

UTILIZACIÓN DE ACUÍFEROS COSTEROS PARA ABASTECIMIENTO.

Dos Casos de Estudio: Mar del Plata (Provincia de Buenos Aires, Argentina) y Barcelona (Cataluña, España)

Emilia Bocanegra¹, Emilio Custodio²

¹Centro de Geología de Costas y del Cuaternario. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

²Acad. Ciencias. Dep. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

RESUMEN: Mar del Plata es una ciudad costera en la franja atlántica de la Provincia de Buenos Aires (Argentina), con vocación predominantemente turística, pesquera y comercial. Barcelona es una ciudad costera mediterránea en Cataluña (España), con actividad dominante en el campo de la industria y los servicios. En ambas el agua subterránea juega un papel muy importante, el principal en Mar del Plata, y actualmente el de emergencia de abastecimiento y el de base de pequeños núcleos urbanos y centros industriales en Barcelona, aunque fue el principal en decenios pasados. En ambos casos los acuíferos son costeros, abiertos al mar, extenso y libre en el caso de Mar del Plata, y de tamaño reducido y cautivo en la costa el caso del delta del Llobregat, en Barcelona. En ambos casos la explotación intensiva del agua subterránea ha llevado a problemas serios de intrusión marina, con abandono de pozos y de ascenso de niveles en áreas previamente drenadas por las extracciones. Además existen riesgos notables de degradación del agua por actividades territoriales, principalmente agrícolas y de saneamiento. El resultado es un aumento progresivo y alarmante de nitratos, general en Mar del Plata y local en Barcelona. Buena parte de los problemas se pueden asociar a inadecuada gestión y a actuaciones territoriales desafortunadas, pero son corregibles si se utilizan los medios adecuados. Así se puede llegar al uso sostenible de un recurso de agua vital y de gran interés económico y social, al tiempo que se dispone de una reserva de emergencia de alto valor estratégico.

INTRODUCCION

La ciudad de Mar del Plata fue creada a finales del siglo pasado y principios del actual. Tiene una base económica basada en el turismo, el comercio y la pesca. Cuenta con cerca de 600 000 habitantes residentes, que se convierten en casi 2 millones en la época estival. En 1970 se produjo un fuerte flujo inmigratorio, hoy ya estabilizado. Está situada en el centro del litoral Atlántico de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, y es la ciudad principal del Municipio de General Puyredón. Ocupa parte del llano costero y las pequeñas elevaciones que produce el afloramiento del substrato rocoso paleozoico. Es una ciudad con las edificaciones comunes de poca altura y por lo tanto extensa (100 km²), que grada lentamente hacia un espacio rural de huertas, pastizales y cultivos extensivos. Está situada directamente sobre el acuífero (Figura 1).

La ciudad de Barcelona existe desde hace más de 2000 años. Tiene una base económica industrial y de

servicios, y cuenta con 3,5 millones de habitantes en su área metropolitana, que comprende una veintena de municipios. Hasta principios de siglo era una ciudad de tamaño medio, con núcleos urbanos próximos importantes y económicamente muy activos. Desde entonces ha sufrido una fuerte corriente inmigratoria, acelerada en la década de 1950, hoy ya desaparecida, que ha llevado a una intensa ocupación del territorio. Se sitúa en un declive costero al pie de la Cordillera Litoral Catalana, entre los pequeños deltas de los ríos Besós y Llobregat (Fig. 1). El primero está hoy casi totalmente urbanizado y el segundo parcialmente ocupado por extensiones urbanas, polígonos y establecimientos industriales y vías de comunicación (puerto, aeropuerto, autovías), pero que aún conserva una parte rural de huerta de cultivo intensivo y espacios naturales y de uso turístico-recreacional. Ambos extremos del llano quedan cerrados sobre el mar por la Cordillera Litoral, y por lo tanto el espacio es muy limitado, dando lugar a un área urbana muy densa, de edificaciones altas. La ciudad no está situada sobre el acuífero principal, el delta y valle bajo del Llobregat, sino sobre el antiguo Llano

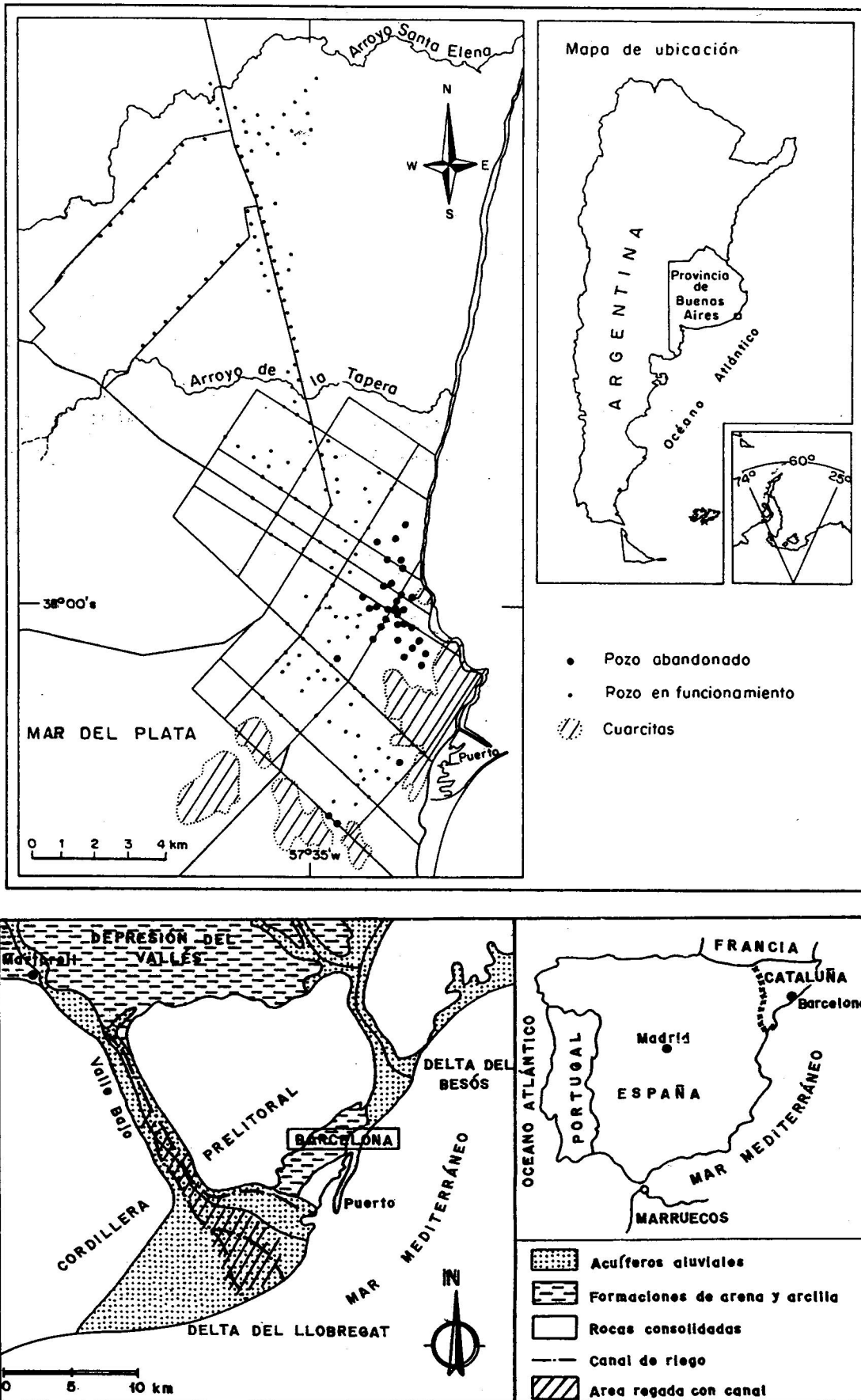


Figura 1. Situación del acuífero costero de Mar del Plata y de los de Barcelona. Mar del Plata está a 38°S y Barcelona a 42°N

de Barcelona, aunque hay numerosas instalaciones sobre aquellos. La superficie urbana costera es de unos 60 km².

Mar del Plata está a una latitud 38°Sur y Barcelona a 42°Norte, y por lo tanto en posiciones similares en hemisferios diferentes, aunque Mar del Plata es más húmedo, recibiendo una precipitación media de 850 mm/a en un ambiente de temperatura media 13,5°C, si bien el suelo está a 16°C. Durante el presente siglo la precipitación media ha ido aumentando desde 750 a 930 mm/año (Bocanegra et al., 1993). La recarga media de los acuíferos en el llano vale entre 100 y 150 mm/año. La escorrentía superficial es pequeña y no hay ningún curso de agua permanente importante, salvo el pequeño Arroyo de la Tapera. En Barcelona la precipitación media es de 630 mm/año, sin tendencia clara, con una temperatura media del suelo de 16°C. La recarga media a los acuíferos vale entre 50 y 80 mm/año. La escorrentía superficial puede ser localmente elevada en el entorno montañoso, la cual en parte se infiltra aguas abajo si la urbanización y canalizaciones no lo impiden. Al área barcelonesa llegan dos ríos alóctonos (traen recursos de agua generados fuera del área): el Llobregat, con 19 m³/s de caudal natural medio, y el Besós con 2 m³/s de caudal medio. Ambos son susceptibles de grandes crecidas y sequías importantes. Actualmente sus regímenes hídricos están muy alterados por numerosas obras hidráulicas y transferencias de agua.

La ciudad de Mar del Plata consume 80 hm³/año de agua de distribución centralizada, siendo la demanda mayor ya que puede haber periodos estivales de restricción parcial. Además existe un 30 % de la población fuera del área servida que usa recursos propios, en general mediante pozos domiciliarios o cooperativos. La época estival supone un agudo aumento de la demanda. La red de distribución está razonablemente bien conservada, pero en la parte antigua de la ciudad las fugas de agua pueden ser de hasta el 30 %, lo que explica en parte las elevadas dotaciones por persona. Existe una red de saneamiento separativa de agua servidas y pluviales. El vertido se realiza al mar después de un tratamiento primario de los afluentes urbanos. Prácticamente toda esta agua es de origen subterráneo.

La ciudad de Barcelona consume cerca de 300 hm³/año de agua de las redes metropolitanas, en su mayoría de Sociedad General de Aguas de Barcelona (SGAB), que sirve además a industrias no singulares y algunas singulares. La dotación doméstica y comercial medida en los recintos servidos es de alrededor de 330 l/habitante/día. En su mayoría son aguas de origen superficial. No existen grandes variaciones estacionales. Las aguas subterráneas cubren actualmente el suministro de punta y de emergencia más el suministro base de algunos municipios y muchas industrias

singulares que totaliza actualmente otros 60 hm³/año. La totalidad de la población recibe agua de las redes de distribución. El saneamiento es integral en su mayor parte, existiendo una capacidad de tratamiento de aguas residuales previa al vertido al río o al mar mediante emisarios submarinos de 10 m³/s, que está próxima a ampliarse a 20 m³/s, con una parte importante de tratamiento secundario. La red de distribución está en general en buen estado y se controla con cierta facilidad por existir contadores domiciliarios, pero al igual que en Mar del Plata la situación en el casco antiguo es deficiente y las fugas pueden ser ocasionalmente importantes. Se estiman más pérdidas reales medias comprobadas del 8 al 10 % y unas diferencias adicionales del 12 al 15 % a causa de la inercia de los contadores domiciliarios.

En Mar del Plata el abastecimiento y saneamiento es competencia municipal y se realiza mediante la empresa pública municipal Obras Sanitarias. Dicho organismo tiene competencia exclusiva en el uso y la gestión del acuífero en su área de actuación de acuerdo con las disposiciones del Municipio. Para el control y gestión se ha creado un Comité de Cuenca en el que participan los Usuarios, aunque aún no es operativo. En Barcelona la competencia es también municipal, pero el abastecimiento de agua potable y tratamiento del agua para potabilización lo hacen la empresa privada SGAB y la empresa pública Consorcio de Abastecimiento del Área Metropolitana de Barcelona, según las áreas, además de algunos suministros gestionados por los propios municipios locales. El saneamiento se realiza a través de la Empresa Metropolitana de Saneamiento. Existen y funcionan dos Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas, cuya finalidad es velar por los intereses de dichos usuarios - en su mayoría empresas de abastecimiento e industriales - y por la conservación de los recursos de agua subterránea dentro de lo que dispone la Ley de Aguas de 1985. Su papel aún no está bien asumido ni por la Administración ni por los propios usuarios, y por eso su relevancia es menor de lo esperable, aunque se está consolidando.

ASPECTOS BÁSICOS DE LA UTILIZACIÓN DE LOS ACUÍFEROS COSTEROS

Los acuíferos costeros tienen como contorno la interfaz entre el continente y el mar, a través de la cual, en condiciones naturales, el agua dulce continental descarga al mar. En general es de forma difusa, pero también puede producirse de modo concentrado a través de rasgos litorales (depresiones costeras, tramo final de cauces) o heterogeneidades del medio (fracturas abiertas principales, conductos de disolución en medios carbonáticos). También puede ser importante la descarga a la atmósfera por evaporación y transpiración cuando el nivel freático está próximo a la superficie o hay encharcamiento.

El hecho de que la densidad del agua marina (1025 kg.m^{-3}) sea mayor que la del agua dulce (1000 kg.m^{-3}) produce que en los materiales costeros el agua dulce fluye sobre una cuña de agua marina. Es una situación bien descrita clásicamente de forma cualitativa y cuantitativa (Custodio y Llamas, 1976, 1983; Custodio y Bruggeman, 1987). Existe un conjunto de variantes en función de la estructura del medio acuifero y de las salinidades reales, incluyendo la posibilidad de que se lleguen producir salmueras de evaporación.

La hidrodinámica del sistema agua dulce-agua salada en un acuifero costero, por un lado lleva a que ambas aguas tiendan lentamente a mezclarse, pero por otro los procesos de transporte salino a lo largo de la zona de contacto evacúan al mar salinidad. El resultado en estado estacionario es un equilibrio entre la tendencia a la mezcla y la tendencia al lavado. Así se produce un tránsito entre el agua dulce y el agua salada, que en general se realiza en un corto espacio, desde pocos decímetros a varios metros, aunque hay situaciones en que la zona de mezcla puede llegar a ocupar casi todo el espesor del acuifero. Algo similar sucede en los estuarios, sólo que lo que en éstos se produce a lo largo de km, en los acuíferos se produce en decámetros.

El flujo de agua dulce que descarga el mar juega un papel esencial en el mantenimiento de estas condiciones de equilibrio. Si dicho flujo se modifica se pasa a una situación transitoria que evoluciona hacia un nuevo equilibrio de modo que cambia la penetración

del agua salada y crece el espesor de la zona de mezcla. Dicho transitorio puede durar desde meses en medios de dimensiones pequeñas y muy permeables hasta miles de años en medios extensos y muy poco permeables. En éstos últimos aún pueden persistir las modificaciones que se produjeron hace unos 10000 años, cuando el nivel medio del mar ascendió del orden de 100 m a causa del cambio climático que marca el final de la última glaciación (tránsito Pleisto-ceno-Holoceno). Se manifiesta principalmente como salinidad residual en acuitardos o formaciones marinas recientes.

