Mediterranean deltas, and corresponds to the rise of sea level of about 100 m. at the start of the Holocene. The low land elevation favours the widespread existence of saline water. This explains why there is no significant groundwater abstraction from its permeable formations, and the scarcity of data. There are the sandy upper layers and the deep aquifers. The first were used by means of shallow wells for local and rural supply where the water was fresh. Currently these formations are affected by irrigation canals and rice paddies. Often freshwater rests on saline water and brines. The delta acts as a plug for the lower Ebro alluvial and carbonate aquifers and their discharge is directed to the delta sides or appear as fresh or brackish water springs "ullals". The water of the delta deep aquifers is fresh near the mouth of the Delta but quickly becomes brackish and finally is as saline as sea water. These aquifers have been occasionally exploited to supply marine biological cultures.

CIENCIA
Y TÉCNICA
DE LA
INGENIERÍA
CIVIL

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
diciembre de 1997.



1. INTRODUCCIÓN

El delta del Ebro es la lengua de terreno progradante en el mar a partir de Amposta. Tiene una superficie emergida de 320 km² (188 km² en el hemidelta derecho y 119 km² en el izquierdo, más otros 15 km² que son la suma de las islas de Buda, Gracia, Sant Antoni y Sapinya). De esa superficie el 77% está cultivada, el 18% son terrenos seminaturales y salobrales, el 6% son lagunas como las de la Encayissada, Tancada, Estrella y Calaix Gran, y el 1% playas. La parte deltaica sumergida, principalmente por los lados, añade otros 1.880 km². Se trata de sedimentos muy recientes, subhistóricos, que recubren los sedimentos prodeltaicos depositados tras el ascenso de unos

100 m del nivel del mar hace unos 10.000 años. En la época Romana el delta era incipiente, desarrollándose durante la Edad Media, hasta llegar a un tamaño similar al actual hace 5 siglos. En el siglo XIX era aún un área palúdica y salvaje, sin colonizar y muy difícil de transitar. La colonización se hizo preferentemente para sanear las tierras y erradicar el paludismo endémico, dedicándolas al cultivo del arroz, con el suministro de agua dulce fluvial de los dos grandes canales que discurren paralelos al río Ebro desde el azud de Xerta. Los ca-

Fig. 1. Delta del Ebro con indicación de las localidades y rasgos morfológicos y los principales canales de aporte de agua desde el valle bajo. Se señala la curva de nivel de 1 m sobre el nivel del mar y algunas cotas aisladas.

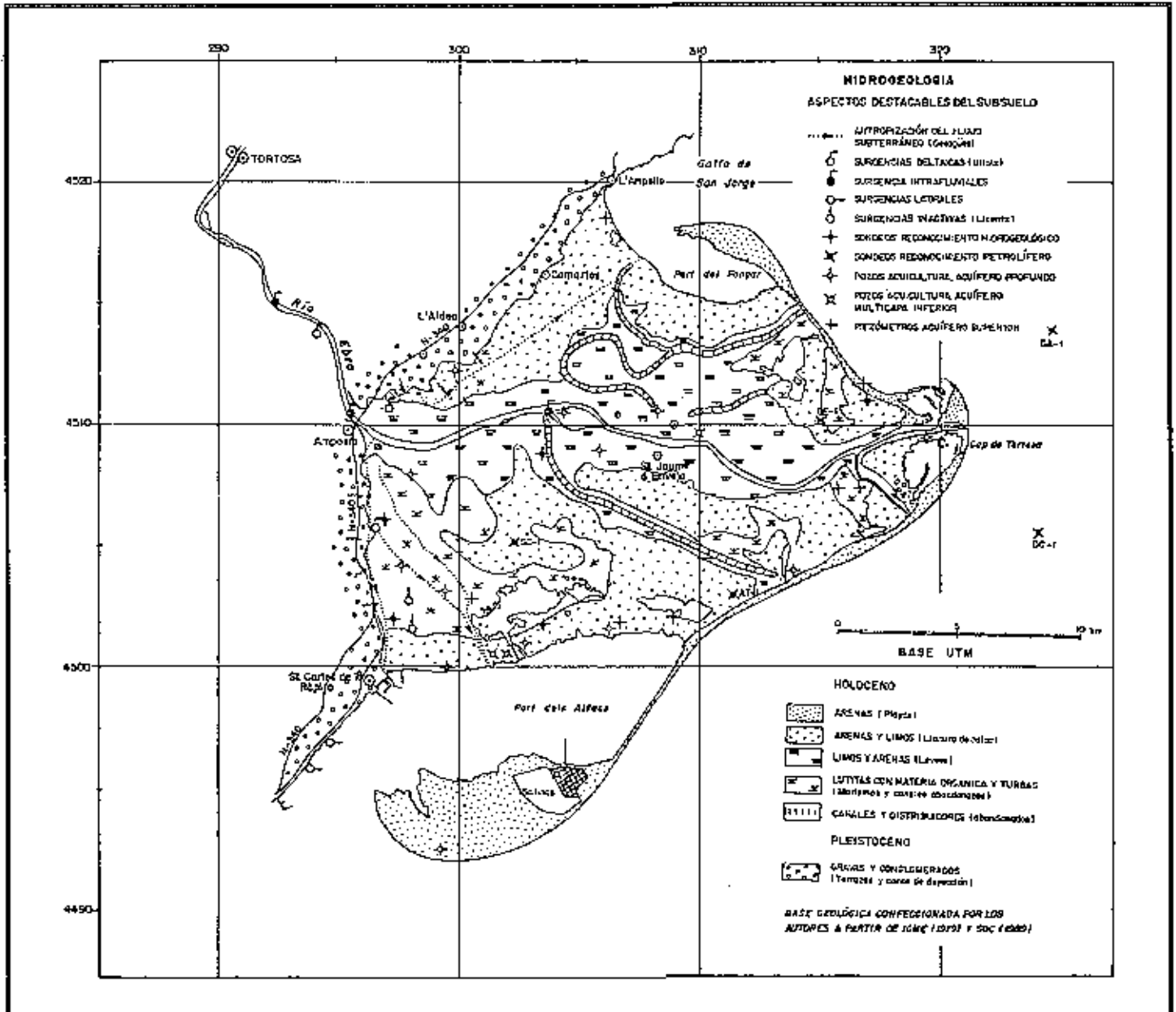


Fig. 2. Aspectos hidrogeológicos destacables del Delta del Ebro. El inventario de sondeos profundos es casi completo.

nales, acequias e hijuelas, junto con los arrozales y los canales y obras de drenaje, han supuesto un cambio hidrológico drástico, que afecta a la hidrogeología de los acuíferos someros. En la margen derecha el drenaje principal se realiza por la Sèquia Gran y de la Mare, y en la derecha por la Sèquia Sanitària. Los primeros asentamientos humanos importantes en el interior del delta y cerca del río Ebro, como los de Jesús y María, La Cava y Sant Jaume d'Enveja, ocuparon suaves elevaciones de terreno (conocidas localmente como lomas) que corresponden a diques naturales del río ("levees"), en los que es posible encontrar lentejones de agua dulce que se explotaron con pozos someros excavados. El resto del área contiene acuíferos con agua salobre, salada y aún salmuéras, de modo que su in-

terés es muy limitado y ocasional. Ello explica la escasez de datos y que sólo recientemente se disponga de parches de información tras aparecer cierto interés de esas aguas saladas para cultivos biológicos marinos como consecuencia de estudios de salinización de suelos al cambiar el cultivo del arroz por otras cosechas, o de actuaciones en el litoral.

Se ha excluido la información que corresponde a áreas fuera de lo que es morfológicamente el delta del Ebro, salvo para apoyo de lo que hace referencia a los acuíferos del área deltaica estricta. Allí el número de datos es mayor, pero corres-

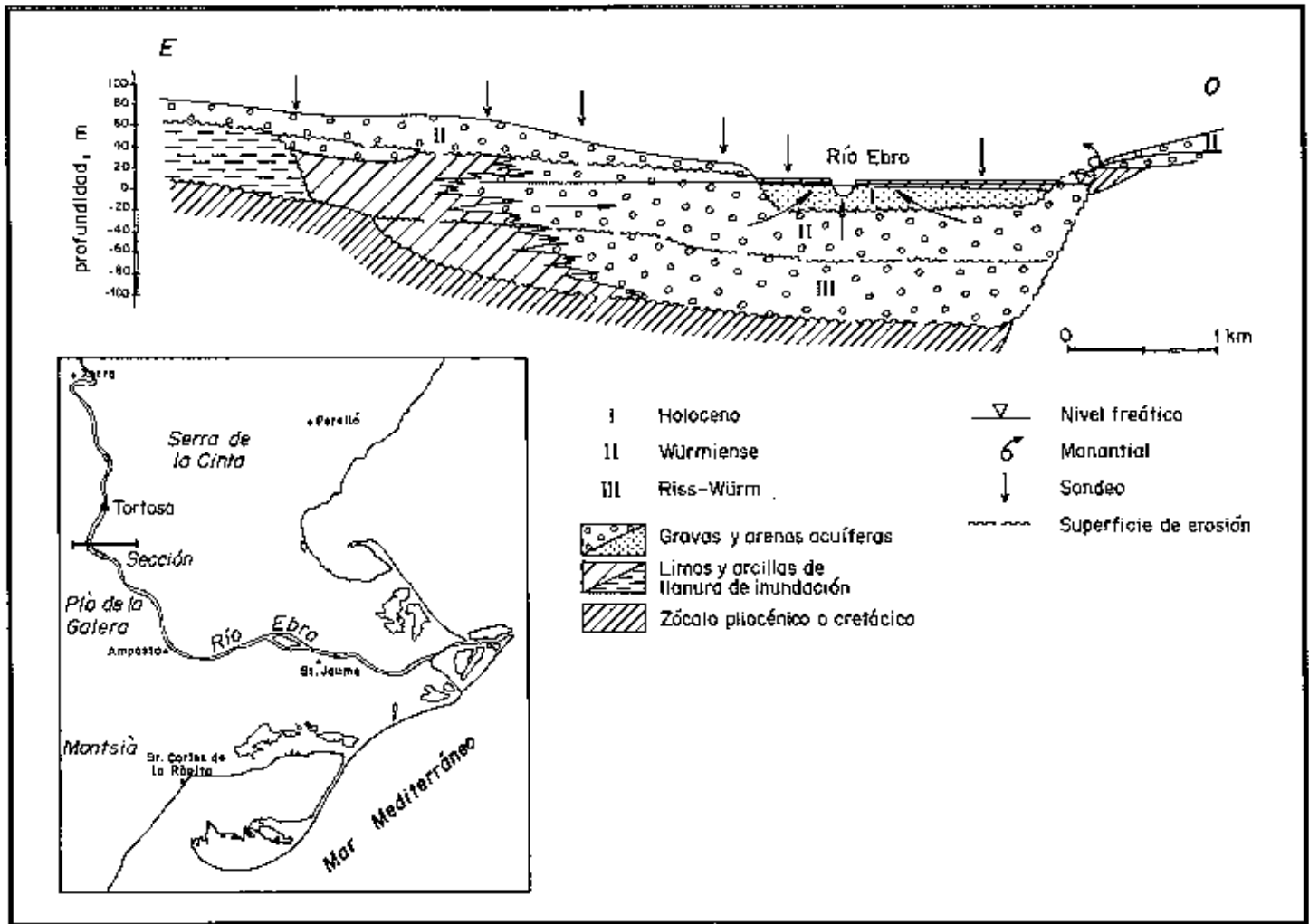


Fig. 3. Sección del valle bajo del Ebro, 2 km aguas abajo de Tortosa, mostrando la disposición de terrazas, las que después quedarán cubiertas bajo los sedimentos recientes en el Delta del Ebro.

otros estudios publicados o de organismos públicos a parte del de CHE (1991).

ponden a un ambiente diferente. Así se excluyen las áreas de Sant Carles de la Rápita, de L'Ampolla y del valle bajo del Ebro. El límite interior se establece en Amposta (fig. 1).

Para la preparación de este artículo se ha intentado una recopilación de información de campo casi exhaustiva (fig. 2). En cuanto a estudios generales es importante el del INC (1966) sobre salinidad de los suelos, así como un estudio de fugas de la red de riego realizado por el GANOP (1972), aunque no tratan aspectos propiamente de hidrología subterránea. Los primeros trabajos de hidrología subterránea son los del GANOP (1971) y SGOP (1972), que sólo afectan muy marginalmente al delta, al igual que los de Bayó et al. (1976), Touris y Custodio (1983), Custodio y Bayó (1987), Touris (1986), Loaso y Hernán (1988) y Bayó y Custodio (1989). La estructura hidrogeológica general de la zona se describe en Bayó et al. (1993), pero el delta del Ebro es sólo una pequeña parte. No se conocen

2. MARCO GEOLÓGICO-HIDROGEOLÓGICO

El río Ebro ha depositado en su tramo final (fosa de la Galera, corredor de la Corrova y delta) un notable volumen de sedimentos recientes y subrecientes (Plioceno hasta la actualidad) que en el valle bajo (Xerta hasta Amposta) tienen un carácter lineal-fluvial, con anchuras que llegan a superar los 4 km y grosores de más de 100 m (fig. 3). En ellos se encaja el actual curso del río. Ya en el delta, y enlazando con los anteriores, los sedimentos recientes se extienden con amplitud de hasta 30 km y grosor por encima de los 500 m. La continuada subsidencia acaecida en los últimos tiempos en la plataforma deltaica y áreas limítrofes explica esta acumulación.

El substrato geológico que limita el conjunto fluviodeltaico son los carbonatos (calizas) del Mesozoico que forman la

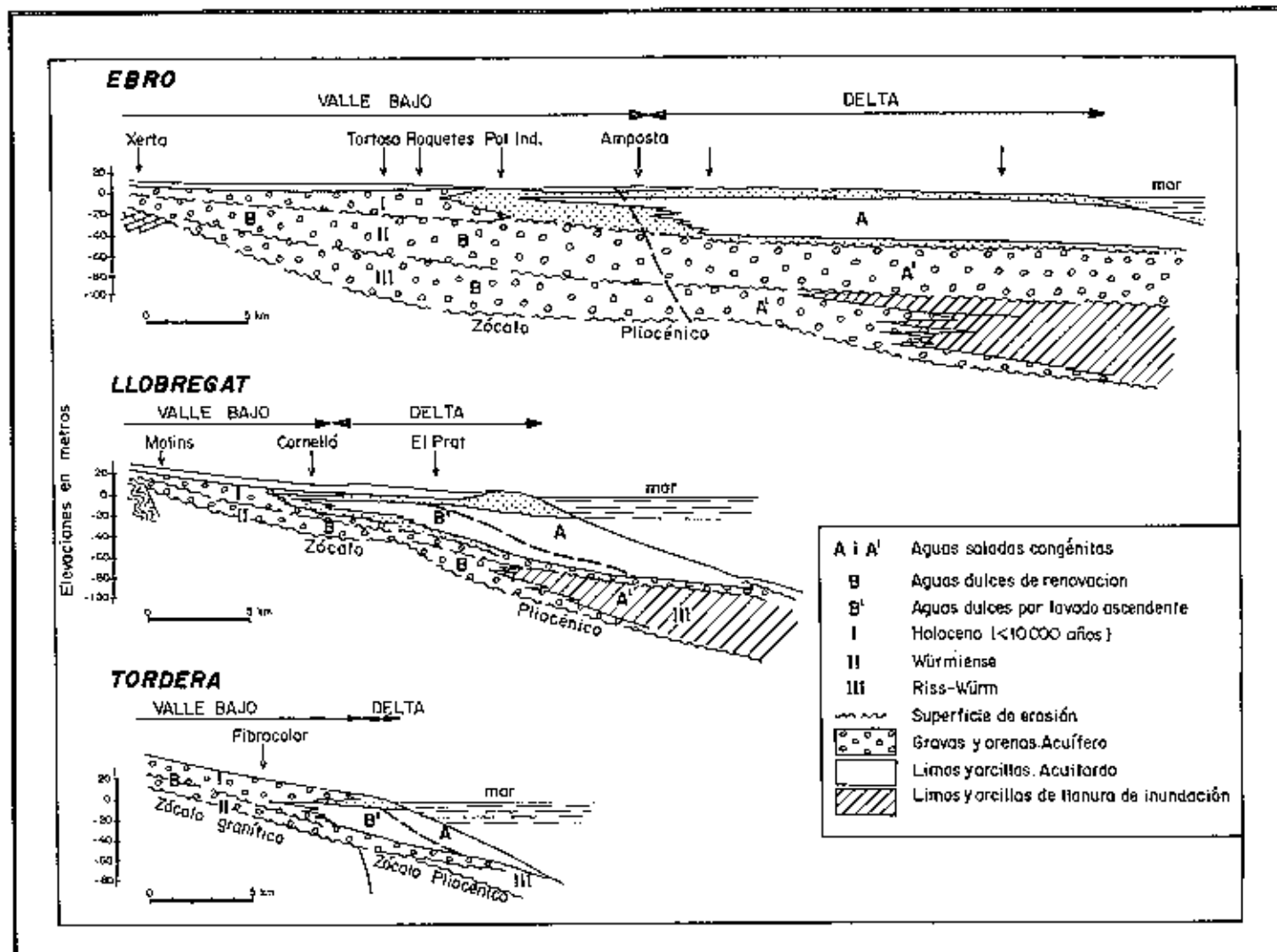


Fig. 4. Perfiles longitudinales esquemáticos de los deltas del Ebro, Llobregat y Tordera con los principales caracteres sedimentológicos y de existencia de salinidad. En el delta del Ebro el control potenciométrico se realiza en Amposta, a un nivel sólo decímetros por encima del nivel del mar, con lo que no es posible desplazar y expulsar las aguas saladas existentes en los niveles profundos. En los deltas del Llobregat y Tordera este control se realiza con altura suficiente para permitir ese desplazamiento y expulsión por el afloramiento submarino.