La forma más usual de utilización de los acuíferos costeros es para la extracción de agua dulce subterránea, en general mediante pozos, aunque también puede ser mediante drenes y zanjas. Si dicha extracción no viene compensada por un aumento de la recarga se producirá un descenso en igual cantidad de la descarga de agua dulce subterránea al mar. Es un proceso transitorio en que a una extracción iniciada en un momento determinado le corresponde una reducción progresiva de la descarga, a lo largo de meses o años, de forma que la diferencia se salda con una disminución del almacenamiento de agua subterránea dulce en el sistema. Como consecuencia de la disminución de descarga de agua subterránea dulce al mar se inicia un proceso de penetración de la cuña de agua marina y una expansión de la zona de mezcla, magnificada por las diferencias de avance a causa de las heterogeneidades. Se puede llegar a un nuevo equilibrio sin más consecuencias que una reducción del agua dulce en almacenamiento en el sistema, si aún subsiste una descarga suficiente de agua

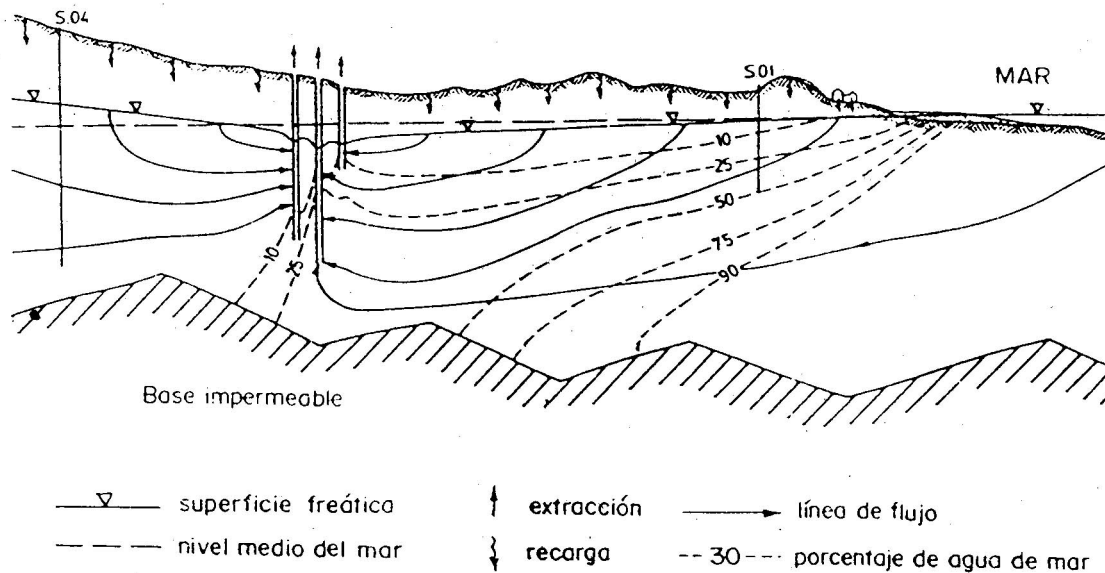


Figura 2. Esquema de flujo en un acuifero costero con intrusión marina y pozos extrayendo agua salobre y salada. El agua extraída con un pozo parcialmente penetrante es una mezcla de agua subterránea procedente del interior del continente, de agua marina con un largo tiempo de tránsito por el medio y de la recarga local entre la posición de los pozos y la costa, que en parte puede ser de retorno de riego o de fugas de redes que se abastecen de la propia agua

dulce al mar y la cuña de agua salina no penetra hasta la posición de los pozos de extracción. De otro modo se produce la salinización de las captaciones al cabo de un cierto tiempo, bien sea por acceso directo del agua salada a los tramos de admisión (filtros) bien sea por que se producen conos ascensionales salinos al situarse el agua salina bajo la captación. En cualquiera de los casos la salinidad del agua extraída por los pozos es variable en función del régimen y tiempo de extracción del agua del propio pozo y de otros pozos que influyen hidráulicamente. Rara vez produce agua de salinidad igual a la marina, ya que en el pozo convergen tubos de flujo de agua dulce, mezclada y marina (Fig. 2).

LOS ACUÍFEROS COMO FUENTE DE AGUA DE ABASTECIMIENTO: RECURSO DE BASE Y RECURSO DE EMERGENCIA

Una parte importante de los asentamientos humanos y sus actividades económicas y lúdicas se realizan cerca del mar, en las áreas costeras, mientras las necesidades de agua dulce son elevadas y su disponibilidad superficial es escasa. Esto es debido a que los ríos están separados por largos tramos de costa y a que con frecuencia estos ríos están contaminados - final de su recorrido por el territorio - o sujetos a salinización por efecto estuario. Así no es de extrañar que los recursos de agua subterránea dulce de los acuíferos costeros adquieran una importancia capital, en cuanto a regularidad de suministro y frecuente ausencia de problemas que obliguen a un tratamiento costoso para corregir la calidad.

No obstante, existen problemas importantes para la utilización sostenible, cuya solución requiere una buena gestión, además de una adecuada forma de captación. Uno de ellos es la limitación de los recursos disponibles, que como mucho son iguales a los de descarga de agua subterránea al mar, salvo que se incrementa la recarga. En la realidad son menores ya que la penetración del agua salada en el continente no debe rebasar ciertas posiciones en función de la ubicación de las captaciones. Estos recursos disponibles no suelen superar algunos hm^3 anuales por km de longitud de costa ya que en general las condiciones hidrogeológicas comunes imponen que flujos mayores supongan la descarga en superficie en el continente, a ríos o lagos, o su evapotranspiración en áreas de nivel freático somero. En áreas costeras pedicordilleranas los recursos de agua dulce disponibles están limitados además por el tamaño de la cuenca receptora y la precipitación que se puede convertir en recarga. Los recursos de agua explotables permanentemente tienen poca relación con los caudales de agua extraíbles, del mismo modo que el agua que aporta un manantial a un estanque no guarda relación con el caudal de una bomba que

aspire agua del estanque. Sin embargo, este concepto evidente no es del dominio público, ni está claro para muchos gestores. A ello contribuye el hecho de la individualidad de cada captación en un conjunto de puede contener muy numerosas captaciones, y el desconocimiento del uso del sistema y del valor de la recarga o de la descarga, que no son visibles.

Otro problema importante es el del adecuado diseño y ubicación de las captaciones. Captaciones mal diseñadas e inadecuadamente construidas pueden producir agua salina o salobre por tener tramos de admisión de agua de niveles con agua salina residual o fácilmente intrusibles por agua marina, por ejemplo por ser muy permeables. Además en esos lugares se pueden presentar problemas de unión, soldadura o corrosión de las entubaciones. Las captaciones próximas al mar limitan la fracción de la recarga que puede captarse de forma sostenible, así como las muy alejadas, en el primer caso por ser fácilmente alcanzables por la cuña de intrusión marina a través de alguno de los niveles permeables, y en el segundo por no poder captar una parte importante de la recarga local si no es con grandes descensos piezométricos.

El abastecimiento de las necesidades humanas tiene dos aspectos importantes, el de la base - cubrir las demandas que se producen un elevado número de horas al año - y el de la punta, o sea dar el servicio en momentos en que la demanda se intensifica, sobre todo de forma aguda durante un número pequeño de horas al año. Tales son los servicios vacacionales o de regadíos estacionales. Por regla general la base se cubre con fuentes permanentes y la punta con el uso de reservas, las cuales se restituirán posteriormente en épocas de baja demanda. A esto se suma los fallos en la disponibilidad de la base del sistema de suministro de aguas, integrado por uno o por varios elementos combinados, bien sea por sequía, avería importante en el sistema de aducción o contaminación persistente durante cierto tiempo. Estos fallos se han de cubrir con el uso de reservas de emergencia o estratégicas (Sahuquillo, 1983; Andreu, 1993).

Los acuíferos costeros tienen un importante papel bajo los dos aspectos, pero es de especial relieve el segundo ya que su lentitud de respuesta y gran almacenamiento permite que cumplan la función de esos depósitos de regulación y emergencia. Además ya existen y suelen estar próximos al lugar de demanda. En lugares donde la creación artificial de elementos de regulación y reserva es técnicamente difícil o imposible, o pueden suponer grandes pérdidas de agua por evaporación o por eutroficación, o enormes costes económicos, los acuíferos pueden ofrecer reservas alternativas de agua de gran valor. Por ello la correcta explotación, protección y adecuada gestión de los acuíferos costeros es de suma importancia local,

técnica, económica y socialmente. Su degradación especulativa, por ignorancia o por desidia es un grave problema que afecta al desarrollo y al bienestar (Llamas, 1988; 1991). Mar del Plata y Barcelona son dos buenos ejemplos.

CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS Y ABASTECIMIENTO DE MAR DEL PLATA Y BARCELONA

El acuífero de Mar del Plata está formado por una alternancia pleistocena semiconsolidada de arenas finas y muy finas, y limos eólicos y fluvio-eólicos, con niveles de caliche (tosca), en un conjunto designado como "loess", que es característico de un amplio dominiogeográfico (Formación Pampeana). Reposas unas veces directamente sobre ortocuarcitas eopaleozoicas muy compactas, aunque fracturadas, y otras sobre arenas y arcillas miocenas (Groeber, 1954; Ruiz Huidobro, 1971; Hernández et al., 1991). El espesor puede variar normalmente entre 70 y 110 m, con el nivel freático entre 1 m y 15 m de profundidad. Las cuarcitas forman un conjunto de fosas y altos tectónicos que individualizan algunos compartimentos y hacen que, en el área de Mar del Plata, el acuífero detrítico no sea continuo a lo largo de la costa. Parece que a efectos prácticos las cuarcitas se comportan como poco permeables, aunque pueden tener cierta permeabilidad local asociada a fracturas mayores, mal conocidas, y que en épocas pasadas dieron lugar a algún manantial menor cerca del litoral. El acuífero limita hacia el oeste y sur con la divisoria de aguas superficiales - que coincide aproximadamente con la de aguas subterráneas - constituida por las sierras del sistema de Tandilia. Se extiende hacia el norte y es actualmente explotado hasta las inmediaciones del Arroyo de Sta. Elena. La línea de costa constituye el límite este (Fig. 1). El acuífero tiene una transmisividad media del orden de 700 m²/día, que crece desde 400 m²/día al NE hasta 1500 m²/día al NW. La permeabilidad media es de 10 a 15 m/día (Bocanegra et al., 1993). Aún no está bien explicado como los materiales descritos tienen tal alta permeabilidad media. Como están semiconsolidados, la fisuración puede jugar un papel importante y además condicionar el transporte de masa en el medio saturado, posiblemente como si tratara de un medio de doble porosidad.

Los cursos de aguas superficiales escurren de W a E y son de escasa magnitud. El arroyo de La Tapería es el único permanente y drena al acuífero en su cabecera, aunque puede recargar en el tramo medio en el que los niveles freáticos están deprimidos a causa de la explotación de aguas subterráneas.

El abastecimiento a Mar del Plata se hace a través de un número muy elevado de pozos (210 en el momento presente, con otros próximos a entrar en funciona-

miento) que extraen en total 80 hm³/año, distribuidos sobre un territorio muy extenso, que a grandes rasgos se alarga según la ruta de Mar del Plata a Buenos Aires, con ramales (Fig. 1). El sistema de captación es el adecuado a un medio de transmisividad moderada que a largo plazo se comporta como libre (baja difusividad hidráulica). Los pozos de abastecimiento, que penetran casi totalmente el acuífero, en general están cementados hasta los 35 ó 45 m de profundidad, casi varios tramos de filtro por debajo y gravilla en el espacio anular, ya que el terreno no suele derrumbarse. Sólo los pozos más antiguos tienen filtros a menor profundidad.

Los acuíferos de los deltas de los ríos Besós y Llobregat responden al esquema clásico de los deltas holocenos (Stanley y Warme, 1994; Custodio y Bruggeman, 1986), en este caso con elementos hidrogeológicos muy claramente definidos (Llamas y Molist, 1967; Custodio, 1981; Marqués, 1984; Manzano, 1991). Cada uno de los deltas está en continuidad con los depósitos aluviales del tramo inferior del valle del río que los ha formado. Se trata del tramo final a la salida del estrecho valle epigénico por el que atraviesan la cordillera litoral, y cuyo encajamiento hace que a efectos prácticos estén individualizados de los depósitos aluviales del otro lado de la cordillera (Fig. 1). El valle está excavado en materiales que pueden considerarse impermeables y en los que los torrentes laterales y sus aluviones tienen poca importancia, tanto en la parte que aporta al valle bajo como directamente al delta. El Bajo Besós (valle bajo y delta) cubre unos 5 km², hoy casi totalmente urbanizados. Los acuíferos del delta están muy salinizados por exceso de extracciones en el pasado y puesta en comunicación de los dos niveles principales por pozos mal diseñados, corroídos o abandonados, y en el área existe una seria contaminación de origen industrial (Custodio, 1981). Esta situación deplorable y de abandono contrasta con su gran importancia entre mediados del siglo pasado y mediados del presente siglo (Moragas, 1896; Llamas y Vilaró, 1967), y es el lamentable precio pagado por la falta de gestión y explotación descontrolada.

Entre el Bajo Besós y el Bajo Llobregat se extiende el Llano de Barcelona, que es un área llana inclinada hacia el mar, hoy totalmente urbanizada. Estaba surcada por torrentes que se iniciaban en la Cordillera Litoral (Serra de Collserola), con sus depósitos aluviales y de abanico aluvial sobre depósitos arenosos pliocenos y cuaternarios, y extensas formaciones de limos eólicos semiconsolidados en una secuencia de tres ciclos (Solé Sabarís, 1963).

El Bajo Llobregat es el sistema acuífero principal, formado por las gravas gruesas predominantemente carbonatadas de un conjunto de terrazas aluviales encajadas unas en otras, de edad Pleistocena y Holoceno-

na (Solé Sabarís, 1963; Llamas y Molist, 1967). Bajo el nivel del río existe un espesor de aluviones groseros, entre 15 m agua arriba hasta 50 m aguas abajo, que responden a un río de notable energía a causa de la notable pendiente ocasionada por su paso a través de la Cordillera Litoral.

Hasta las proximidades del extremo inferior del valle bajo el acuífero es libre y está formado por esas terrazas aluviales y sus depósitos de limos y arenas, y el recubrimiento parcial por suelos arcillosos de llanura de inundación. Aguas abajo se extienden bajo lo que es hoy delta, hasta alcanzar el fondo marino a cota aproximada - 100 m, entre 3 y 5 km de la línea de costa actual. A éste nivel, que se adelgaza desde unos 50 m a menos 10 m, se unen los depósitos pre-holocénicos de los torrentes locales y antiguas playas. Forman una unidad permeable más o menos continua y heterogénea, que abarca todo el delta y se extiende mar adentro, llamada acuífero profundo, que está confinada bajo materiales limosos.

Tras la rápida elevación del nivel del mar que marca el principio del Holoceno el área quedó cubierta por el mar, que llegó a penetrar por lo que hoy es valle bajo. Tras depósitos iniciales arenosos y de turbas se sedimentaron, en ambiente de agua salada y en facies prodeltaicas, un considerable espesor de limos ricos en materia orgánica, que comprenden desde arcillas a arenas finas (Marqués, 1984). Constituyen el acuitardo intermedio, con espesores de hasta 40 m a lo largo de la costa actual (Custodio et al., 1971; Manzano et al., 1986-87), y que decrecen aguas arriba hasta desaparecer en el valle bajo y laterales del delta y hacia mar adentro (Fig. 3), donde hay un frente inclinado de sedimentación que no llega a cubrir del todo los depósitos del acuífero profundo

(Serra y Verdaguer, 1983; Manzano, 1991).

La estabilización final del nivel del mar y el notable aumento de materiales terrígenos aportados por la cuenca del río Llobregat, en parte naturales por erosión - posiblemente incrementada por el cambio climático holocénico - y en parte antrópicos por tala e incendio de bosques y establecimiento de civilizaciones agrícolas desde hace por lo menos 3000 años. En un mar con marea pequeña el resultado es la formación de barras que poco a poco fueron aislando lagunas costeras, que después se rellenaron. El conjunto de depósitos fluviales, torrenciales, litorales, eólicos y de relleno de laguna forman el acuífero superior, que está cubierto en buena parte del área por depósitos recientes limoso-arcillosos de llanura de inundación, muy fértiles agrícolamente, y con alturas de 0,5 a 2 m sobre el nivel medio del mar local actual.

El acuífero superior apenas es explotado por su baja productividad media, la mala calidad química de sus aguas y los frecuentes problemas de arrastres de arenas finas en los pozos. Por el contrario, tanto el acuífero profundo del delta como su extensión en el valle bajo están sometidos a intensa explotación para abastecimiento urbano de núcleos de población locales y para polígonos industriales e industrias singulares (Fig. 4). Se trata de explotaciones más o menos individuales y de carácter continuo. Por otro lado el acuífero es un elemento principal de reserva de agua potable de emergencia, como se comentará en el apartado siguiente.

Los pozos tienen filtro en el acuífero y no se coloca macizo de grava por formarse éste naturalmente

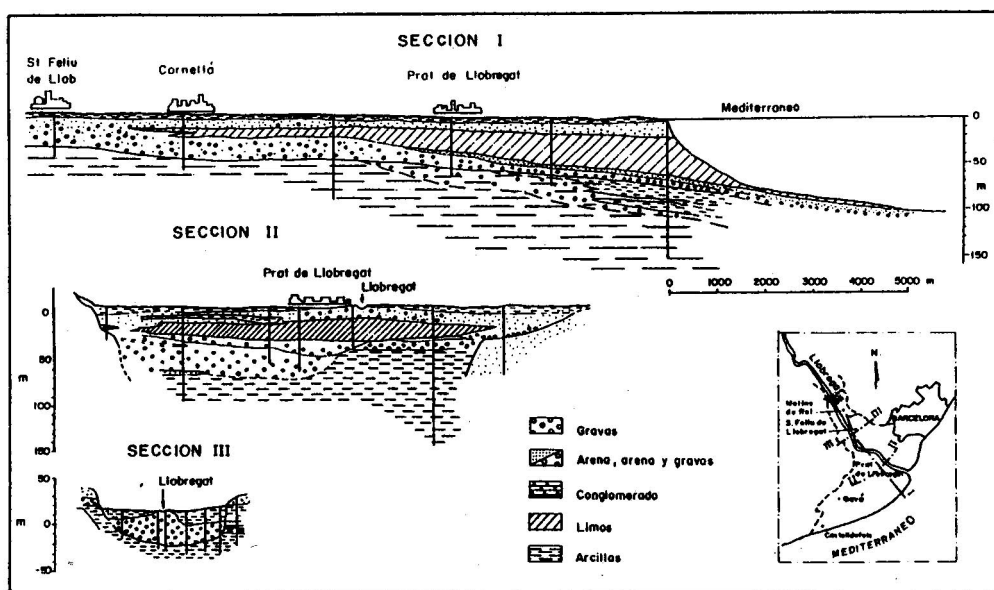


Figura 3. Secciones geológicas simplificadas del sistema acuífero del Bajo Llobregat, modificado de Custodio et al., (1971) y de Manzano et al. (1986-87).

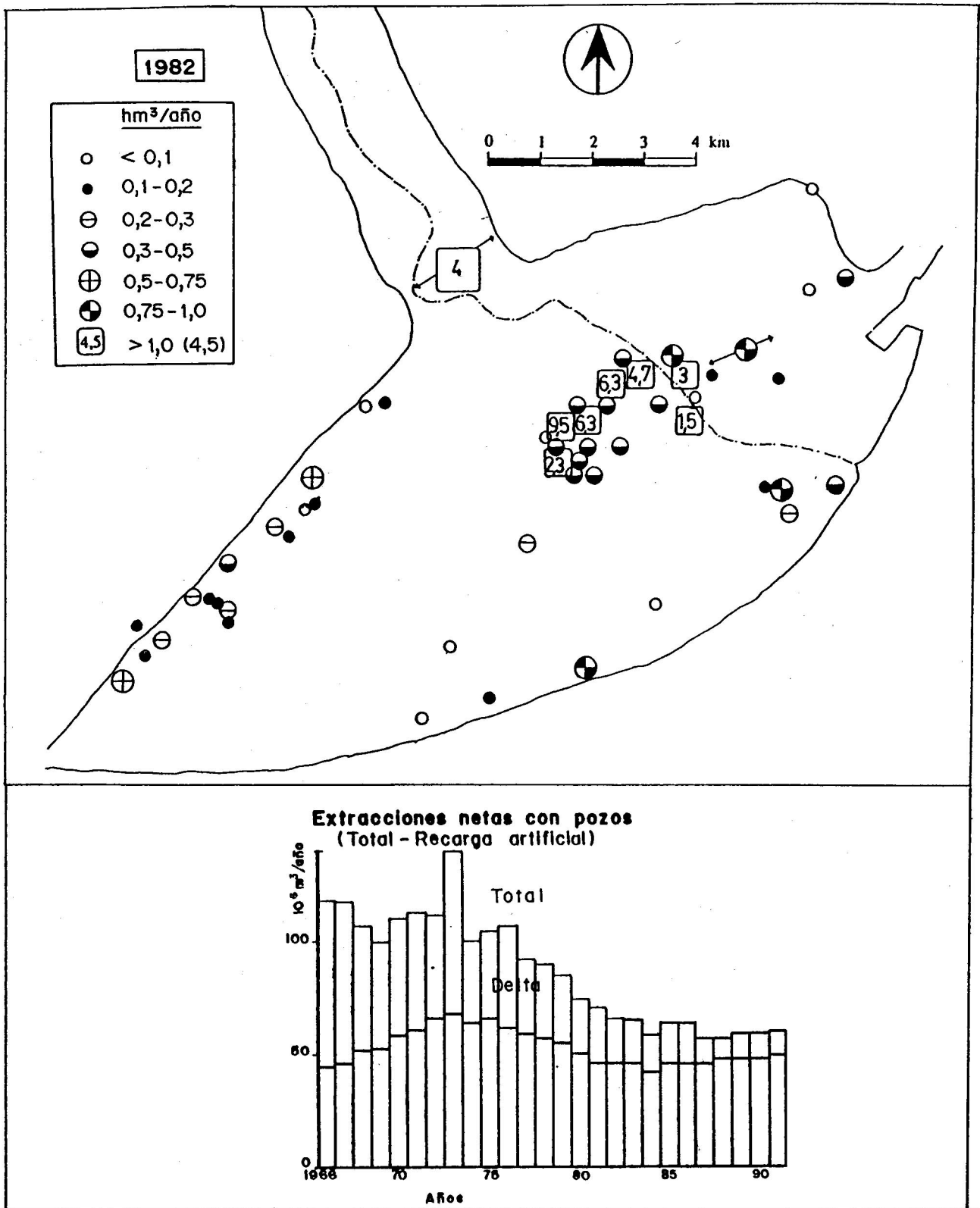


Figura 4. Extracciones de agua subterránea en 1982, en $\text{hm}^3/\text{año}$, en el acuífero profundo del delta del Llobregat, sin incluir el valle bajo. El gráfico muestra la evolución de las extracciones, según Iribar y Custodio (1992)

durante el desarrollo. El cierre superior se forma naturalmente por la plasticidad de los materiales del acuitardo cuando se perfora a percusión con avance mediante cuchara y tubería final hincada. La transmisividad del acuífero cautivo del delta y del acuífero libre del valle bajo puede variar entre 5000 y 30 000 m²/día con permeabilidades de 200 a 1000 m/día. Los pozos suelen tener capacidades de más de 50 l/s, hasta 400 l/s.

Una diferencia importante con Mar del Plata es la existencia en el caso del Bajo Llobregat, del río Llobregat, que discurre sobre el valle bajo y la parte superior del delta, colgado sobre el nivel freático a causa de los descensos provocados por la explotación y de la existencia de sedimentos finos en el cauce, que solo se remueven en crecidas del río, aunque cada vez menores y menos frecuentes a causa de las obras hidráulicas aguas arriba. Es un elemento esencial de recarga (Vilaró, 1967; Custodio, 1994), mientras que en Mar del Plata el papel esencial lo juega la precipitación local.

También en Mar del Plata el agua subterránea captada se usa en el territorio del propio acuífero, aunque hay un transporte interno importante. En el caso del Llobregat, además de los usos locales hay ocasionalmente una importante exportación de agua subterránea al Llano de Barcelona, que es un sistema hidrogeológico diferente.

PROBLEMAS LIGADOS A LA EXPLOTACIÓN: EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y PROBLEMAS ACTUALES

La explotación del acuífero de Mar del Plata para abastecimiento urbano se inició hacia 1913 con pozos dentro y en el entorno del centro de la ciudad y fue ampliándose progresivamente, a medida que la demanda crecía. Inicialmente el agua era de buena calidad y adecuada al suministro de población. El crecimiento de la explotación para usos urbanos supone extender los pozos por las zonas agrícolas y ganaderas circundantes de modo que el crecimiento de uno va en detrimento del otro (Ruíz Huidobro y Tófaló, 1971; Ferrante et al., 1987). La interferencia se magnifica en los pozos rurales someros, muchos de ellos dotados de un aeromotor. En numerosas ocasiones han tenido que ser reprofundizados para seguir llegando al nivel freático.

La extracción relativamente concentrada en áreas próximas al litoral - y quizás también a fracturas en la cuarcitas - produjo un progresivo frente de salinización en respuesta a la notable depresión piezométrica (Figuras 5 y 6).

Como consecuencia se fueron abandonando las captaciones afectadas, en su mayoría en el casco antiguo de

la ciudad, substituyéndolas por otras más hacia la periferia, y luego, a partir de 1968, a lo largo de 10 km de la ruta Mar del Plata-Buenos Aires. Hoy existen nuevos proyectos de extensión. Los problemas de salinidad se iniciaron en 1950 y alcanzaron su mayor expresión en 1970. Hasta el presente se han abandonado 37 pozos por esta causa. Cada abandono supone no sólo poner en explotación nuevas captaciones sino remodelar la red de distribución e impulsión y dejar de lado instalaciones.

Si bien la isopieza de elevación 0 m respecto al nivel medio del mar no señala la posición de equilibrio con el agua marina en un acuífero de 70 a 100 m de espesor, sino la de 2 a 2,5 m, sí que es indicativa del proceso de formación de un excesivo embudo regionalizado de depresión, que ha crecido desde un área de 15 km² y -10 m en 1950, a 90 km² y -23 m en 1969 y 120 km² y -19 m en 1985 (Bocanegra et al., 1993), según se muestra en la figura 7. El frente salino fue avanzando al ritmo de unos 150 m/año, penetrando 3,3 km en 1972, con un área salinizada de 15 km². El proceso de intrusión marina, si bien se ha moderado, no se ha detenido. Así, en los pozos próximos a la interfaz la salinidad continúa incrementándose lentamente. Aunque estos pozos no se usan en invierno, los menos afectados se explotan en verano para atender al incremento de demanda por la afluencia turística. El agua extraída se colecta en un depósito donde se mezcla con agua de buena calidad, para evitar así que el agua salina llegue directamente a los usuarios. Ello ha supuesto remodelaciones en la red primaria.

El balance hídrico depende del área de captación de los pozos y de la recarga en la misma. La progresiva urbanización ha eliminado grandes áreas de terreno para esta recarga y además la construcción de redes de alcantarillado en zonas de niveles freáticos altos puede suponer un aumento de las salidas del sistema por drenaje. Por otro lado, el descenso piezométrico ha llevado a que la línea principal de drenaje, el arroyo de la Tapera, haya pasado de ser ganador a ser perdedor en un largo tramo. Pero en las áreas urbanizadas se produce una recarga por fugas de la red de distribución y en cierto modo por la red de alcantarillado y de los pluviales cuando éstos entran en carga.

En las áreas con grandes depresiones piezométricas sostenidas a causa de las extracciones se ha edificado tomando como medio permanentemente no saturado lo que en realidad era una franja artificialmente drenada. Allí donde el bombeo ha cesado por salinización la recuperación hidrodinámica, ayudada por la recarga local urbana, ha vuelto a saturar toda o parte de esa zona, con los consiguientes problemas de subpresiones e inundaciones en sótanos, edificaciones subterráneas y alcantarillas, y de corrosión acelerada de estructuras metálicas si el agua es además salada o salina. Esta situación afecta en especial a edificios singulares construidos entre 1960 y 1970 en lugares en que la recuperación de niveles ha alcanzado 10 m. Es posible que existan problemas de aumento de caudal de colectores de aguas residuales y de los pluviales.