Sierra del Montsiá en el flanco derecho y la Serra de la Cinta-Coll de l'Alba en el izquierdo.

Con el escenario descrito es fácil imaginar la existencia de grandes formaciones acuíferas regionales en las formaciones carbonatadas encajantes, así como en los depósitos fluviales (valle bajo) y fluviodeltaicos (delta). Sólo estos últimos son objeto de este artículo.

En la figura 4 se muestra la evolución longitudinal de los últimos ciclos sedimentarios, comparándolos con los de otros deltas vecinos (Llobregat, Tordera) y visualizando un hecho de

trascendental importancia hidrogeológica como es la pendiente de los depósitos: mientras en el Llobregat y Tordera el elevado gradiente topográfico y también hidráulico ha favorecido el lavado y expulsión de aguas salobres y marinas de los acuíferos y acuífardos, en el caso del Ebro la ausencia del referido gradiente ocasiona que en el delta, a partir de Amposta, todos los acuíferos alberguen aguas de elevada salinidad (Custodio y Bruggeman, 1986; Bayó et al., 1992).

3.- ACUÍFEROS EN RELACIÓN CON EL DELTA DEL EBRO

El modelo hidrogeológico para este tipo de formaciones fluviales y fluviodeltaicas es el clásico y común en el Mediterráneo occidental, es decir: la existencia de un acuífero lineal conectado con el río en el valle bajo, de carácter generalmente efluente (río ganador) y que se halla instalado en las diferentes

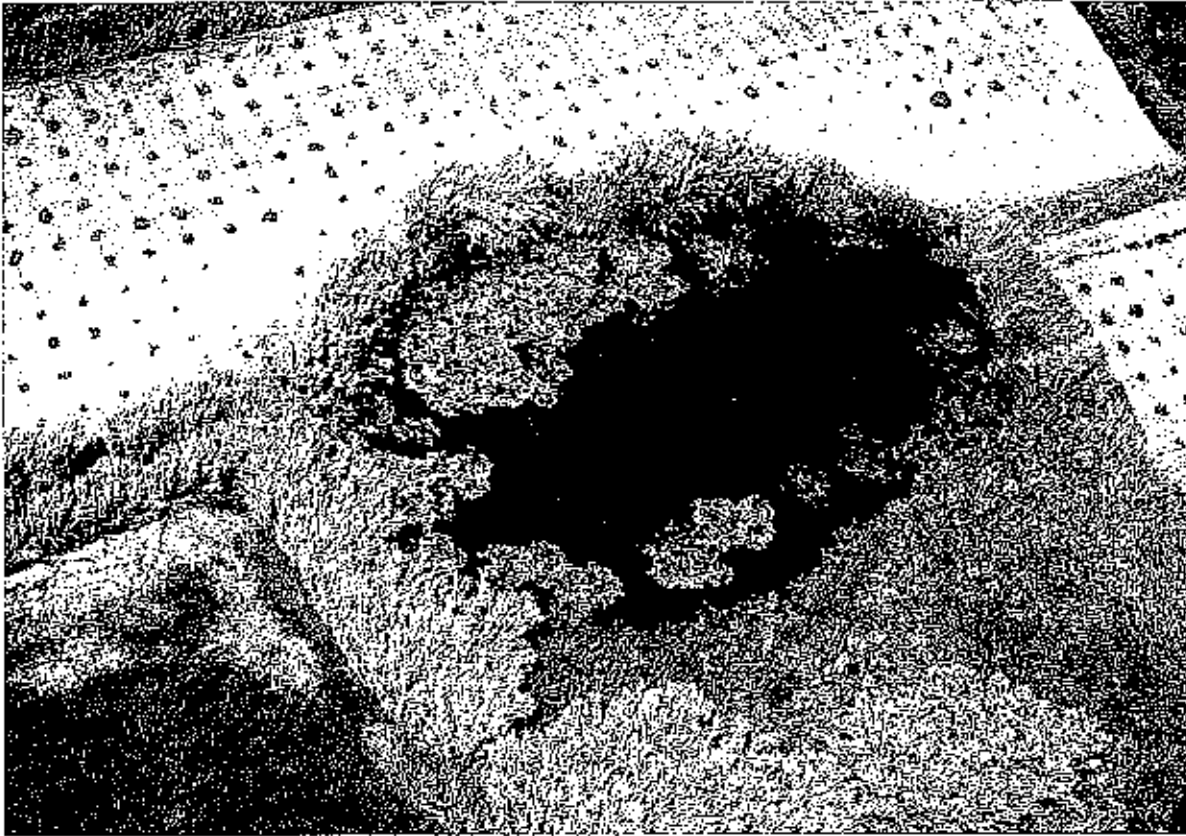


Foto 1. Vista aérea de las surgencias (ullals) de la Partida de Baltasar, con las zonas cultivadas próximas y el área de vegetación freatófica mantenida por la descarga de agua subterránea (foto C. Loaso).

Foto 2. Aspecto de una pequeña depresión entre vegetación que corresponde a una surgencia de entre las que existen en la Partida de Baltasar. (foto E. Custodio).





Foto 3. Restos de un ullal en un área transformada para cultivos. Los suelos son turbosos (foto C. Loaso).

Foto 4. Excavación en la que se aprecia que los depósitos arenosos yacen sobre limos deltaicos oscuros muy ricos en materia orgánica (foto C. Loaso).

terrazas fluviales encajadas en el caso del río Ebro (I, II y III de la figura 3), con espesores máximos saturados del orden de 100 m. En la embocadura del delta este acuífero se transforma o enlaza con un conjunto multicapa en el cual cabe diferenciar: un acuífero superior, un acuífero profundo y un sistema multicapa inferior de gran espesor, que se describen y definen seguidamente.

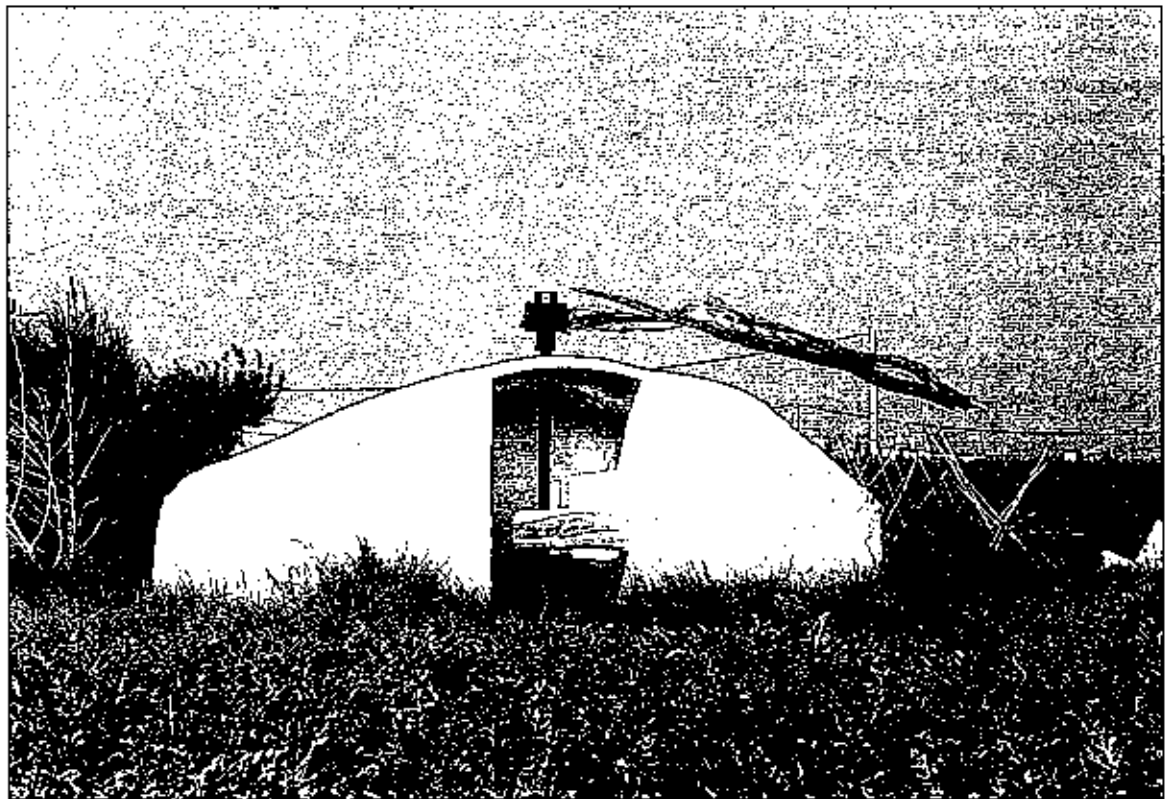
A) ACUÍFERO SUPERIOR DELTAICO

Se extiende por toda la plataforma deltaica, con ciertas discontinuidades, especialmente en el centro del delta y entorno de la Isla de Buda, donde sólo se encuentran limos orgánicos. Tiene un grosor que no pasa de 10 m (entre 5 y 10 m), y está saturado a partir de pocos dm bajo el suelo. Se trata de arenas finas con un valor mediano del tamaño de grano entre 0,15-0,25 mm, correspondientes a la progradación de los diferentes cordones de dunas, y con mayor proporción de materia orgánica hacia la base. En los flancos del delta existen turberas fósiles y activas y otros depósitos palustres con presencia de gas metano, por donde descarga agua subterránea ("ullals" y "lluents"). La permeabilidad de este acuífero es modesta y no suele superar 1 m/d, aunque en las formaciones de playa puede llegar a 5 m/día. Ensayos recientes en ellas dan una transmisividad de 65 m²/día. Se trata de un acuífero libre, semiconfinado en las zonas de los diques naturales ("levees"), a ambos





Fotos 5 y 6. Antiguo pozo somero equipado con una noria con fines de drenaje (foto C. Loaso).