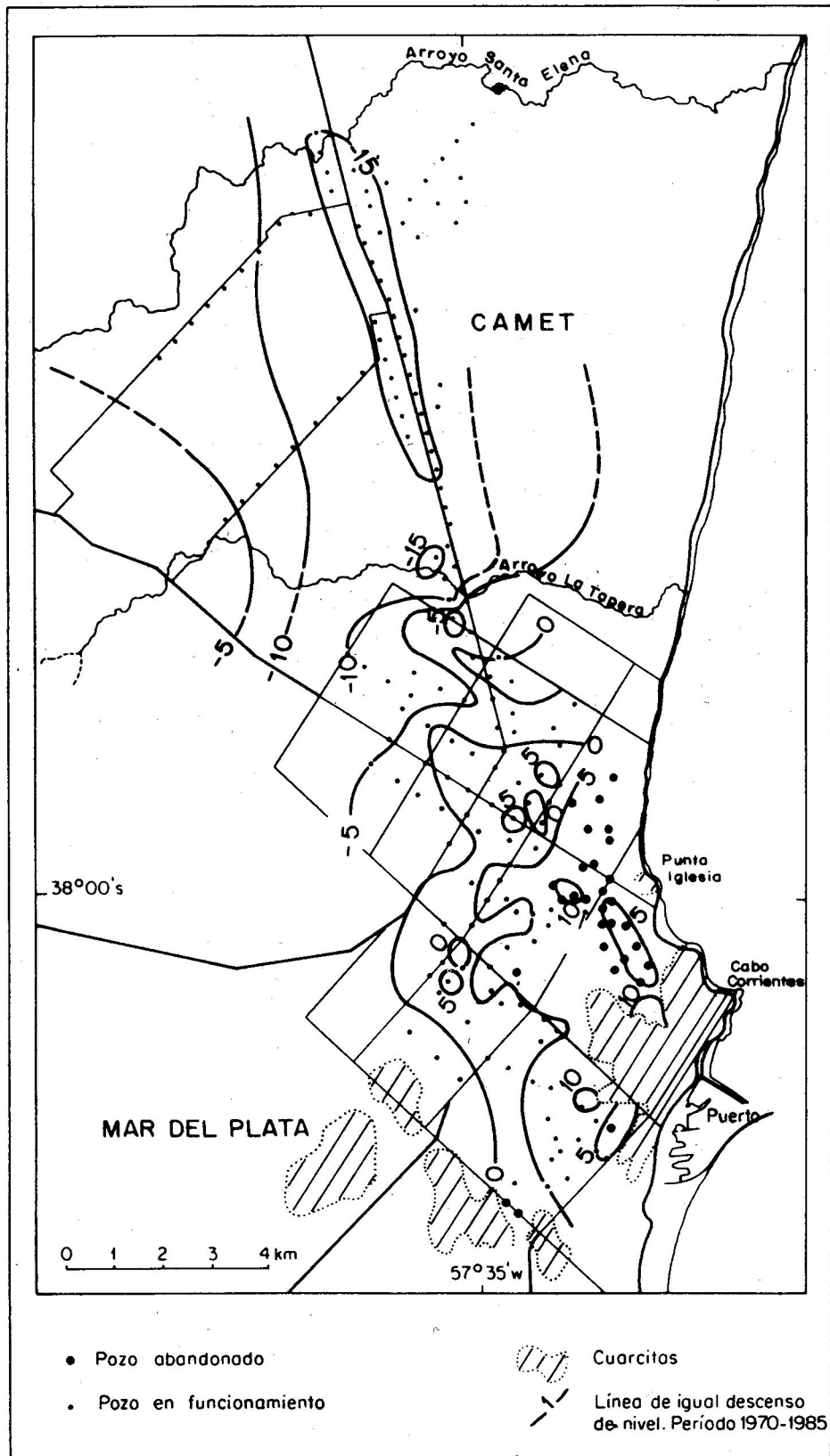


Figura 5. Descenso piezométrico en el acuífero de Mar del Plata en el periodo 1970-1985, según Bocanegra et al. (1993)

La situación en Barcelona tiene notables semejanzas en muchos aspectos. En el Bajo Besós, el casi total abandono de todas las extracciones por salinización o contaminación (Fig. 8) - y también por desplazamiento de las industrias singulares a causa de la progresiva urbanización - además de la pérdida de un acuífero importante ha supuesto una notable recuperación piezométrica - acelerada puntualmente en años húmedos - en áreas drenadas desde la década de 1950 (Custodio y Bayó, 1986). La consecuencia ha sido la

1000 mm/año - procedentes de fugas de la red de abastecimiento, y de aportes de antiguos torrentes y de la red de saneamiento. Todas las captaciones de abastecimiento han sido clausuradas por contaminación, incluyendo las numerosas minas de agua de la época romana y medieval, y sólo subsisten unas pocas para obtener agua de refrigeración en grandes locales comerciales y de servicios.

Gracias a esto y a la notable pendiente del llano (espesa zona no saturada en buena parte del mismo) y aumento del drenaje por la red de saneamiento - mal conocido - los problemas de anegamientos no son importantes, aunque los hay en ciertos tramos de las líneas de ferrocarriles subterráneos.

En el Bajo Llobregat, las primeras instalaciones para abastecimiento a Barcelona mediante transporte al llano de Barcelona datan de finales del siglo pasado

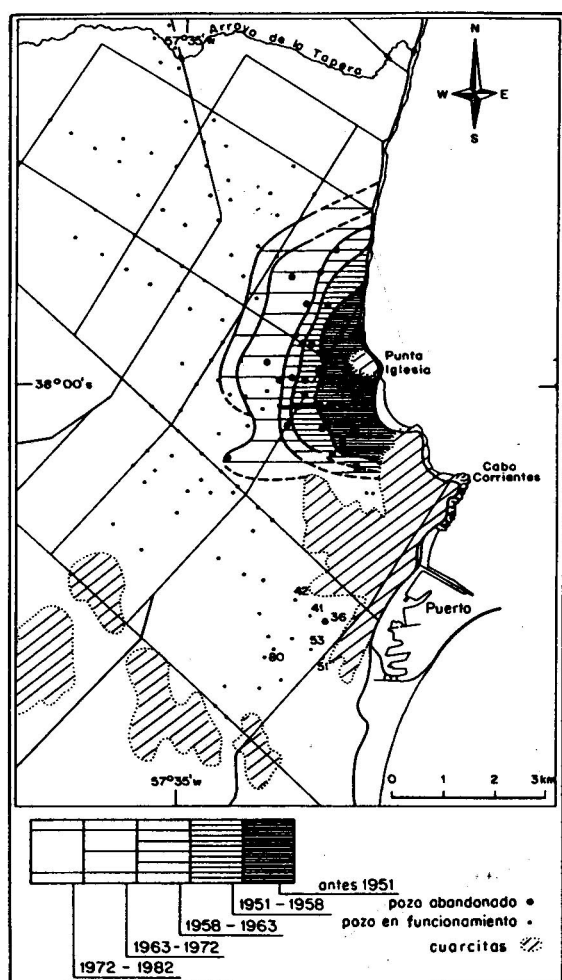


Figura 6. Avance del área salinizada en el área de Mar del Plata. Se centra alrededor del casco antiguo y luego se extiende hacia el puerto (según Bocanegra et al., 1993).

inundación de estacionamientos subterráneos y problemas crecientes en el túnel de una de las líneas de ferrocarril metropolitano que cruza el aluvial (Fig 9).

En el llano de Barcelona, a pesar de su casi total urbanización, la recarga se estima en más de 1 m³/s en una superficie de unos 30 km² - o sea más de

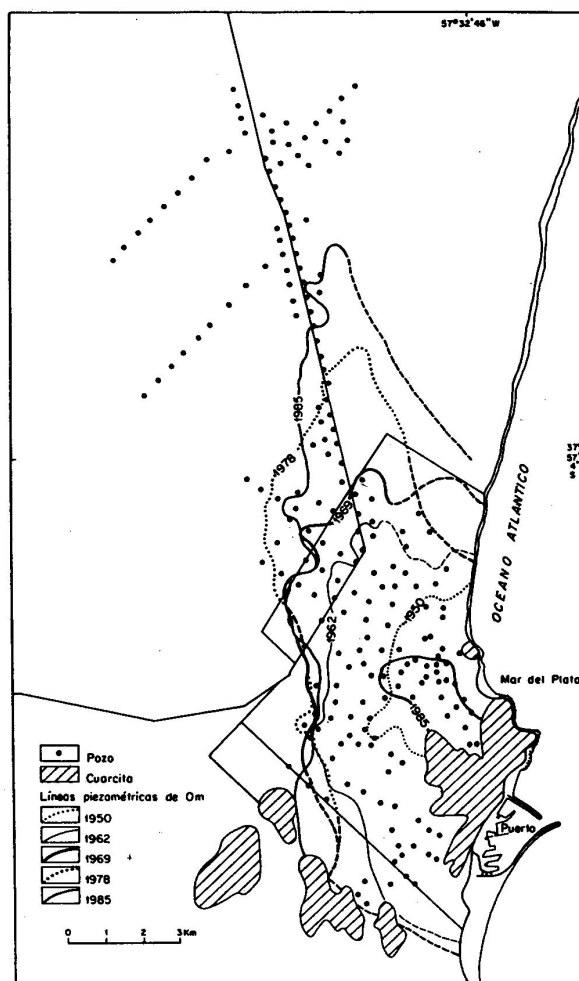


Figura 7. Evolución del área del acuífero de Mar del Plata en que los niveles piezométricos se sitúan bajo el nivel medio del mar en el periodo 1950-1985 (según Bocanegra et al., 1993).

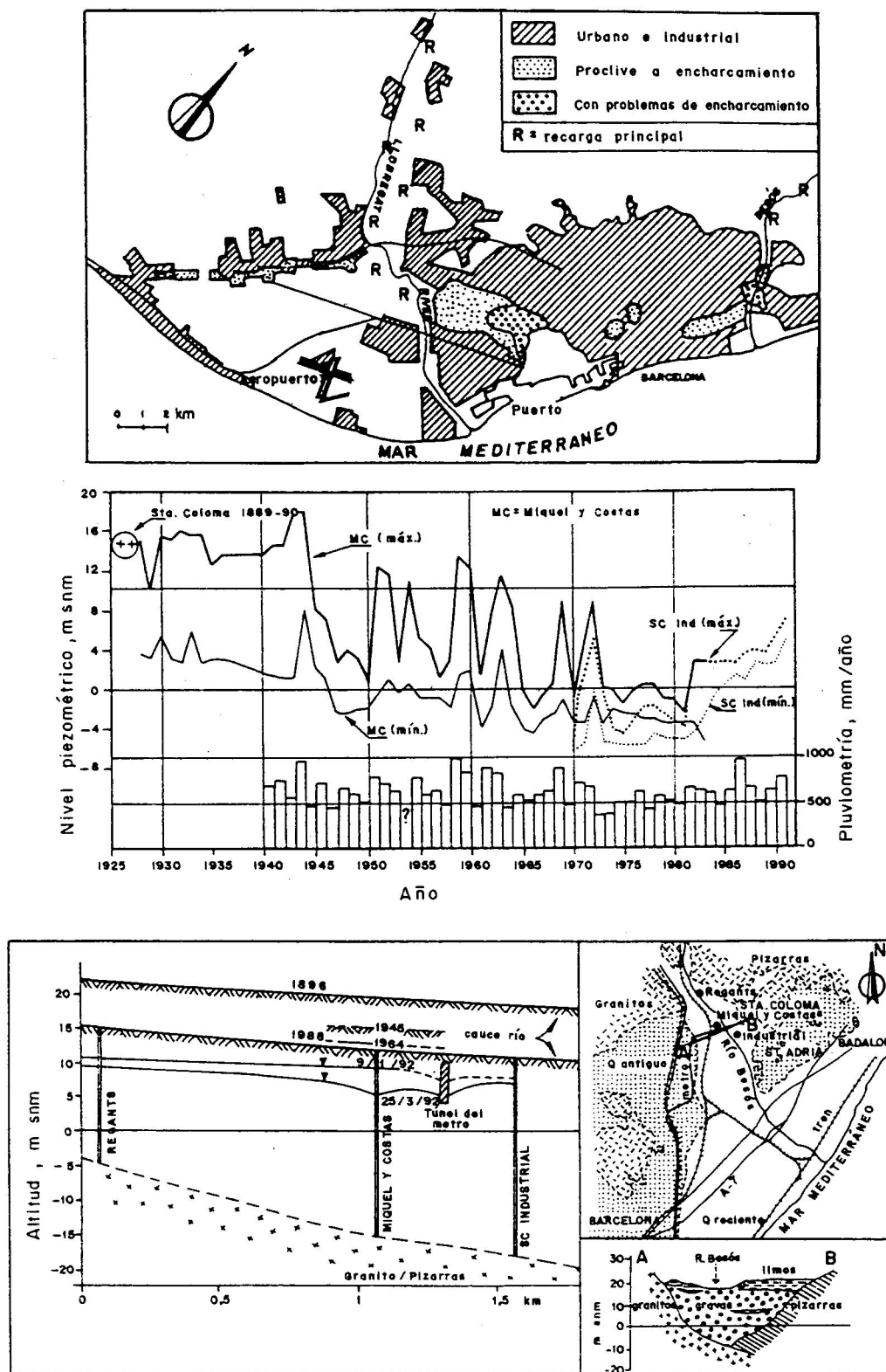


Figura 9. áreas afectadas por problemas de ascenso de niveles freáticos tras la reducción de extracciones de agua subterránea en la área Barcelonesa (según Custodio y Bayó, 1986) y detalle de la evolución freática y la afección al túnel del ferrocarril subterráneo (metro) que cruza el aluvial del río Besós, construido en la década de 1970 (según Badiella y Carrera, en Custodio, 1992).

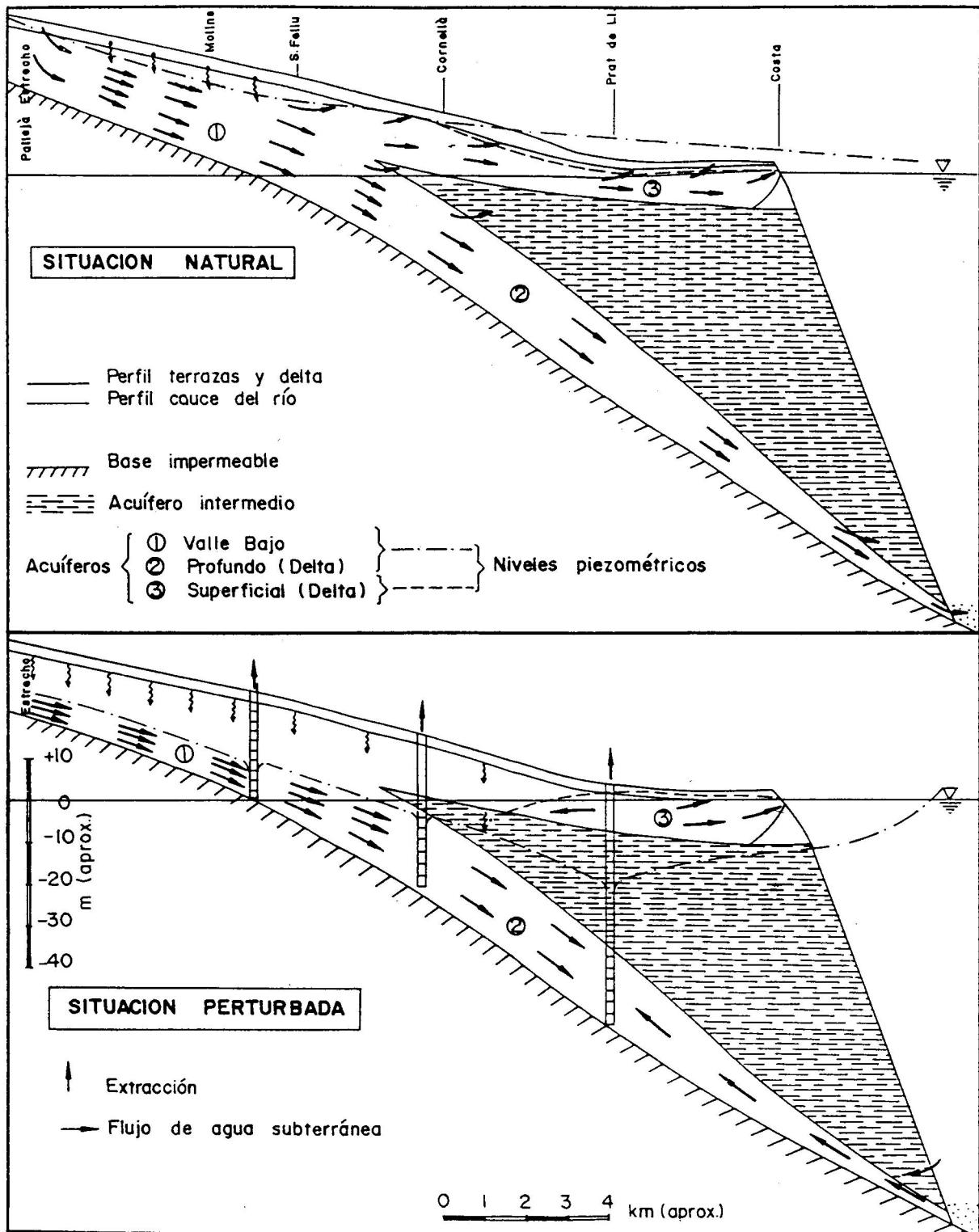


Figura 10. Representación esquemática del funcionamiento del sistema acuífero del Bajo Llobregat, en estado natural (antes de 1900) y en estado notablemente perturbado (después de 1960), según Custodio et al. (1992).