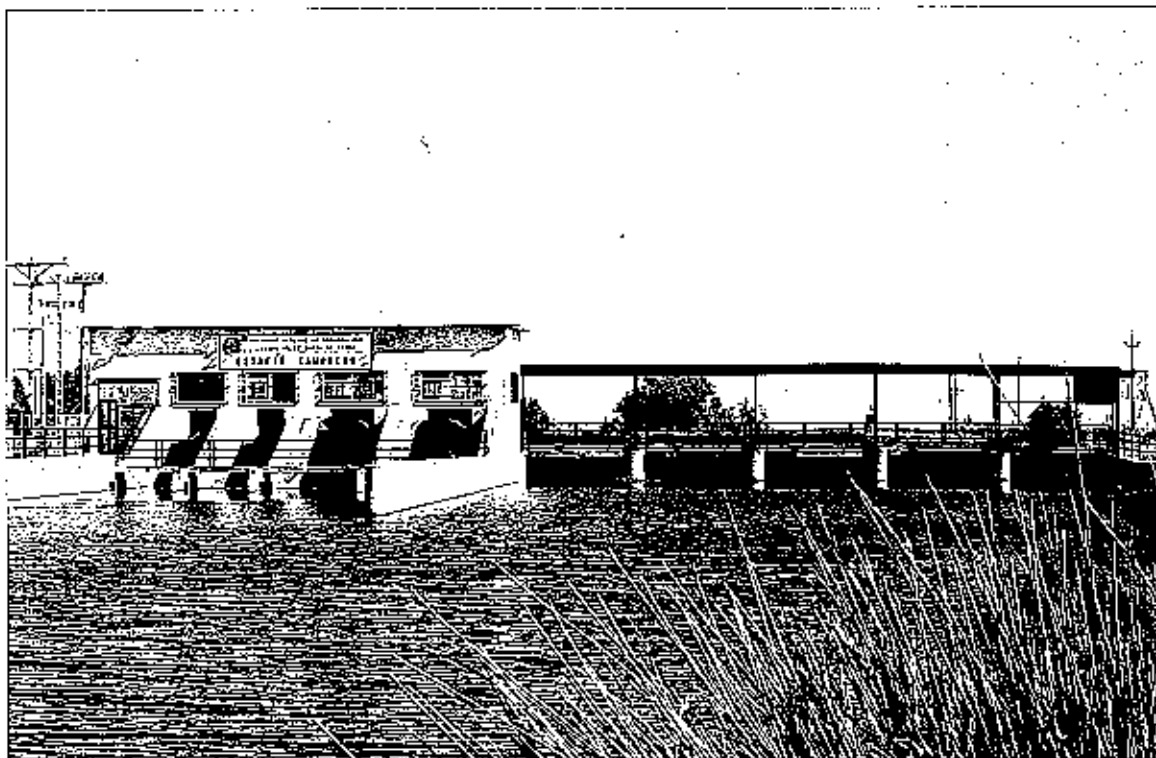


Foto 7.
Vista general del punto de descarga de una de las acequias de drenaje (unión de la Sèquia General y la Sèquia Gran) a la Bahía (Puerto) de los Alfaques; la descarga natural se puede forzar mediante una estación elevadora dotada de Tornillos de Arquimedes (Estación de Campredó) (foto C. Loaso).

lados del canal de drenaje principal y antiguas salidas al mar del río Ebro. Contiene aguas moderadamente salinas hasta 1 a 3 m de profundidad (zona lavada por el riego de los arrozales) y a partir de aquí son aguas muy mineralizadas y salmueras hasta la base del acuífero, constituida por los limos negros orgánicos prodeltaicos. El lavado de los suelos se realiza mediante drenes horizontales someros, por lo que solo afecta a la parte más superficial del acuífero.

B) ACUÍFERO PROFUNDO

Es un grueso paquete de 20-30 m de gravas gruesas arenosas de aportación fluvial lineal, datadas como würmienses (aprox. 80 000 años) y que son la base sobre la que se asienta el último ciclo deltaico (fangos negros orgánicos prodeltaicos y arenas del acuífero superior). Tienen una buena continuidad lateral en todo el delta, salvo en los flancos, en donde cambia a otras facies y formaciones litológicas. Se caracteriza por la elevada permeabilidad (>50 m/d) y ser confinado. Es ligeramente surgente cerca del mar si la salinidad del agua que contiene es menor que la marina. El débil gradiente hidráulico no favorece el lavado y expulsión de las aguas salinas de este acuífero. Según las zonas se desarrolla entre 20 y 100 m de profundidad.

C) SISTEMA MULTICAPA INFERIOR

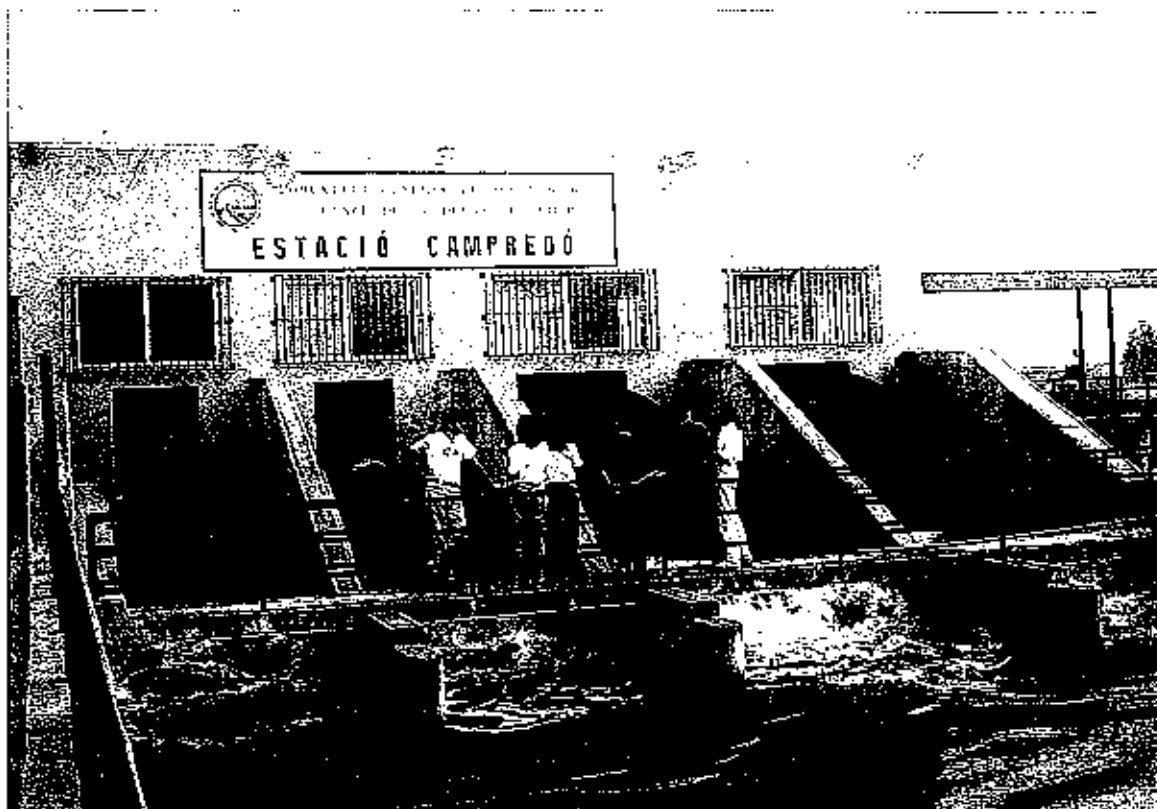
En profundidad se suceden los ciclos sedimentarios subyacentes más antiguos, ya sean fluviales detriticos gruesos o deltaicos finos propiamente dichos, dando un conjunto acuífe-

ro multicapa bajo el delta, que se desarrolla desde 70 m hasta más allá de 500 m de profundidad. Estos acuíferos cautivos y notablemente permeables sólo son conocidos con un cierto detalle hasta profundidades del orden de 200 m gracias a un par de pozos construidos para captar aguas de salinidad semejante a la del mar para cultivos marinos. A partir de esta profundidad solo se dispone de los datos de las perforaciones de exploración de hidrocarburos, pero aportan una información muy sucinta y poco precisa del cuaternario al no ser estos materiales el objetivo de esas perforaciones.