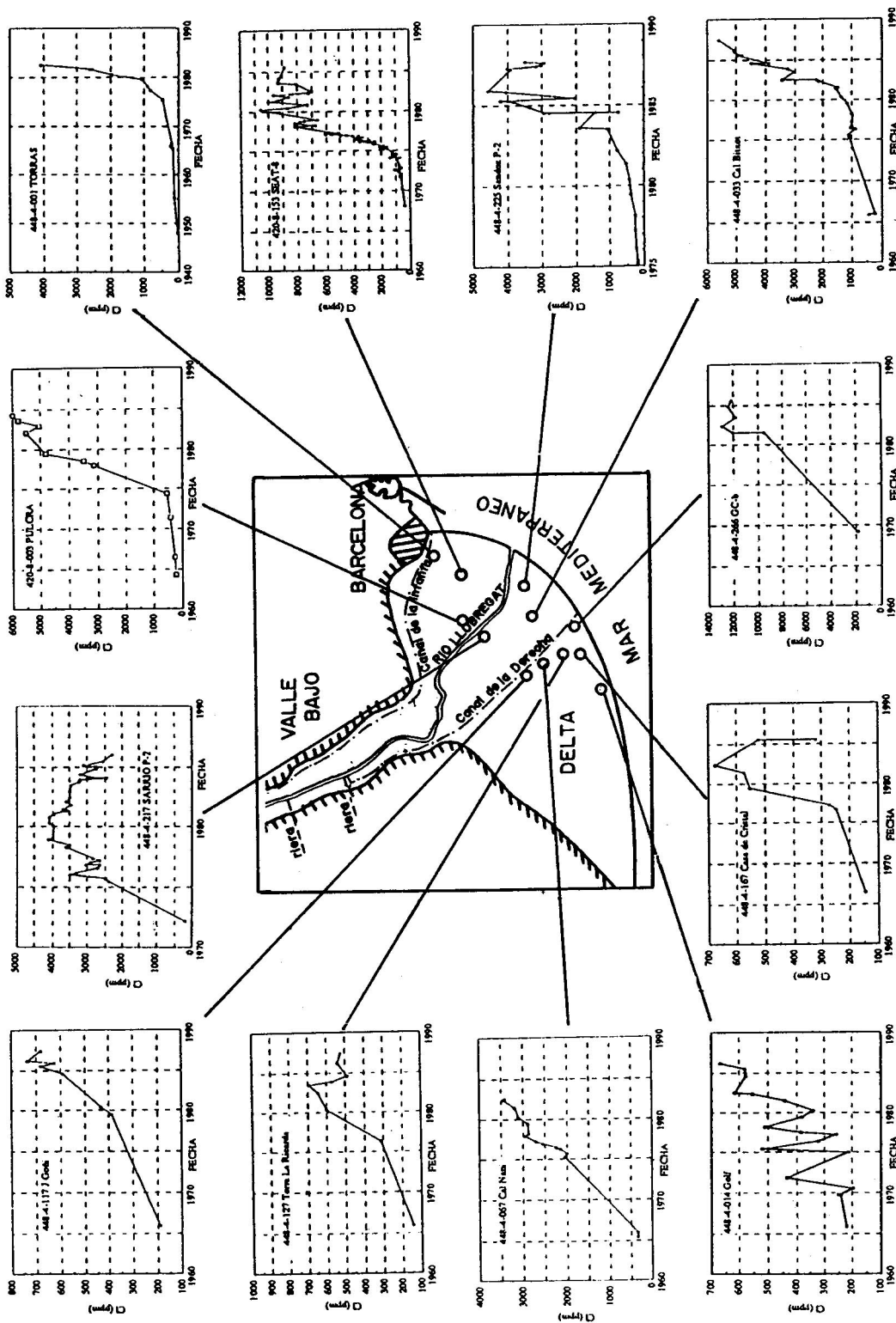


Figura 11. Evolución de la salinización en pozos profundos seleccionados del delta del Llobregat, según Custodio (1991). El proceso de intrusión marina se inició sistemáticamente a principios de la década de 1960. El retraso en la respuesta es la combinación de la distancia al afloramiento submarino o de la infiltración vertical donde no hay acuitardo intermedio, y del efecto protector de pozos más próximos a la costa, mientras estos estuvieron operativos.

y fueron pozos de gran diámetro construidos al final del valle bajo, en los que se instalaron las voluminosas maquinarias de elevación de la época, accionadas por máquinas de vapor (Custodio y Llamas, 1976; 1983). Al mismo tiempo, para el abastecimiento rural y de la población local, en el delta se hincaron numerosos pozos profundos surgentes de pequeño diámetro (Ferret, 1985; Santa María y Marin, 1910). La notable productividad de los pozos propició la instalación de industrias singulares, de gran demanda de agua - textil, papelera, fibras artificiales, química - ya desde el primer tercio del presente siglo, que en parte procedían de la reubicación y expansión de la industria instalada en el Besós. A principios de la década de 1970 se llegaron a extraer 120 hm³/año, aunque actualmente se extraen unos 5 hm³/año. El descenso es debido a la progresiva salinización del acuífero profundo, a importantes ahorros de consumo de agua por las industrias para reducir el coste del bombeo y no agravar los problemas existentes - resultado beneficioso de la existencia de la Comunidad de Usuarios - y también al desplazamiento hacia otras áreas alejadas de ciertas industrias por la presión urbanística o de medio ambiente, a cambios en tipo de industrias y a episodios de crisis económica. Como consecuencia se han clausurado instalaciones antiguas y obsoletas, precisamente las más demandantes de agua.

La intrusión marina es consecuencia directa de las extracciones de agua subterránea, como muestra esquemáticamente la Figura 10. Se ha ido produciendo con un cierto retraso ya que la penetración no se realiza por la línea de costa sino por el afloramiento submarino, que se produce entre 3 a 5 km mar adentro. La Figura 11 muestra la evolución de la salinización en algunos pozos seleccionados, con la serie de frentes de avance de la Figura 12. El hecho de no existir abastecimiento sustitutorio al no llegar las redes de distribución de agua regionales a números polígonos industriales, ha hecho persistir y aún persisten extracciones industriales de agua salina, principalmente para refrigeración. Esto impide la progresión hacia tierra adentro de la salinización en tanto que las bombes de agua salobre o salina próximos a la costa subsistan, ya que el potencial del agua salada es menor que el nivel del mar. Se ha observado claramente que el paro de extracciones por abandono de pozos al disponerse de un nuevo abastecimiento o cese de la actividad industrial produce un salto hacia delante de la penetración salina relativamente rápido.

Al igual que en Mar del Plata, no existe una cuffia marina definida sino un frente muy disperso a causa de heterogeneidad del medio - en el caso de Mar

delPlata favorecido por la recarga local - y de los efectos dinámicos a que está sometido el acuífero. En el acuífero profundo del delta del Llobregat la penetración progresa más deprisa por franjas preferenciales que corresponden a paleocauces pleistocenos o áreas marginales de sedimentación más grosera, dejando islas temporales de agua dulce o salobre en las formaciones menos permeables (arenas finas), que poco a poco se van salinizando a medida que sus reservas se consumen por las extracciones locales (Fig. 12).

El abastecimiento a Barcelona se realizó hasta 1954 sólo con aguas subterráneas, buena parte de ellas captadas en el área del Llobregat. La construcción de una gran instalación de potabilización del agua fluvial supuso el progresivo paso de la utilización de las captaciones de explotación en base a la explotación en punta y en emergencia. El sistema de abastecimiento es hoy complejo, con una potabilizadora adicional en el río Llobregat para las aguas reguladas con embalses de cabecera y con un acueducto que aduce

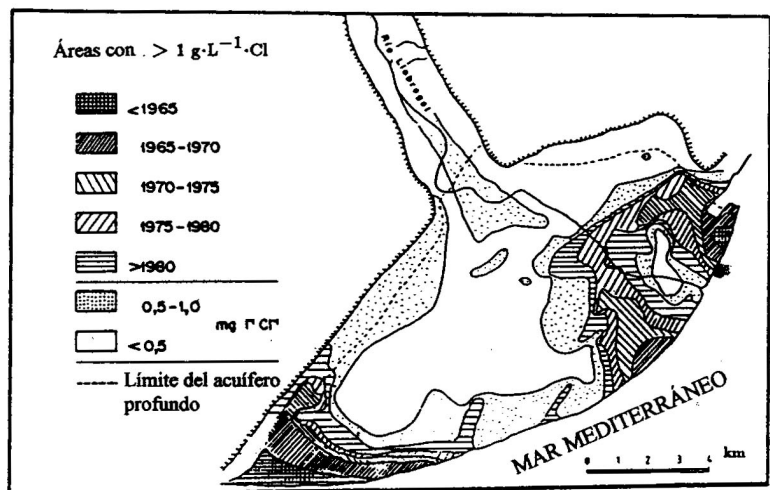


Figura 12. Avance de la salinización por el acuífero profundo del delta del Llobregat, según Iribar y Custodio (1992). En el sector centro-oriental se forman dos lenguas de penetración, una siguiendo el paleocauce tardipleistocénico y el otro el borde de sedimentación grosera adosado al límite montañoso costero, dejando entre ellos un área de renovación más lenta.

aguas del río Ter, situado casi 100 km al Norte. Las captaciones en el Besos están prácticamente abandonadas por salinización o sería contaminación industrial y por depósitos de residuos.

Los excedentes de agua tratada en la primera planta del Llobregat (Sant Joan Despí) se inyectan en el acuífero mediante una línea de pozos que admiten entre 50 y 100 l/s, y que pueden ser bombeados periódicamente para limpieza a caudales entre 200 y

400 l/s. Con ello y con prácticas cuidadosas de escarificado del lecho del río se aumenta la recarga del sistema acuífero, y por lo tanto las reservas (Custodio, 1986; Custodio et al., 1977, 1982; Miralles y Cantó, 1984).

La recarga del sistema acuífero procedente de la precipitación local es minoritaria. La mayor parte de la recarga son aguas fluviales que se infiltran en el cauce a través del medio no saturado - el nivel freático se mantiene bajo el nivel del río a causa de las extracciones permanentes, principalmente en el delta (Fig. 10) - o a lo largo del valle en los campos de regadío que usan canales que toman aguas fluviales y usadas río arriba. Los excedentes de riego son muy importantes (de 600 a 1000 mm/año) a causa de que el agua se utiliza por extensión, con periodos de encharcamiento para el control de hierbas y nemátodos, en vez del uso intensivo de productos químicos, lo cual es favorable para la calidad del agua subterránea. A lo largo del tiempo, la proporción de aguas fluviales que se infiltran en el cauce ha ido disminuyendo a causa de la construcción de un encauzamiento del río para proteger el área contra avenidas y de un número elevado de construcciones y vías de comunicación sobre el aluvial, de un exceso de extracciones de áridos del cauce -además poco controladas- de la disminución de crecidas por regulación aguas arriba mediante embalses, de la merma de caudales por derivaciones y de un progresivo aumento de la turbidez por vertidos insuficientemente depurados o sin depurar. Así la recarga por excedentes de riego ha adquirido mayor importancia y las aportaciones por la lluvia local es ahora relativamente mayor (Fig. 13).

Afortunadamente la disminución de la recarga ha ido en paralelo con los esfuerzos de ahorro de agua en el delta y con la recarga artificial. No obstante, hay momentos en que las reservas se ven muy mermadas y ciertas extracciones no pueden continuarse.

El papel de reserva del acuífero es esencial. El grueso del abastecimiento actual de agua a Barcelona son aguas superficiales, pero se producen fallos por sequía prolongada - aún con las obras de regulación superficiales existentes - por avería en las plantas de tratamiento y sobre todo por contaminación accidental de las aguas fluviales (vertidos incontrolados, accidentes en industrias o en vías de comunicación) que exceden la capacidad de tratamiento de las plantas de potabilización. En este caso el paro de la planta de tratamiento de las aguas fluviales se compensa en parte mediante la puesta en marcha de los pozos,

incluidos los de recarga, que son de funcionamiento dual. Así se pueden extraer entre 2 y 3 m³/s de agua potable - aunque con un exceso de dureza - durante varios días y aún durante varias semanas. El consumo de reservas del acuífero supone un descenso de los niveles freáticos en el valle bajo y de los niveles piezométricos en el acuífero profundo del delta.

El sistema puede soportar estos descensos sin más problemas que los de mayor coste de extracción y un cierto aumento de la salinidad de algunos pozos costeros, siempre y cuando la reserva utilizada se restituya en los meses siguientes. Este papel regulador en el mismo lugar en que se produce la demanda da un notable valor de oportunidad y estratégico al sistema acuífero.

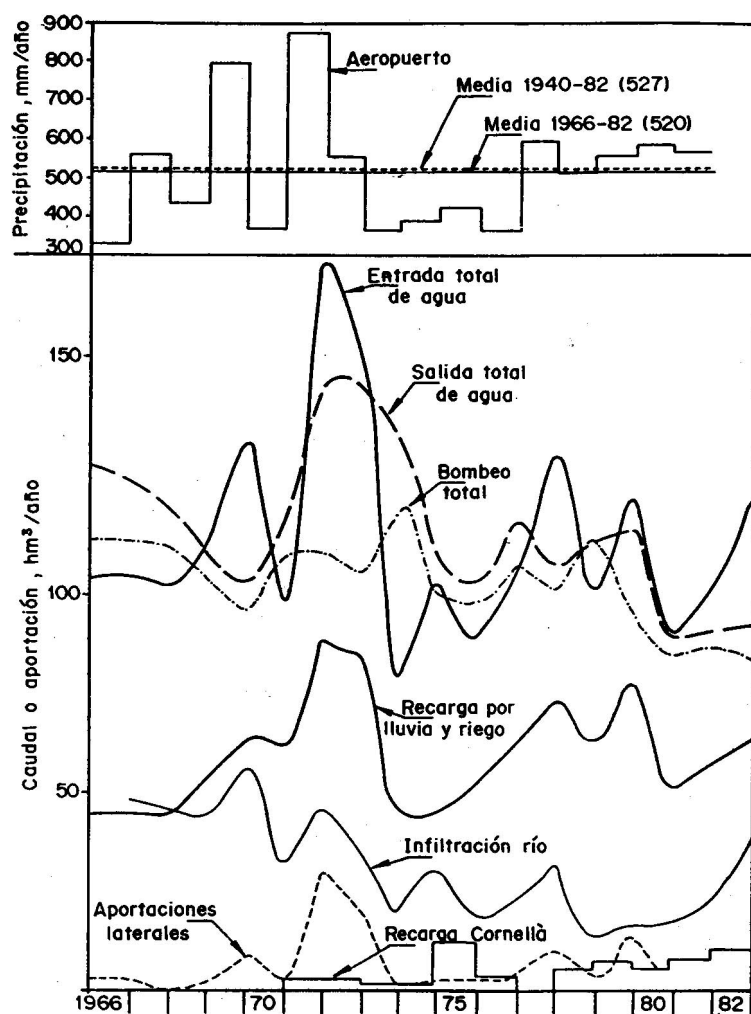


Figura 13. Evolución de los términos del balance de agua en el sistema acuífero del Bajo Llobregat según se deduce del ajuste de un modelo matemático de simulación del flujo realizado para el Plan Hidrológico del Pirineo Oriental (en Custodio, 1991).

CARACTERIZACIÓN DE LOS PROBLEMAS DE SALINIZACIÓN Y DE OTROS PROBLEMAS DE UTILIZACIÓN Y CALIDAD

Los problemas de salinización se caracterizan por el origen de la salinidad y por las modificaciones por reacciones en el seno del agua y con el medio sólido, en principio utilizando sustancias que no suelen ser afectadas por esas reacciones, tales como los iones cloruro y bromuro, o la composición isotópica del agua.

El agua marina y sus mezclas con aguas dulces continentales tienen composiciones y relaciones iónicas bien definidas. Otros orígenes de la salinidad del agua tales como evaporación intensa, disolución de sales evaporitas o incorporación de agua salinas, saladas o salmueras profundas suelen presentar características diferenciadas. Los cambios de salinidad y de composición del agua producen fenómenos de cambio

catiónico con la parte sorbida en el terreno, que suelen ser muy característicos (Custodio y Llamas, 1976, 1983; Custodio y Bruggeman, 1987). Así, la progresiva penetración de agua salina en un terreno antes ocupado por agua dulce continental va acompañada por un aumento de dureza (en general aumento de ión calcio) y una disminución de iones alcalinos, con un aumento de la relación Na/K. Por el contrario, el progresivo desplazamiento del agua marina de unos sedimentos produce un agua cada vez menos salobre (a medida que el agua salina atrapada en poros semi-cerrados, microfisuras y bloques entre grietas va siendo diluida). En ella el ión calcio ha disminuido y el sodio aumentado respecto a lo que corresponde a la mezcla teórica (en sistema cerrado), además de disminuir la relación Na/K, aumentar el pH y, en terreno carbonático, incrementarse la cantidad de carbono inorgánico disuelto. El cambio de salinidad puede hacer disminuir la permeabilidad por defloculación de arcillas, al menos temporalmente.

Estos cambios y otros son modelables geoquímicamente y por lo tanto cuantificables, aunque en muchos casos un estudio cualitativo acompañado de algunas evaluaciones semicuantitativas bastan para caracterizar adecuadamente la situación y su evolución

En el acuífero de Mar del Plata el proceso de salinización se encaja bien con el de dilución de agua marina con agua dulce en un medio oxidante (conservador del ión SO_4^-), y se aprecia un claro endurecimiento del agua, lo que caracteriza que la salinidad (o el grado de mezcla) ha sufrido un proceso de crecimiento a lo largo del tiempo. No obstante, en el sector sur se producen situaciones químicas anómalas, con exceso de SO_4^- , y Mg^{++} , que apuntan a que a la penetración marina se suma otro proceso asociable a la removilización de agua salina preexistente. Tales pueden ser aguas del Mioceno, en un acuífero con cierto grado de aislamiento del resto al constituir una fosa local en el zócalo de cuarcitas (Bocanegra et al., 1993). El fondo regional del contenido en cloruro oscila entre 80 y 120 mg/L. Si bien en general los pozos fueron separados del servicio en continuo al producir agua con 700 mg/L de Cl^- , se considera que el proceso de salinización se produjo cuando aparecía un punto de inflexión en la evolución temporal de la salinidad. En algunos casos se llegó a 6000 mg/L de Cl^- , con tasas de incremento de 2000 mg/L por año.

Una causa adicional de degradación que afecta a todo el acuífero es la acumulación de nitratos. Su origen es en parte de aguas residuales urbanas, pero en también es la consecuencia de las prácticas agrícolas actuales en la parte no urbanizada de la superficie del territorio sobre el acuífero y también del lixiviado del nitrato almacenado en el medio no saturado bajo anteriores terrenos agrícolas, que hoy son zona urbana. El agua que extraen los pozos de abastecimiento, muy penetrantes

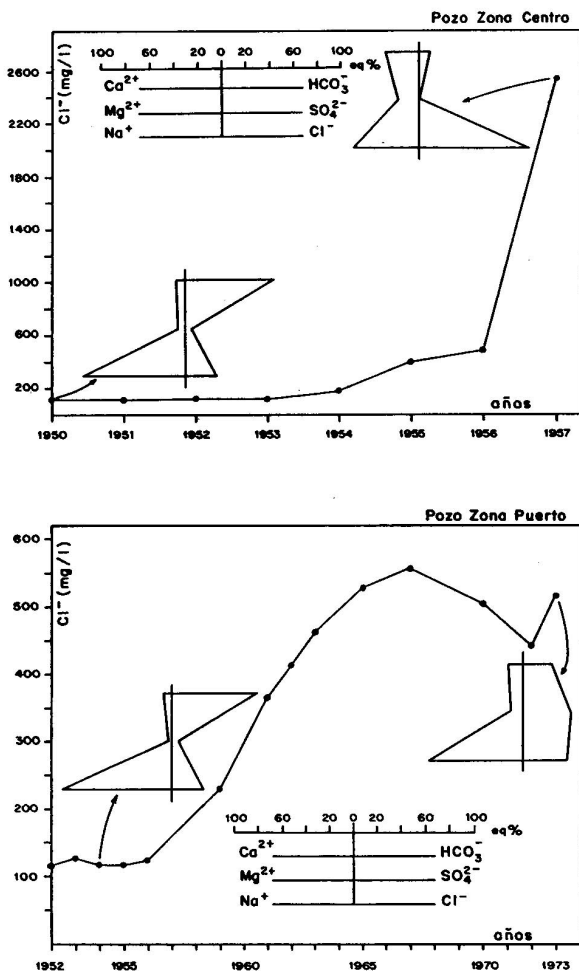


Figura 14. Evolución del contenido en Cl^- y diagramas modificados de Stiff del pozo 12 (Zona Centro) y del pozo 51 (Zona Puerto) en Mar del Plata.

y cementados en su parte alta, es la mezcla de las aguas subterráneas que llegan a lo largo de los filtros. El contenido en nitratos refleja así la mezcla de aguas menos profundas, potencialmente afectadas por recarga reciente, y las más profundas, libres de cantidades importantes de nitratos por ser anteriores a la ocupación humana intensiva. El fondo natural se sitúa entre 10 y 15 mg/L NO₃. Actualmente algunos pozos llegan a producir mezclas con 170 mg/L NO₃. A medida que transcurre el tiempo la proporción de aguas de recarga reciente aumenta y así lo hace el contenido en nitratos, a menos que se reduzcan anaerobicamente, lo cual no parece suceder a escala regional.

Las aguas de recarga no están aún hidrogeoquímicamente caracterizadas a través de estudios del medio no saturado y por eso no es posible deducir cual es nivel de NO₃ alcanzable, de persistir las condiciones actuales. Hasta la fecha se han abandonado 8 pozos conectados directamente a la red por excesivo contenido de

nitratos. Muchos otros con contenido elevado siguen en explotación ya que la mezcla con agua de otros pozos permite una calidad de suministro adecuada.

También en Barcelona las aguas salinas y salobres extraídas por pozos que se han salinizado muestran el característico endurecimiento, tanto en el Besós como en el Llobregat. El hecho de tratarse de acuíferos cautivos con materiales ricos en materia orgánica a techo pueden llegar a producir fenómenos de reducción de sulfates y/o disolución del ión ferroso, como en el delta del Besós y localmente en el delta del Llobregat (Custodio, 1967, 1968). En este último delta, junto a las áreas de aumento de salinidad con aguas afectadas por cambio iónico de endurecimiento, típico de la penetración marina, existían, y en algún caso aún subsisten, áreas con aguas dulces y salobres en las que el proceso es el contrario, es decir de ablandamiento, con aumento de iones alcalinos. Se trata de las zonas menos permeables, que aún muestran el proceso de lavado a que han estado sometidas desde la formación del delta (Custodio, 1981, 1987;

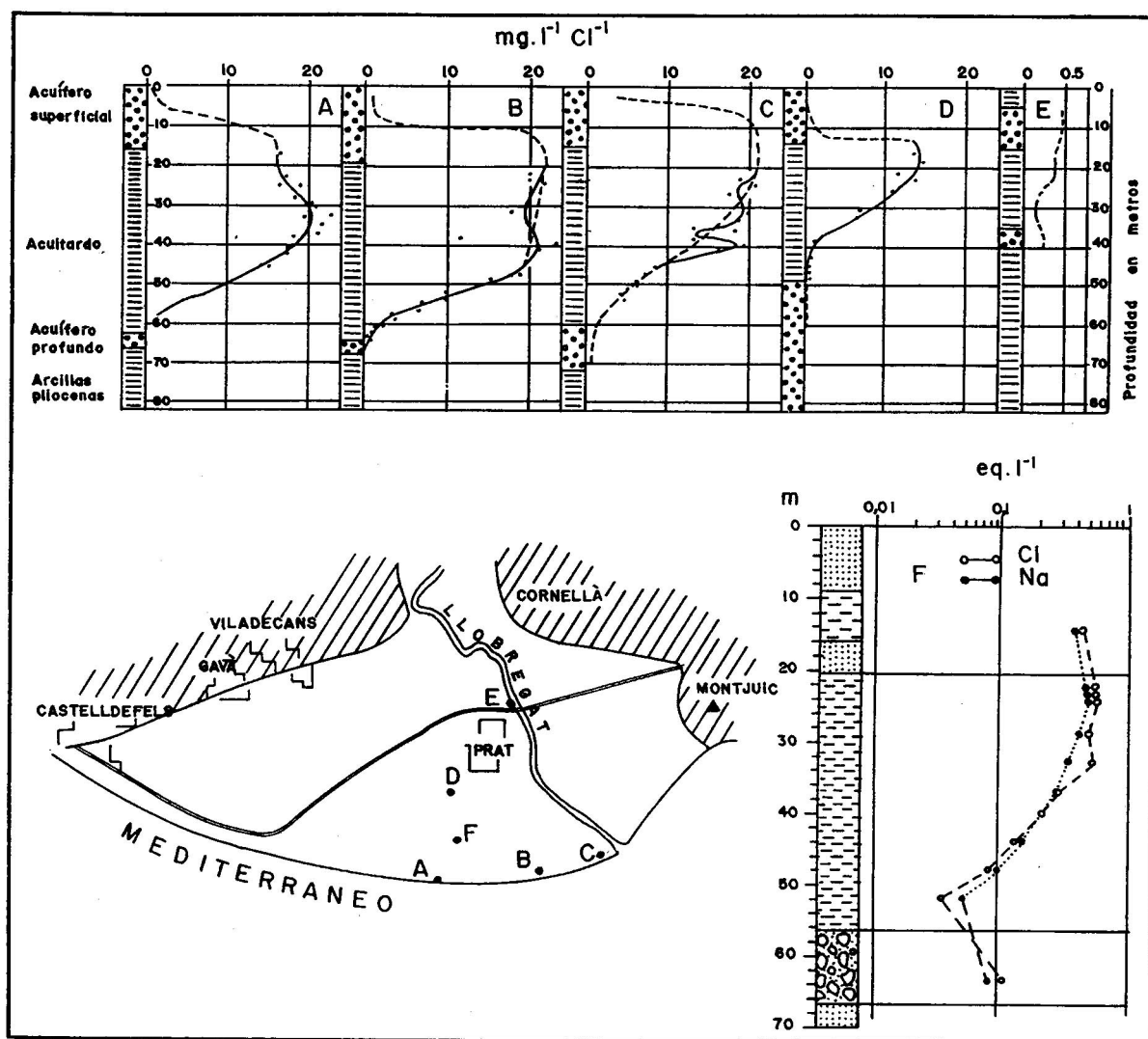


Figura 15. Salinidad residual en el acuífero intermedio del delta del Llobregat (Custodio et al. 1971; Manzano et al., 1992).

Iribar y Custodio, 1992).

El movimiento vertical del agua en el acuitardo intermedio ha sido estudiado con detalle y simulado (Manzano, 1991; Manzano et al., 1993). En buena parte contiene todavía agua marina de formación (de unos 8000 años de edad) que está en proceso de expulsión por desplazamiento del agua del acuífero profundo hacia el superior, siguiendo el gradiente piezométrico vertical no perturbado (Fig. 15). Por lo tanto no ha sido una vía de salinización, ni tampoco de otro tipo de contaminación, lo cual se corrobora con los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales (Custodio et al., 1992). Pero el cambio de sentido del gradiente vertical a causa de la explotación durante los últimos 40 años ha invertido fuertemente el movimiento y es posible justificar un desplazamiento vertical descendente cerca de la costa de 1 a 2 m, frente a los 10 m ascendentes del periodo en estado no perturbado (Manzano et al.1993).

En las áreas marginales del delta, donde no se han depositado los limos, sino arenas finas y medias, el acuitardo presenta una pequeña resistencia vertical, y el flujo vertical es mucho más rápido. Ello permite que en la situación actual de notables gradientes hidráulicos verticales descendentes mantenidos por las extracciones de aguas subterráneas, en esos pozos marginales el agua contaminada o salina del acuífero superior pueda pasar con facilidad al acuífero profundo. Esto es especialmente significativo para la contaminación por actividades agrícolas y contaminantes industriales, y explica la existencia de aguas salinas muy sulfatadas y bicarbonatadas, con muy alto

contenido en nitratos a causa de la infiltración de los excedentes de riego en campos agrícolas regados con agua subterránealocal (Custodio, 1966, 1968, 1982). Al pasar al acuífero confinado los nitratos son reducidos por la materia orgánica presente en el medio. Se conocen fuertes contaminaciones locales de cromatos y boro a causa de actividades y vertidos industriales (Candela et al., 1981; Custodio, 1993), y su número es creciente. La existencia de pozos con corrosiones en

el tubo metálico, en operación o abandonados, puede ser una importante causa de contaminación al permitir el paso de agua del acuífero superior al profundo.

En el área principal de recarga, en el valle bajo, la contaminación principal es la mineral del río (Fig. 16), sobre todo a causa de los vertidos de las minas de sales potásicas existentes en la cuenca media (Díaz et al., 1978).

El río lleva relativamente poco nitrógeno convertible en nitrato, pero la recarga por excedentes de riego, a pesar de ser muy elevada, aporta concentraciones próximas a los límites del agua potable, y más aún ciertos aportes laterales.