4.- PARTICULARIDADES DE LA DESCARGA DE LOS ACUÍFEROS

El acuífero fluvial lineal del valle bajo (hasta Amposta) descarga en el propio río, con una clara efluencia a lo largo de todo el sector implicado, hasta el inicio del delta. La descarga de los acuíferos deltaicos superficiales se produce por los canales de desagüe, que vierten a las lagunas y al litoral. Es poco conocido como se realiza la descarga del acuífero profundo y la de los inferiores. El acuífero profundo debe tener una circulación muy restringida y lenta, descargando subterráneamente al mar por zonas ignoradas, preferentemente laterales. De hecho la batimetría de 80 m, que correspondería al techo del acuífero profundo, en el Cap de Tortosa se localiza a unos 8 km mar adentro. Allí las cartas náuticas describen fondos rocosos que pudieran estar relacionados con las terrazas aluviales würmienses (IGME, 1986). El hecho de que el tránsito desde el agua

Foto 8. Detalle de la Estación de bombeo de Campredó con los tornillos de Arquímedes en funcionamiento (foto E. Custodio).



dulce al agua marina se haga progresivamente, en ocasiones hasta zonas cercanas a la actual desembocadura, justificaría tal afirmación para el acuífero profundo. En los acuíferos inferiores la ausencia de gradiente hidráulico hace pensar en un quasi estancamiento de flujo, e incluso es posible un pequeño gradiente de descarga de origen compactacional a cierta profundidad.

Merecen un comentario separado, por su singularidad e importancia, los mecanismos de descarga de los acuíferos carbonatados (Montsià principalmente) existentes en los flancos de delta. Para los mismos, los depósitos deltaicos son una especie de tapón o barrera geológica al flujo en las citadas formaciones de carbonatos, a las que confinan en una clásica disposición en fondo de saco bajo la plataforma continental. El agua subterránea descarga en forma de emergencias que dan lugar a pequeñas lagunas de poco calado (3 a 4,5 m) conocidas en la región como "ullals" (fig. 5). Son surgencias de aguas algo salobres, que generan y han generado gran actividad biológica en su entorno, cuyo registro fósil se traduce en hasta 8 m de espesor de turbas que, a modo de franja irregular, se distribuyen entre Amposta y Sant Carles de la Ràpita, y frente a Camarles. Aparecen cerca del contacto citado, que en ambos flancos deltaicos es una línea de drenaje. Los caudales de los referidos "ullals" eran de 3 m³/s en 1967, pero los aforos de 1994 midieron menos de 800 l/s en la margen derecha, existiendo serios temores sobre su permanencia a causa de la intensiva explotación de aguas subterráneas en los acuíferos re-

gionales carbonatados de la depresión de Tortosa-La Galera, a lo que se suma la coexistencia de un periodo pluviométricamente seco. En la margen izquierda (Camarles), ya hace tiempo que han desaparecido los "ullals" por causas semejantes a las citadas. Tan solo queda uno en el Ligallo de les Veles, que se drena por la Sèquia Sanitària.

5.- PROBLEMAS DE SALINIDAD ACTUALES Y FUTUROS

Tal como se ha ido comentando anteriormente, en general las aguas subterráneas del delta del Ebro se caracterizan por su elevada salinidad, lo que las hace inútiles para casi cualquier uso común en buena parte del territorio.

El acuífero profundo contiene agua dulce cerca de Amposta, que es la zona de descarga. Aunque no hay datos de detalle, en parte se trata de la descarga de los acuíferos continentales y en parte de aguas originadas en los canales del Ebro y campos de riego sobre los acuíferos aluviales. La distinción puede hacerse a partir del contenido en SO₄ y de la relación SO₄/Cl, que son valores altos para las aguas de origen fluvial. Solo se tiene datos de la descarga natural ("ullal") en la Partida de Baltasar, que corresponde a una salida de los acuíferos continentales bajo sedimentos deltaicos en un área encharcada y turbosa. Es moderadamente salobre (conductividad eléctrica media de 1,6 mS/cm y 350 mg/L de Cl⁻ en diversos con-

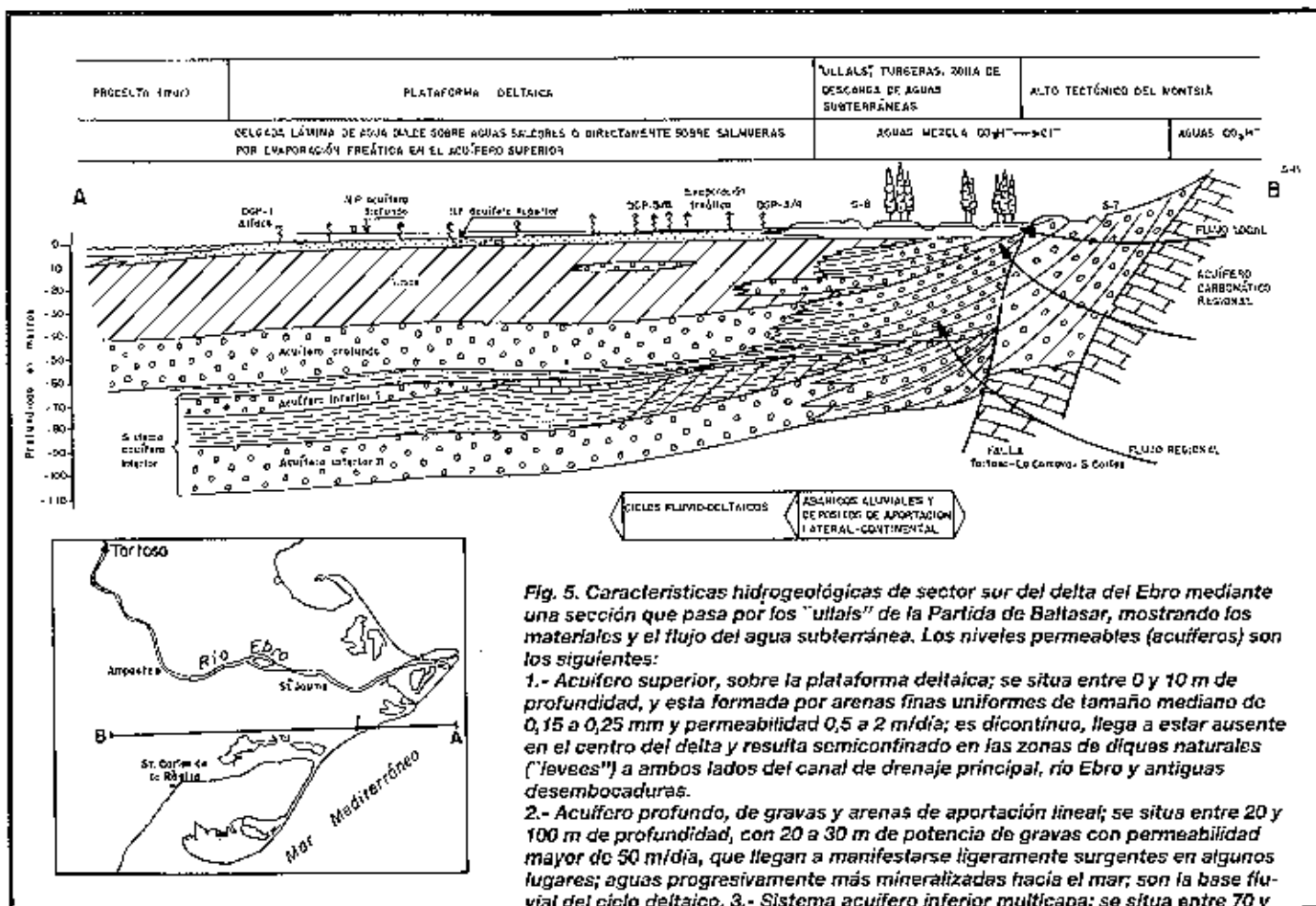


Fig. 5. Características hidrogeológicas de sector sur del delta del Ebro mediante una sección que pasa por los "ullals" de la Partida de Baltasar, mostrando los materiales y el flujo del agua subterránea. Los niveles permeables (acuiferos) son los siguientes:
 1.- **Acuífero superior, sobre la plataforma deltaica; se situa entre 0 y 10 m de profundidad, y está formada por arenas finas uniformes de tamaño mediano de 0,15 a 0,25 mm y permeabilidad 0,5 a 2 m²/día; es discontinua, llega a estar ausente en el centro del delta y resulta semiconfinado en las zonas de diques naturales ("levées") a ambos lados del canal de drenaje principal, río Ebro y antiguas desembocaduras.**
 2.- **Acuífero profundo, de gravas y arenas de aportación lineal; se situa entre 20 y 100 m de profundidad, con 20 a 30 m de potencia de gravas con permeabilidad mayor de 50 m²/día, que llegan a manifestarse ligeramente surgentes en algunos lugares; aguas progresivamente más mineralizadas hacia el mar; son la base fluvial del ciclo deltaico.**
 3.- **Sistema acuífero inferior multicapa; se situa entre 70 y más de 500 m de profundidad, con los mayores espesores hacia el hemidelta derecho; los niveles acuíferos son las gravas fluviales que se intercalan en los sedimentos deltaicos que corresponden a los diferentes ciclos superpuestos.**

troles en 1992 y 1993), lo cual indica una débil incorporación de aguas salinas del delta a una descarga mayoritaria de agua dulce, según los clásicos mecanismos de transporte de salinidad en formaciones deltaicas (Custodio y Llamas, 1983; Custodio y Bruggerman, 1987). El origen de la fracción mayoritaria de agua dulce no es bien conocida al no haber estudios de detalle, pero parece un agua oxidante en equilibrio con el terreno (alta relación Na/K). No es posible discernir la posible influencia de aguas fluviales del Ebro. El contenido isotópico del agua ($\delta^{18}O$ y δ^2H) es ligero (Touris, 1986; Touris y Custodio, 1983), lo cual indica tanto un origen fluvial como de recarga en las elevadas montañas próximas (Ports de Beseit), pero no local. Cabría explorar este tema en el futuro mediante la presencia de tritio, que está a elevada concentración relativa en las aguas fluviales a consecuencia de los vertidos de las centrales nucleoeeléctricas.