Al pasar el acuífero de libre a cautivo buena parte del nitrato es reducido. No existen estudios de detalle de los procesos hidrogeoquímicos involucrados. La progresiva sustitución del agua del río que se recarga directamente en el cauce por agua fluvial o residual en los campos de cultivo (Custodio, 1992, 1993, 1994) lleva no sólo a un progresivo aumento de la dureza del agua subterránea (Fig. 17). La notable contaminación fluvial, sobre todo en el Besós, y los depósitos y enterramientos de residuos,

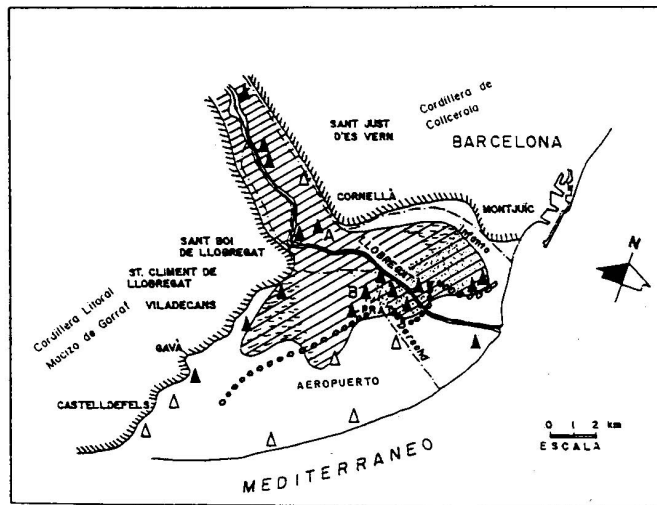
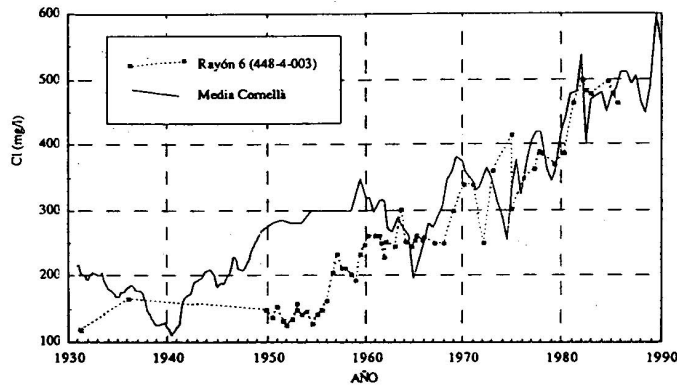


Figura 16. Evolución de la salinidad en los pozos del valle bajo del Llobregat y en el acuífero cautivo en el centro del delta a causa de la salinidad del agua del río Llobregat ocasionada por lixiviados de sales y vertidos salinos en su cuenca media. La figura inferior muestra hasta donde ha penetrado dicha salinidad en el acuífero cautivo del delta. Su penetración está limitada a la posición de la máxima depresión piezométrica (línea de círculos).

son causas de serias contaminaciones locales (Navarro et al., 1992; Subirana y Casas, 1985) así como el rápido lavado de vertidos líquidos salinos acumulados en el medio no saturado (Custodio y Galofré, 1987).

Tanto en Mar del Plata como en Barcelona la amenaza de contaminación de hidrocarburos por estaciones de servicio es un hecho, con varios pozos afectados en Mar del Plata. Un vertido accidental de un oleoducto en el valle bajo del Llobregat causó en 1991 y 1992 un serio problema, aún no del todo controlado, y que ha causado importantes costes. Para diseñar el modo de controlar la expansión de la contaminación por el medio saturado se realizó un modelo de transporte de masa (Sánchez-Vila et al., 1994), y las autoridades contrataron la limpieza parcial por arrastre por aire de la gasolina detenida en los 15 m de medio no saturado. Se han detectado otras contaminaciones de hidrocarburos y de disolventes orgánicos clorados, una de las cuales amenaza a una de las áreas principales de extracción de agua subterránea.

BASES PARA LA CORRECCIÓN, CONSERVACIÓN Y GESTIÓN

Tanto los acuíferos de Mar del Plata - única fuente significativa de agua a parte de la posible, controvertida y medioambientalmente poco clara captación y traída de agua de una cuenca interior (Laguna de los Padres) - como los de Barcelona, en especial el

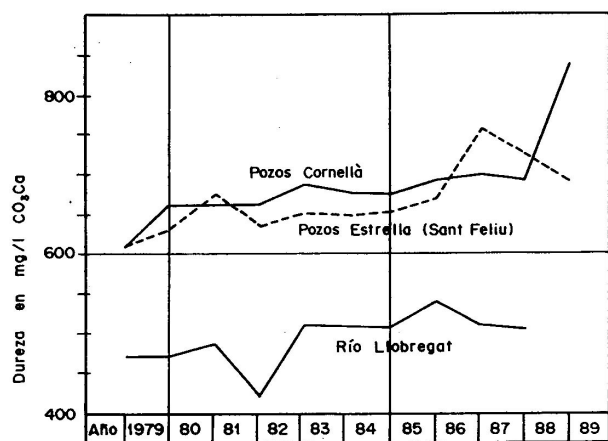


Figura 17. Evolución de la dureza del agua del río Llobregat y la correspondiente a dos grupos de pozos de abastecimiento en el valle bajo. El incremento normal es debido a la disolución de carbonatos del terreno durante la recarga con excedentes de riego, que toman CO₂ del suelo. A partir de 1988 el problema se agrava a causa de incorporación de aguas usadas a uno de los canales de riego.

sistema del Bajo Llobregat - fuente de abastecimiento local e industrial, y reserva de emergencia - son piezas esenciales del abastecimiento de agua y por lo tanto con un alto interés económico y social. Además ya existen, sus infraestructuras de aprovechamiento y distribución están disponibles y operativas, y están situados junto a la demanda. Eso les da una enorme ventaja frente a posibles fuentes alternativas de agua y de regulación, si es que razonablemente existen tras un análisis desapasionado y que considere el valor económico, la oportunidad y el interés social. Como primera evaluación del coste de sustitución del sistema acuífero del Bajo Llobregat se da la cifra de 250 millones de ECUs (Miralles, com. pers.).

Esto y la situación junto a dos importantes núcleos urbanos costeros hace que haya numerosas similitudes, a pesar de las diferencias físicas e hidrogeológicas. Si bien es cierto que la utilización intensiva del agua subterránea y del territorio es fuente de numerosos problemas y causa de degradación, no lo es menos que esos problemas tienen soluciones. En general se aduce que esas soluciones pueden ser técnicamente complejas, económicamente caras, administrativamente difíciles y políticamente difíciles de aprobar y sustentar, pero esto es algo común a cualquier actuación, como un gran embalse y sus canales de transporte, una gran depuradora de agua o una gran planta de desalinización de agua marina. Un análisis de detalle con frecuencia muestra que las dificultades son menores para los acuíferos. Muchas veces las dificultades que se aducen en realidad se derivan de la falta de conocimientos sobre las aguas subterráneas y sobre el acuífero, de la falta de voluntad política y del deslumbramiento ante obras espectaculares y muy costosas - muchas veces poco eficientes - cuando no se entre-mezcla además la corrupción, y de la falta de métodos adecuados de comunicación y participación social.

Así las bases para la corrección, conservación y gestión de un sistema acuífero gravitan sobre:

- tener un buen conocimiento hidrogeológico, acorde al grado de explotación que se haga del mismo
- disponer de herramientas para el análisis cuantitativo de las actuaciones de gestión, desarrollo y protección, en general modelos numéricos de flujo y - en el caso de un acuífero costero y con afección por uso intensivo del territorio - de transporte de masa para los componentes más significativos, por ejemplo salinidad y nitratos. Estos modelos no son necesariamente complicados y en ocasiones pueden reducirse en primeros tanteos a simples balances y cálculos elementales
- establecer, operar y mantener una red de observación del acuífero que comprenda cantidad de agua extraída y recargada, niveles piezométricos y composición química

- poner a disposición de las personas y organismos interesados los datos disponibles
- implementar una legislación y normativa adecuada sobre el agua y sobre la ordenación del territorio, aceptada por las fuerzas políticas y la población, con medios para aplicarla y para hacer respetar las disposiciones sobre áreas de protección que sea razonable establecer
- elaborar un sistema de obtención de recursos económicos para atender a los gastos de estudio, operación y mantenimiento, así como para cubrir las compensaciones razonables y a causa de daños desproporcionados, tanto en base a la imposición general, como por tasación específica sobre los beneficiados directos
- permitir la efectiva participación de los usuarios en las tareas de gestión, control y observación
- tener la voluntad política de preservar y lograr el uso sostenible de los recursos de aguas existentes
- establecer un sistema de información al público que sea objetivo y claro
- utilizar especialistas en la resolución de conflictos
- llegar a un sistema administrativo eficaz y rápido y, si para dirimir pleitos hay que llegar a los tribunales, que estos estén técnicamente bien asesorados y que su actuación sea rápida.

Obras Santiarias ha realizado la observación del acuífero de Mar del Plata desde hace varias décadas en el área de su interés inmediato, para el conocimiento de sus propias captaciones (niveles, composición química, extracciones), pero apenas hay observaciones de niveles freáticos y de otras porciones del acuífero hasta épocas muy recientes, y aún son parciales. En parte es a causa de la especialización de la empresa y en parte a dificultades y conflictos de competencia con otros usuarios.

En los últimos tiempos la Universidad Nacional de Mar del Plata está relevando sectores importantes del acuífero, lo que extiende el ámbito de observación. Los estudios específicos sobre el flujo del agua en el acuífero y en la zona no saturada son aún escasos y parciales, o estan en inicio.

En el sistema acuífero del Bajo Llobregat existe una red piezométrica independiente de los pozos de explotación, establecida, operada y mantenida desde 1966 por lo que es hoy Junta de Aguas de Cataluña. Además la empresa de abastecimiento de agua a Barcelona opera desde 1950 una red en su área de interés, además del control de sus propias captaciones.

También la Comunidad de Usuarios de Agua Subterránea del Bajo Llobregat mide diversos pozos y realiza campañas periódicas de control de la salinidad en el delta desde 1982. Todos esos organismos y la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea han llevado a cabo estudios específicos sobre el origen y movimiento del agua subterránea y de contaminación, que permiten un razonable conocimiento del funiconamiento, aunque a nivel de detalle aún quedan numerosos objetivos por cubrir.

En cuanto a los esfuerzos de conocimiento cuantitativo del sistema acuífero, en Mar del Plata se han hecho diversos intentos de modelación del flujo estacionario en un sector del acuífero (Fasano y Bocanegra, 1989; Fasano et al., 1989) y recientemente se ha realizado un nuevo modelo de simulación en régimen transitorio en toda el área de captación (Bocanegra y Benavente, 1994), entre 1920 (inicios de la explotación) y 1969 (máxima depresión en el área urbana).

Los resultados de la modelación contratados con los valores medios entre 1950 (comienzo del registro continuo de niveles piezométricos) y 1969 se muestran en la Fig. 18. El modelo ajusta razonablemente a los valores observados. El mayor problema lo constituye la falta de límites naturales próximos del área a cubrir y la incertidumbre de los parámetros hidrogeológicos y de los datos de explotación. Se está completando la simulación del período posterior hasta la actualidad, en el que se han producido importantes descensos en el área rural y recuperaciones en el casco urbano. Se ha iniciado la simulación del transporte de salinidad. La información procede de las observaciones que realiza la propia empresa de abastecimiento en sus pozos y de observaciones rutinarias ambientales.

En Barcelona, y concretamente en el Delta del Llobregat, tras un modelo analógico bicapa preliminar de capacidades y resistencia (Anguita, 1971), se estableció un primer modelo matemático de flujo bicapa con elementos poligonales (Cuena y Custodio, 1971; Custodio et al., 1971), seguido de otro de malla rectangular tipo MODFLOW en 1980 dentro de los estudios para el Plan Hidrológico de las Cuencas del Pirineo Oriental. Posteriormente se ha incorporado el transporte de salinidad en un modelo tipo MOC (Custodio et al., 1989) y luego con mucho más detalle en otro basado en el modelo TRANSIN (Iribar et al., 1992), del que se extrae la información de las Figuras 19 y 20.

Los esfuerzos de gestión son más difíciles y sus resultados menos espectaculares, aunque la acumulación de actuaciones y la perseverancia han producido frutos, a veces a contracorriente de las directrices políticas desafortunadas de un momento determinado. En Mar del Plata la red de captaciones y el modo conexión de los pozos ha ido evolucionando para

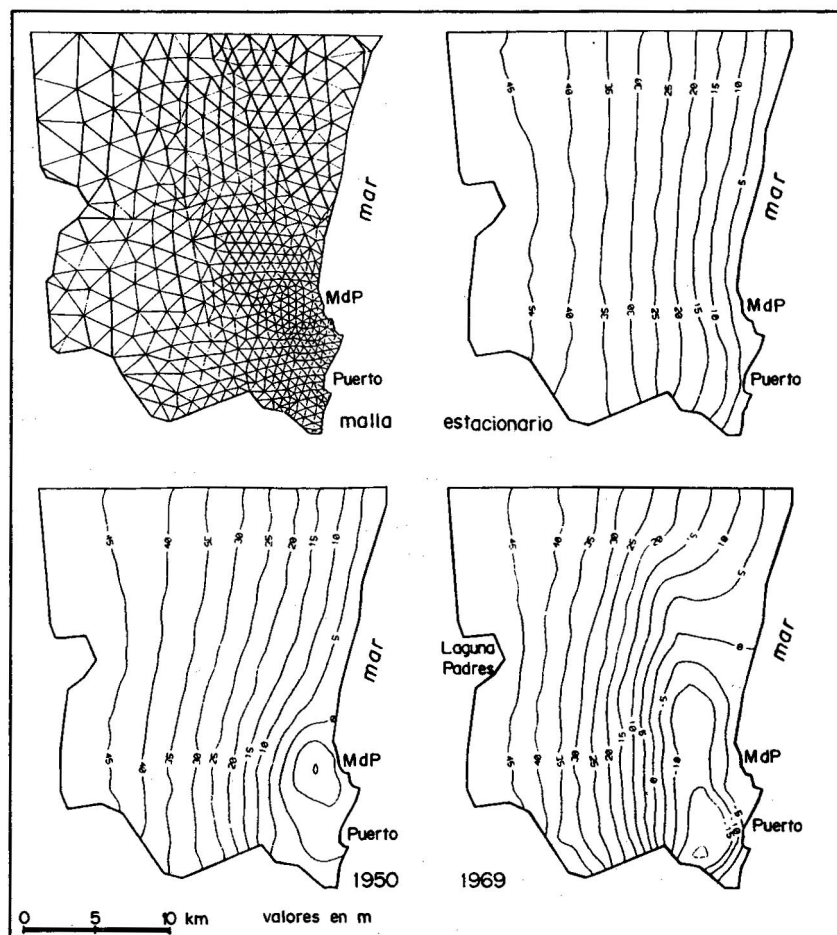


Figura 18. Malla del modelo de flujo de Mar del Plata y evolución simulada (según Bocanegra y Benavente, 1994).

aminorar la degradación por salinización, extendiendo el área generadora de recursos. La recarga natural es suficiente y además no hay disponibilidad de otras aguas para recarga artificial, salvo las servidas. Parece que su posible interés se reduce a tratar de reducir los problemas de salinización por recarga artificial de ese agua tras un tratamiento avanzado. Es algo difícil, delicado y caro, y en todo caso es una solución extrema, en un acuífero de usos potables en el que existen áreas para extender las captaciones. Mediante una observación adecuada del territorio, el uso de herramientas de simulación para el apoyo a la decisión y una adecuada explotación de las diferentes áreas de captación parece posible controlar la salinización, y de hecho Obras Sanitarias ya ha actuado en ese sentido, obteniendo ciertas mejoras.

El problema más grave posiblemente sea el del aumento de nitratos en el acuífero, principalmente a causa del uso de fertilizantes agrícolas en los campos de cultivo sobre el acuífero. La parte superior del acuífero y el medio no saturado contienen aguas para las que se estima un contenido entre 100 y 200 mg/L NO_3^- , que van penetrando hacia los niveles más profundos a medida que el agua fluye naturalmente o es extraída

preferentemente por los pozos de abastecimiento. El proceso está razonablemente caracterizado, aunque faltan estudios específicos.