Al adentrarse en el delta, hacia la costa, las aguas del acuífero profundo se vuelven salinas, hasta valores de 20 g/L de Cl⁻, que corresponden al contenido del agua marina. Se trata de aguas marinas antiguas atrapadas en los sedimentos, modificadas por el ambiente reductor (alto contenido en materia

orgánica en los sedimentos), de modo que el contenido en amonio es alto (hasta varios mg/L), hay reducción de sulfatos más o menos intensa, y se alcanzan varios mg/L de Fe⁺⁺ y Mn⁺⁺.

La existencia de este agua marina es debida a la falta de potencial hidráulico suficiente del agua dulce, cuyo control está en el área de Amposta. La situación es similar a la del delta del Guadalquivir y muy distinta de otros deltas menores como los del Llobregat, Besòs y Tordera, como se ha mostrado en la figura 4, en los que la expulsión del agua marina y el lavado de los materiales del acuífero profundo se ha podido realizar durante el Holoceno a causa de la mucho mayor elevación del área de control del potencial. Esta situación se muestra esquemáticamente en la figura 6.

Los niveles arenosos permeables cerca de la superficie están separados y cortados por los canales de riego y los drenajes. Cabe suponer que el regadío haya modificado profundamente las características químicas del agua de esos niveles

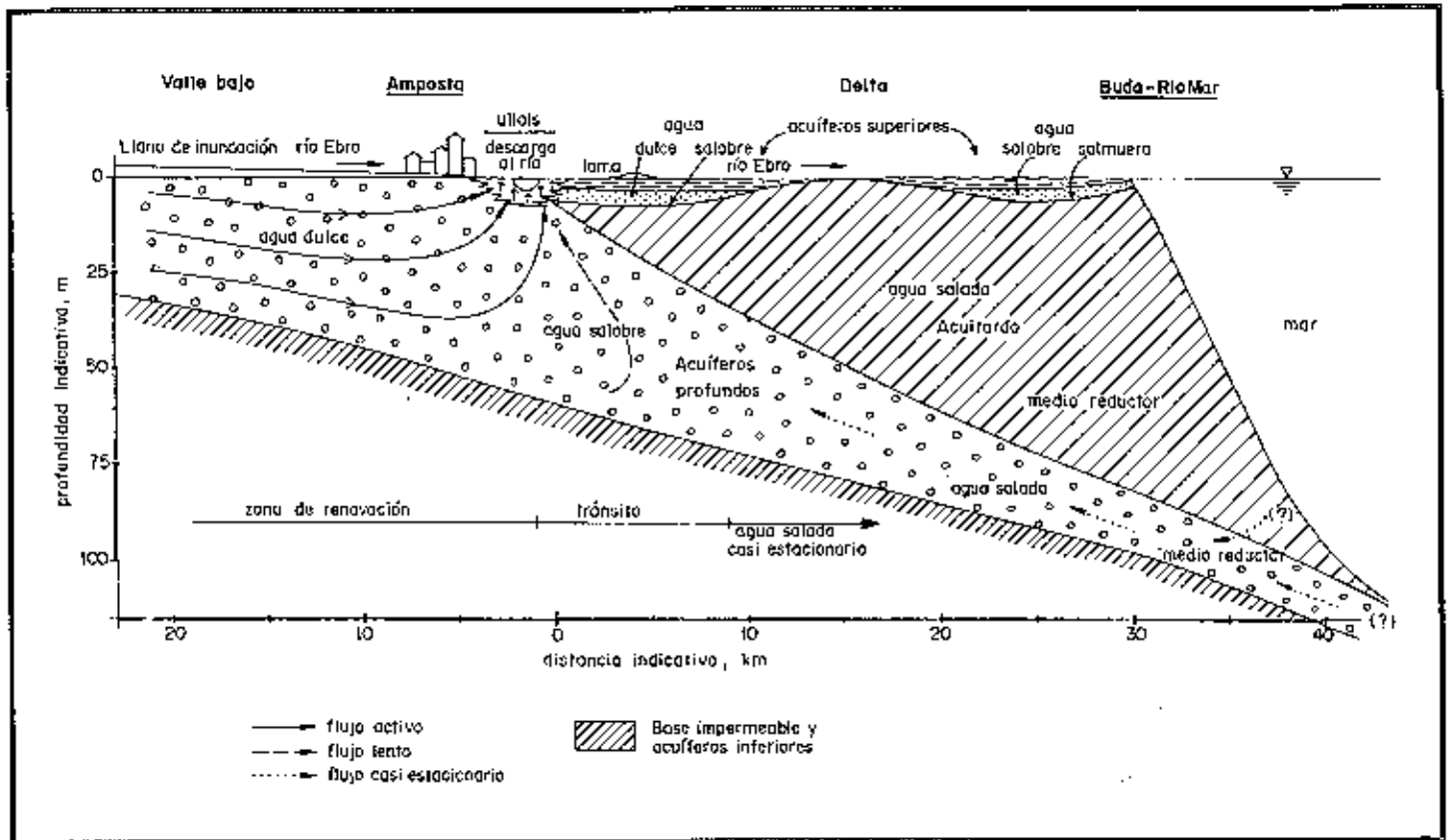


Fig. 6. Esquema del funcionamiento de los niveles permeables y acuífero intermedio del Delta del Ebro. En las zonas próximas a Amposta se descarga el agua dulce continental (o en áreas similares a lo largo del contacto delta-continente), que incorpora pequeñas cantidades de agua salada que procede de los propios sedimentos e incluso del mar, y cuya muy lenta circulación está asegurada por la baja elevación en Amposta y la disminución de densidad del agua que allí se produce.

permeables superficiales, pero no hay datos. En las áreas urbanas la contaminación parece importante, y posiblemente crecerá en el futuro a menos que se adopten intensas medidas de saneamiento.

Bajo niveles saturados muy someros, poco o moderadamente salinos, pueden existir formaciones limosas con aguas saladas e incluso salmueras. Se sabe que en el área de Mitjorn y de la laguna de la Tancada, a 5 m de profundidad se llega a triplicar la salinidad del mar, con conductividades eléctricas de 130 mS/cm y 70 g/L de Cl⁻. Se trata de aguas en ambiente muy reductor, con reducción de sulfatos, muy elevado contenido en amonio (70 mg/L) y muy bicarbonatadas (20 meq/L). Las sales parecen ser de origen marino (similar relación Na/Cl y Cl/Br), aunque la composición isotópica estable del agua apunta hacia agua dulce evaporada más que a agua marina evaporada. Sólo se tienen datos tomados durante prácticas con los alumnos del Curso Internacional de Hidrología Subterránea, con muestras alteradas por la inyección de agua dulce para la perforación, razón por la cual hay modificaciones químicas por mezcla y se encuentra un cierto contenido en tritio. Es posible encontrar diferentes hipótesis para la génesis, tales como disolución de sales marinas integrales (sin fraccionamiento Cl/Br) acumuladas en sedimentos lagunares sometidos a desecación, o la evaporación intensa de una mezcla de agua dulce y agua marina. Su alta densidad (cerca de 1,1 kg/L) favorece una fuerte estratificación de salinidad, lo que dificulta su eliminación por drenaje. Es

un problema para los cultivos diferentes del arroz (sin inundación) ya que la difusión salina ascensional acaba por afectar a la humedad de la zona radicular.

6.- UTILIZACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL DELTA DEL EBRO

Recopilando los datos de los diversos reconocimientos y estudios se puede describir el uso de los tres grupos principales de acuíferos del delta del Ebro. Como se ha dicho anteriormente no se incluyen ni los acuíferos carbonáticos, ni los aluviales del valle bajo, ni los de la depresión de Tortosa-La Galera.

A) ACUÍFERO SUPERIOR FREÁTICO

Se distinguen los siguientes usos:

▼ a1.- Para abastecimiento urbano. Se utilizó profusamente hasta la década de 1970 mediante pozos someros abiertos en las arenas semiconfinadas bajo los limos y arcillas de inundación de la planicie deltaica. Debido a problemas graves de tipo sanitario (salinidad y contaminación por retorno de fosas sépticas, abonos y tratamiento de los arrozales) las explotaciones se fueron abandonando progresivamente, desapareciendo como uso local al instalarse las redes de abastecimiento municipal con agua traída desde fuera del delta (valle bajo).

▼ a2.- Para abastecimiento rural de casas de campo diseminadas. En las mismas es frecuente encontrar pequeños pozos abiertos, parcialmente penetrantes en el acuífero para captar la delgada capa de agua dulce sobre agua salada. Algunos pozos captaban las filtraciones de los canales de riego y han debido ser abandonados tras aumentar la salinidad al revestir dichos canales para reducir las fugas en la red de canales de transporte de agua para riego.

▼ b.- Para permitir las prácticas agrícolas. Se trata del abatimiento del nivel freático para permitir cultivos no freatófitos, tales como hortalizas y en algún caso cítricos. El descenso del nivel freático se realiza mediante bombeo en pozos abiertos con largos colectores que reciben las aguas de las mallas subhorizontales de drenes bajo los campos de cultivo. Estas instalaciones de drenaje permiten además forzar el lavado vertical de las sales intersticiales, mejorando así el rendimiento de los cultivos.

▼ c.- Para acreción y estabilización de la línea de costa. Este particular uso del acuífero, actualmente en fase de experimentación, consiste en el bombeo de agua subterránea en los cordones de arena litorales mediante dispositivos a base de drenes subterráneos paralelos a la línea de costa, conectados a pozos de bombeo. El hecho de forzar un flujo de agua marina hacia el terreno en la zona de rompiente de oleaje crea una presión de filtración que hace más difícil el transporte de los granos de arena por la corriente de deriva, provocando la acreción de la línea de costa.

El carácter somero y salino del acuífero ha obligado tradicionalmente a su saneamiento agrícola mediante una densa red de desagües, desde la zona interna del Delta hacia su periferia. En la línea de costa las acequias principales de desagüe disponen de estaciones de bombeo para poder forzar la descarga en épocas de lluvia o de necesidad adicional de drenaje, dotadas con tornillos de Arquímedes con capacidad para evacuar hasta 55 m³/s en la margen derecha y 30 m³/s en la margen izquierda del delta.

Adicionalmente han existido algunas tentativas para captar agua marina a través del acuífero, evitando así problemas técnicos-legales de obras en la zona marítimo-terrestre, de fluctuaciones térmicas bruscas y de turbiedad. El destino de este agua marina ha sido los acuicultivos.



Foto 9. Instalación de un tubo de observación en el acuífero superior en el área de Mitjorn como una práctica de estudio del Curso Internacional de Hidrología Subterránea, utilizando una lanza de agua (foto E. Custodio).

B) ACUÍFERO PROFUNDO

Los primeros datos sobre la existencia de este acuífero profundo se deben a los reconocimientos geotécnicos para el puente sobre el río Ebro en Amposta. En 1923 el Dr. Faura y Sans por primera vez

describe su carácter surgente y por lo tanto el carácter de río ganador del Ebro en su tramo final, en la embocadura del delta.

En la década de 1960 el Instituto Nacional de Colonización realizó el primer sondeo profundo de carácter hidrogeológico cuya finalidad era tratar de solucionar el abastecimiento del poblado agrícola de Villafranco del Delta (Poble Nou). Esta es la primera perforación que pone en evidencia la existencia de aguas subterráneas de elevada salinidad en este acuífero en el interior del delta. Como ya se ha dicho, los sondeos de prospección de hidrocarburos que se realizaron en la misma época no aportaron datos de este tipo ya que su objetivo era otro y estaban dirigidos a reconocer formaciones más profundas.

En la década de 1970 en todo el delta sólo se realizaron 2 sondeos profundos. Uno estaba destinado al abastecimiento al proyecto de urbanización turística de Río Mar, con resultados negativos por la muy elevada salinidad, cercana a la del mar. El otro sondeo estaba destinado a captar aguas para lo



*Foto 10.
Playa típica en la
Isla de Buda,
con materiales y
morfología
similares
a las existentes
en las áreas que
se pretenden
estabilizar por
bombeo de agua
freática junto
al litoral.
(foto E. Custodio).*

que será más adelante una prometedora actividad económica en la zona: los acuicultivos marinos.

Poco antes del año 1988 se hicieron intentos de explotación de este acuífero en la zona de Sant Jaume d'Enveja-Amposta (Erms Salats) para riego de cultivos de invierno, extrayendo el agua subterránea profunda moderadamente salina allí existente, al no disponerse de agua del canal de la margen derecha del Ebro por estar éste no operativo durante al menos 4 meses al año por las obras de mejora del mismo. El exceso de salinidad del agua captada hizo abandonar el proyecto.

Ahora son ya varias las explotaciones de aguas subterráneas en el acuífero profundo para instalaciones de cultivos acuáticos marinos en tierra que buscan la constancia de la salinidad y la temperatura de las aguas. Sin embargo existen problemas de calidad debido a tratarse de aguas reductoras, lo que obliga a su tratamiento para eliminar el amonio y el hierro.

Uno de los mayores valores de estos acuíferos profundos, así como de los inferiores, es la de su utilización como reservorio térmico con temperaturas constantes comprendidas entre 18,5° y 18,9°C. Eso permite acuicultivos con bajos costes energéticos, tanto por utilización directa tras un pretratamiento (generalmente oxidación forzada, floculación y decantación) como a través de intercambiadores de calor con agua de mar. En el año 1988 se llevó a cabo una experiencia de incubación (hatchery) de "pneus japónica" en la Península dels Alfacs en la que a través de un intercambiador de placas de metal hastelloy que calentaba agua marina tomada de la bahía en invierno (puede descender hasta 4°C), y la enfriaba cuando aquella superaba los 22°C.

Uno de los pozos recientes, construido para un intento de captar aguas de salinidad marina, que está fuera de uso,

muestra un nivel del agua varios metros bajo el nivel del mar. Esta anomalía es sólo el efecto de la penetración de salmuera del acuífero superior por las juntas no herméticas de la entubación de material plástico; buena parte del tubo está ocupada por esa salmuera más densa, que se repone a medida que pasa el tramo de rejilla por convección descendente.

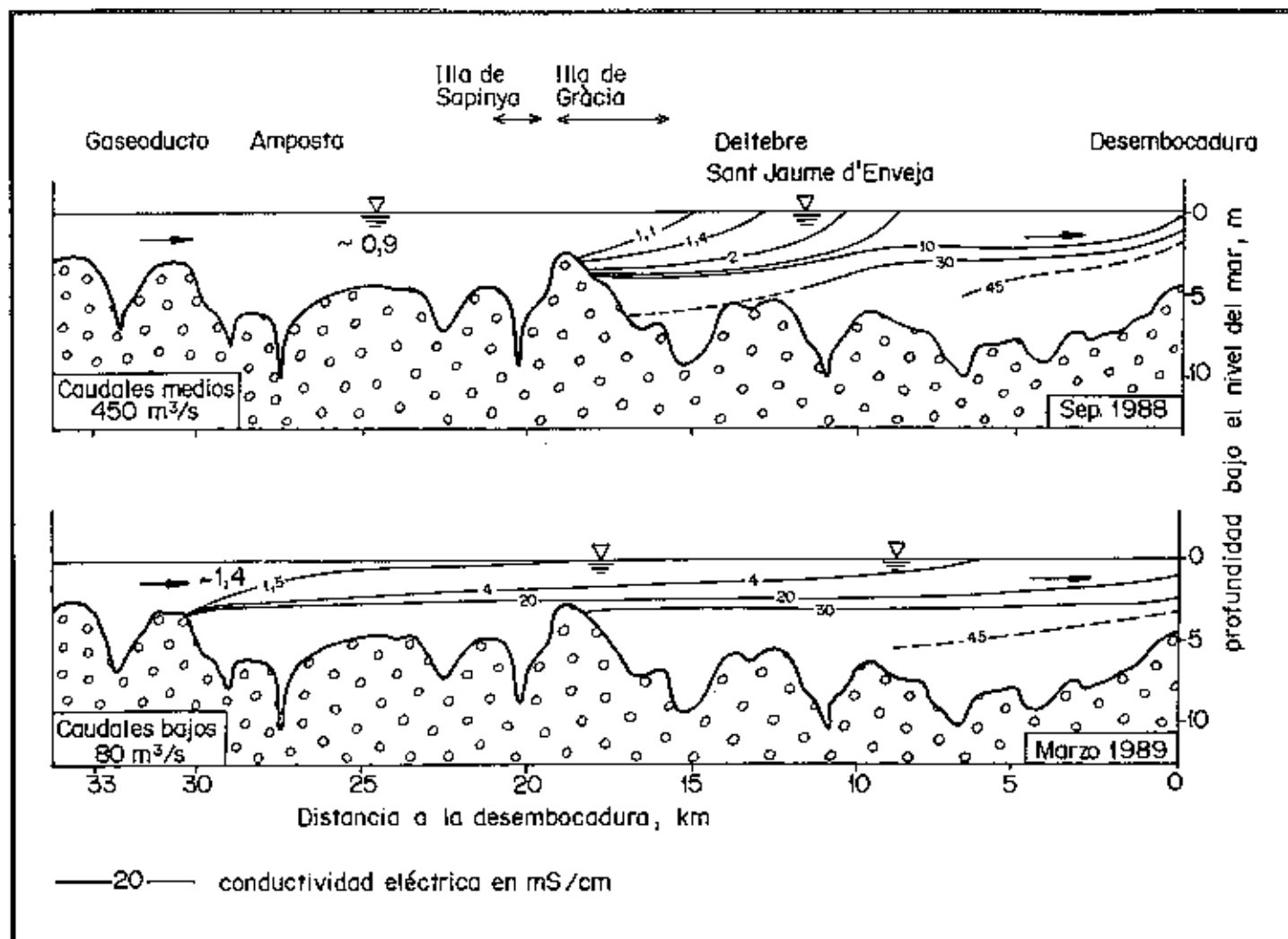
C) SISTEMA ACUÍFERO MULTICAPA INFERIOR

Si bien en el acuífero profundo aún se reflejan procesos de degradación de la materia orgánica existente en los acuitardos encajantes, este hecho no parece ocurrir en los niveles permeables inferiores, donde la digestión de la materia orgánica está muy avanzada. A estas profundidades, desde los 100 m hasta cerca de 250 m, la salinidad es similar a la del mar. No se tienen datos de profundidades mayores. La temperatura también aquí es casi constante en el tiempo y crece en profundidad.

En la actualidad tan sólo existe 1 sondeo en actividad. Explota este sistema acuífero inferior para depuración de mariscos. Dadas las posibilidades, es muy fácil que en el futuro se insista en la captación de estas aguas profundas e inferiores.

7.- INTERÉS Y PAPEL DE LOS ACUÍFEROS DELTAICOS

Ya se ha comentado que los problemas de salinidad hacen que las aguas subterráneas del delta del Ebro carezcan de interés para abastecimiento y para regadío, aún en áreas periféricas, donde las aguas dulces o poco salobres actuales pueden salinizarse fácilmente en el transcurso de la explotación.



Sólo en la misma embocadura del delta son una fuente de suministro de agua dulce como sucede en Amposta. Esto supone que el abastecimiento humano, ganadero e industrial debe hacerse, y se hace, desde el exterior del área. El tramo inferior río Ebro está afectado también por salinidad a causa de la cuña marina que penetra por el cauce (fig. 7) y que llega hasta Amposta e incluso le rebasa en épocas secas (Bayó et al., 1992). En todo caso hay que recurrir a tomas de los canales de riego, con el tratamiento adecuado. No obstante, es posible localizar niveles someros permeables con agua dulce en áreas con un pequeño relieve, siempre que no estén contaminados por las actividades agrícolas. Su interés es muy local. Localmente los "ullals" antes mencionados son una fuente de agua para riego hortícola. Los sobrantes de los "ullals" van a pasar directamente al mar, cuando se les podría dar un uso medioambiental tal como el aporte de agua dulce a la laguna de la Encanyissada.

Se puede incrementar la explotación de las aguas dulces subterráneas para abastecimiento en el área de Amposta, con

un pequeño riesgo de salinización, para extracciones moderadas, que no alteren de forma importante el carácter ganador del río. De otro modo se puede producir la penetración en el acuífero de la cuña salina que penetra a lo largo del cauce del río. La situación podría cambiar en el futuro si se llevase a cabo el proyecto de una presa abatible en el tramo final del río para evitar o reducir la penetración salina. El objetivo es principalmente para mejorar el aprovechamiento de las aguas fluviales en el tramo inferior para fines agrícolas y tendría el efecto secundario de discriminar el riesgo de salinización de los acuíferos en el área de Amposta.

Las aguas saladas profundas pueden constituir una fuente de agua similar a la marina para cultivos biológicos marinos. Una importante ventaja es la de la constancia de la temperatura, pero por el contrario su carácter reductor y la presencia de

Fig. 7. Penetración de la cuña salina por el cauce del río Ebro según datos del Servei Geològic de Catalunya (figura modificada de SGC, 1990). Los valores son la conductividad eléctrica en mS/cm a la temperatura del agua.

amonio y de metales pesados suponen una seria dificultad para su uso. Esto requiere o bien utilizar el agua simplemente como fuente térmica reguladora mediante un cambiador de calor resistente a la corrosión, o efectuar un tratamiento corrector previo. No se ha evaluado la respuesta del acuífero en cuanto a niveles y salinidad ante un posible uso intensivo, si bien las reservas son muy elevadas.

8.- AGRADECIMIENTOS

Se agradece al coordinador del presente número de esta revista, el Dr. Josep Dolz, la confianza depositada en los autores a sabiendas de que la tarea topaba con la falta de datos básicos y periódicos. También se agradece a los organismos, empresas y grupos de trabajo que han efectuado perforaciones y pozos el acceso en su momento a la información, la que ha sido recopilada año tras año por el tercero de los autores. Para la preparación del manuscrito se ha contado con el apoyo del Centro Internacional de Hidrología Subterránea y del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña, así como de la CICYT a través del proyecto AMB-92-636 sobre el área de Doñana, que presenta similitudes notables en numerosos aspectos.

9.- REFERENCIAS

- Baonza, E.; Plata, A. (1972). Localización y valoración de fugas en la red de riegos del Delta del Ebro. Gabinete de Aplicaciones Nucleares - CEDEX. Madrid (informe interno I-1A2/30).
- Bayó, A.; Berga, L.; Fayas, J.A. (1976). Avance al conocimiento de la hidrología de la comarca del "Baix Ebre" (valle inferior y delta del río Ebro). Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, I: 73-88.
- Bayó, A.; Custodio, E. (1989). Deltas et plaines côtières longitudinales de Catalogne. Notice Explicative de la Feuille B-6-Madrid, de la Carte Hydrogéologique Internationale de l'Europe 1/500 000. UNESCO - BFGUR. Paris-Hannover: 69-76.
- Bayó, A.; Loaso, C.; Aragonés, J.M.; Custodio, E. (1992). Marine intrusion and brackish water in coastal aquifers of Southern Catalonia and Castelló (Spain): a brief survey of actual problems and circumstances. Study and Modelling of Saltwater Intrusion. CIMNE-UPC. Barcelona: 741-766.
- CHE (1991). Estudio de los recursos hídricos subterráneos de los acuíferos de la margen derecha del Ebro, zona III: acuíferos de la zona baja, unidad hidrogeológica 09.31-3. Delta del Ebro, Tomo IV. Confederación Hidrográfica del Ebro: 1-64 + 4 mapas.
- Custodio, E.; Bayó, A. (1987). Acuíferos en deltas y costas lineales en Cataluña. Tecnología del Agua. Barcelona. 32: 102-112.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1983). Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona. 2 vols: 1-2350.
- Custodio, E.; Bruggeman, G.A. (1987). Groundwater problems in coastal areas. Studies and Reports in Hydrology. 45. UNESCO. Paris: 1-576.
- GANOP (1971). Estudio sobre el movimiento y edad de las aguas subterráneas en el acuífero situado entre Amposta y San Carlos de la Rápita. Gabinete de Aplicaciones Nucleares - CEDEX. Madrid (informe interno).
- IGME (1986). Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes. E 1:200 000. Tortosa (Tarragona). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Hoja 41-42.
- INC (1966). Proyecto de saneamiento y riegos del Delta del Ebro. Hydrotechnic Corp. SA.-Instituto Nacional de Colonización. Madrid (informe interno).
- JAC (1989). Estudi de la salinitat de les aigües de la Vall Baixa i Delta del Riu Ebre. Junta d'Aigües de Catalunya. Barcelona (informe interno).
- Loaso, C.; Hernán, F.J. (1988). Aportaciones al conocimiento de la hidroquímica e hidrogeología del acuífero del Delta del Ebro: su importancia en relación con el desarrollo de la agricultura. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Madrid. XI: 183-192.
- SGC (1990). Estudi de l'aportació sòlida del riu Ebre. Servei Geològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona. Vol I,II (informe interno).
- SGOP (1972). Informe hidrogeológico sobre los trabajos realizados en la zona de San Carlos de la Rápita y del Delta del Ebro. Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona (informe interno).
- Tourís, R. (1986). Recursos hídricos subterráneos de la vessant catalana de l'Ebre: Baix Ebre. Servei Geològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona: 1-300.
- Tourís, R.; Custodio, E. (1983). Nuevos conocimientos hidrogeológicos del Bajo Ebro. Actas de la V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Instituto Geográfico y Catastral. Madrid 4(III): 1819-1834. ☉