No es un problema insoluble.- bastaría con regular el uso de fertilizantes - pero es complejo y espinoso administrativa y políticamente. El diferimiento de acciones y regulaciones y en su caso la posible aplicación de compensaciones por perjuicios singulares o desproporcionados a los agricultores obligados a nuevas prácticas, agrava el problema y el alarga el periodo de recuperación. Se trata de un reto importante, a nivel mundial, pero no es ni mucho menos una batalla perdida, sino una etapa del desarrollo que hay que superar con los medios adecuados, tanto técnicos, como administrativos, como sociales.

Las principales pautas de prevención y control para una gestión sostenible del recurso hídrico en Mar del Plata se basan en (Massone et al., 1994):

- la educación de la sociedad en general, de alumnos y agentes multiplicadores de productores y de tomadores de decisión política. En este sentido es importante el papel de la Universidad así como de otras instituciones no gubernamentales.

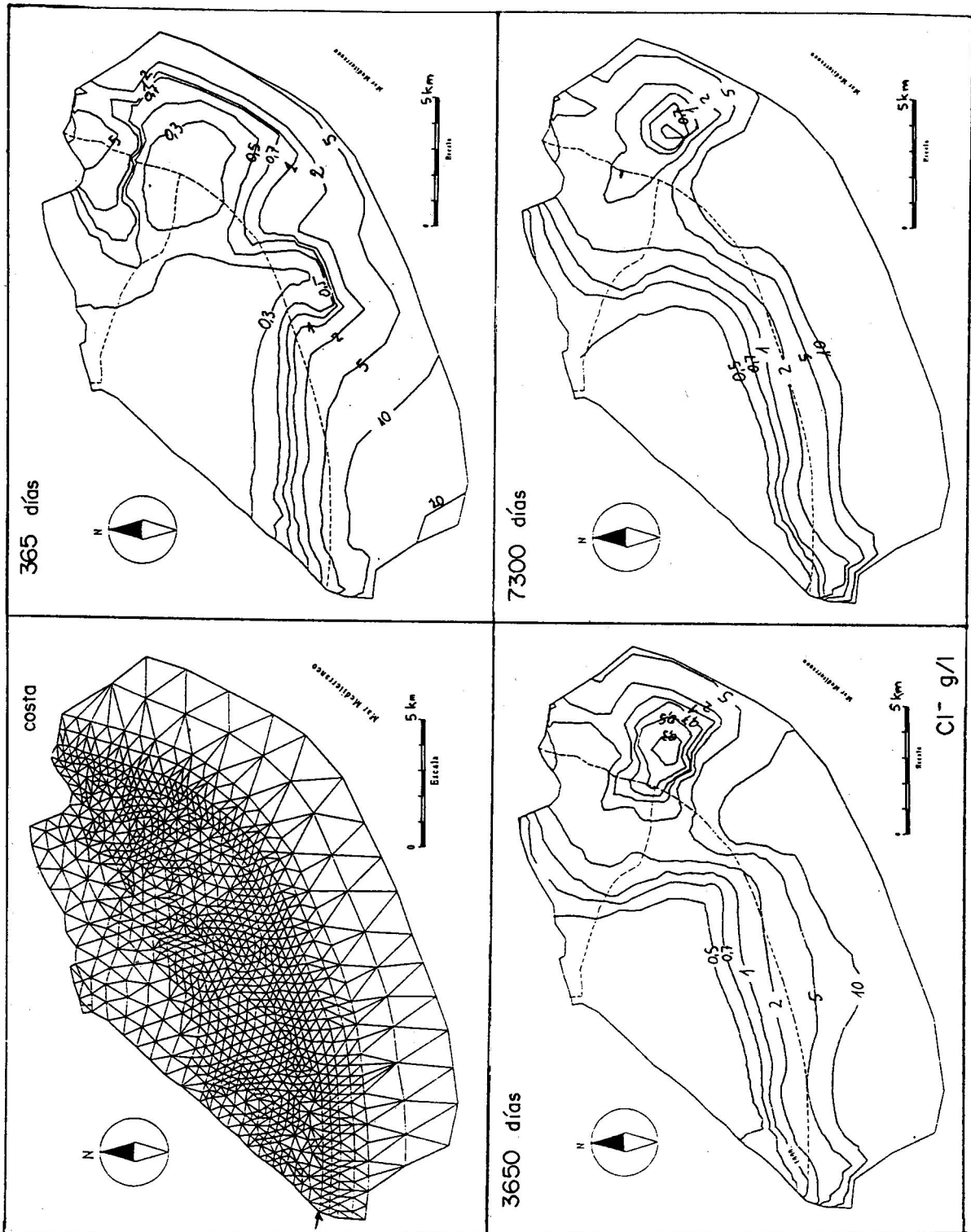


Figura 19. Malla del modelo de transporte de cloruros marinos en el acuífero profundo del delta del Llobregat y evolución simulada (según Iribar et al., 1992).

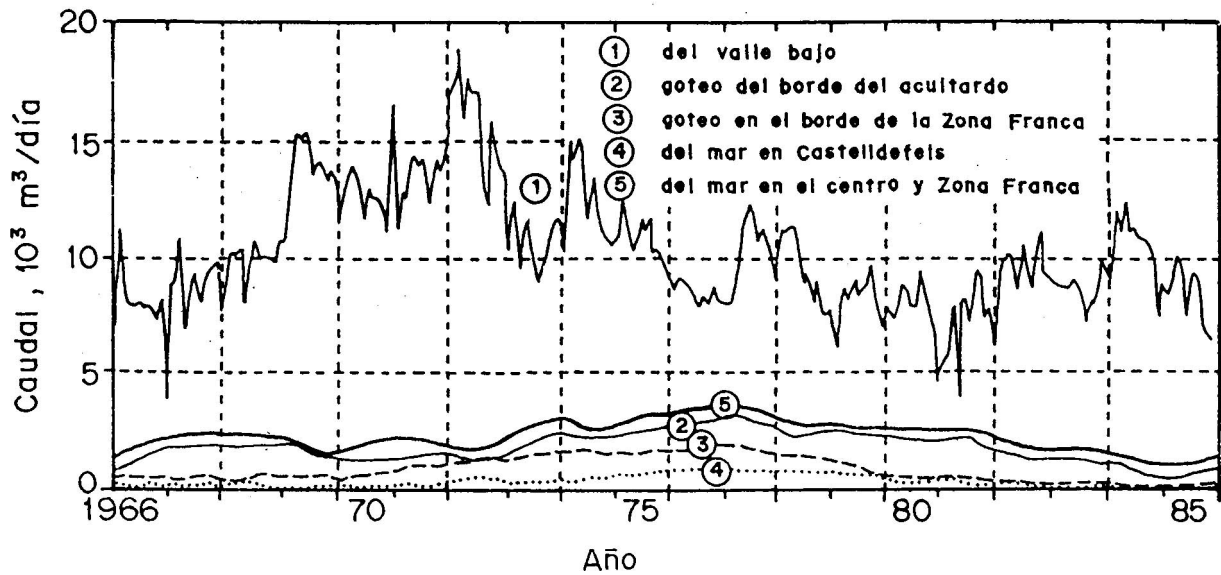


Figura 20. Evolución de los aportes de agua al acuífero profundo del delta del Llobregat ajustados con un modelo de transporte de masa (Iribar et al., 1992).

■ la legislación, a través del reordenamiento y la actualización legislativa, la resolución de problemas de competencia y el establecimiento de mecanismos de control y descentralización. Un buen ejemplo es la Ordenanza Municipal 8423/91 que crea el Comité de Cuenca (aunque aún no ha comenzado su actuación) y da pautas de preservación, la acción, que comprende entre otras medidas el dissent de la explotación sobre la base de la integración de criterios y la aplicación de modelos matemáticos, la construcción adecuada de perforaciones, el estudio de impacto ambiental de diversas actividades humanas, el control del uso de agroquímicos, las obras de agua potable y saneamiento, y la disminución del consumo.

La situación en Barcelona tiene un trasfondo muy similar y soluciones conceptualmente similares, aunque el detalle sea distinto, condicionado por las características físicas, administrativas y políticas locales. Existe un problema de cantidad de recarga, que además se va agravando con el tiempo por degradación del cauce fluvial, reducción de la zona agrícola y ocupación del territorio por urbanizaciones y vías de comunicación. La recarga artificial es una vía de solución, ya practicada a escala moderada por la empresa de abastecimiento de agua en Barcelona desde la década de 1940. Existen buenas condiciones para la recarga de aguas fluviales en balsas de uso intensivo, con operación muy tecnificada. Se ha considerado repetidamente desde la década de 1970.

El que no se haya materializado no es una cuestión técnica sino de cierto desinterés de la Administración del Agua, tanto Estatal como Regional como Local, en parte a causa de no haber resuelto los problemas de financiación para la obra y su operación. Los usuarios que se benefician de la recarga artificial deben atender a esa financiación, pero en parte ya lo hacen con las tasas específicas que abonan, pero además es la propia Administración la que debe aplicar fondos generales para restaurar y restaurar los daños a la recarga ocasionados por obras tales como encauzamientos, vías de comunicación y urbanizaciones ejecutadas por ella.

Se están considerando proyectos de reutilización de aguas residuales usadas, tratadas secundariamente en las plantas ya construidas o en construcción, cuyo coste de operación se salda con la tasa correspondiente de saneamiento. No obstante, no hay una demanda agrícola suficiente y regular para esas aguas, y la utilización industrial requiere plantas piloto y un análisis de métodos, costes y estabilidad futura de la demanda. No parece que la recarga en los acuíferos sea una solución sencilla, ni barata, ni fácilmente aceptable dado el uso para abastecimiento de sus aguas, y requiere al menos un periodo largo de estudio de la viabilidad y aceptabilidad. Se hicieron experiencias preliminares en la costa del Delta del Besós (Custodio et al., 1976, 1981), con resultados que muestran que se requiere un alto grado de tratamiento y un cuidadoso control

técnico. Otros ensayos de recarga artificial han tenido por objetivo la obtención de datos para el diseño de un modo de control de la intrusión marina. No obstante, parece más conveniente la operación temporal de pozos de extracción de agua salina en puntos críticos para su vertido al mar por un colector separado. Este es el papel que juegan determinados pozos industriales salinizados aún en operación. Se ha construido un pozo experimental para proyectar instalaciones que regularicen estas actuaciones en el futuro.

Para mejorar la calidad de las aguas fluviales, la fuente principal de recarga del sistema acuifero, además de un más estricto control de los vertidos aguas arriba y de la puesta en operación de estaciones depuradoras de aguas residuales, se ha construido un colector de las salmueras producidas por la minería potásica en la cuenca salina del Llobregat medio, que ya tiene varios años de operación. Es una obra que requiere un cuidadoso mantenimiento para evitar fugas, rupturas e incrustaciones.

Progresivamente se han ido eliminando los enterramientos de residuos y se han iniciado tareas de saneamiento de los existentes que son más nocivos o tienen mayor potencial de contaminación. La Entidad Metropolitana de Barcelona, y la Empresa Metropolitana de Suministro de Agua que depende de ella, está realizando esfuerzos de control y de protección de los acuíferos, junto con la Junta de Saneamiento de Cataluña el equipo de agua subterránea ha comenzado a trabajar muy recientemente y la Junta de Aguas de Cataluña.

Para una mejor y más descentralizada gestión del sistema acuifero y un mayor protagonismo y responsabilidad de los usuarios en la defensa de sus propias fuentes de recursos de agua, al amparo de la Ley de Aguas de 1879 - utilizando posibilidades hasta entonces no aplicadas - y luego adaptada a las disposiciones específicas de la Ley de Aguas de 1985, se creó la Comunidad de Usuarios de Aguas Subterráneas del Bajo Llobregat (Feret, 1985; Galofré, 1991). No obstante, a pesar del amparo legal y de la notable actividad de sus miembros, no se han resuelto del todo los problemas de encaje con la Administración del Agua para conseguir su plena efectividad. Tampoco se ha llegado a establecer las áreas de protección previstas por la Ley de Aguas y sus Reglamentos, aunque se trabaja para lograrlo si se encuentra una vía de solución a los problemas y conflictos territoriales que ello conlleva.

A pesar de todas las dificultades, de los nuevos problemas de contaminación que van surgiendo y de los impedimentos que crea la propia Administración cuando se trata de aplicar las disposiciones a nuevas situaciones, el acuifero del Bajo Llobregat continua operando como fuente de suministro regular y de emergencia y muchos escollos han sido superados, e incluso hay aspectos que se pueden considerar una

clara mejora. No hay razón para que no sea así en el futuro si existe la voluntad de hacerlo y se adquiere la conciencia del alto valor económico y social del sistema acuifero.

CONCLUSIONES

El carácter urbano y costero de Barcelona y de Mar del Plata, con sus acuíferos junto a la demanda, hace que existan numerosos puntos en común en cuanto a uso sostenible, gestión y oportunidad de explotación de los acuíferos, a pesar de las notables diferencias hidrogeológicas. Se trata de recursos de agua de base y de emergencia de gran valor, frágiles por intrusión marina, por contaminación y por actuaciones territoriales, pero que se pueden utilizar permanentemente si se dispone de una red de observación adecuada, de métodos de estudio y seguimiento cuantitativos, y de dispositivos adecuados y rápidos de actuación y ordenación, con la participación de los usuarios.

La fragilidad antes aludida es una de las principales causas del menosprecio del valor real y papel esencial de esos acuíferos costeros. Esto nace más de la falta de conocimiento de los gestores, usuarios y del público en general, y de las trabas administrativas, que de la propia dificultad del problema. La experiencia adquirida muestra que los problemas son superables si hay voluntad de lucha y se admite que la conservación y prevención no son gratuitas, pero que ese coste, bien aplicado, puede producir un ahorro importante al no tener que recurrirse a otras fuentes de agua más costosas y quizás conflictivas e inseguras.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo se ha realizado por los dos responsables del proyecto de intercambio entre la Universidad Nacional de Mar del Plata y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), que ha patrocinado el Programa de Cooperación Científica con Iberoamérica de la Agencia Española de Cooperación Internacional, Instituto de Cooperación Iberoamericana, en los años 1992, 1993 y 1994. Se agradece el soporte económico recibido, así como el apoyo de los respectivos centros de las dos Universidades que han acogido a los respectivos profesores. De modo especial se agradece la gestión y amable acogida por parte del Rector de la Universidad Nacional de Mar del Plata. A nivel personal se agradece la colaboración en datos, estudios y experiencia de los profesores José Luis Cionchi, Daniel Martínez, Héctor Massone y Miguel Benavente, todos ellos Centro de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata, así como de los profesionales Marisol Manzano, Alfons Bayo y Andreu Galofré de la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. A todos ellos

se les agradece además las sugerencias y observaciones al texto. El profesor Javier Samper, inicialmente en la UPC y actualmente en la Universidad de La Coruña, ha colaborado activamente con ambos grupos y ha orientado los trabajos recientes de modelación, como contraparte del proyecto. Parte de los datos proceden de Obras Sanitarias de Mar del Plata, de la Junta de Aguas de Cataluña, de Sociedad General de Aguas de Barcelona, de la Comunidad de Usuarios de Aguas Subterráneas del Bajo Llobregat y del Centro Internacional de Hidrología Subterránea.

No obstante, los autores hacen constar que las ideas aquí expresadas son las suyas propias, en sus respectivos ambientes de conocimiento, y no tienen porque coincidir ni estar avaladas por los organismos a los que pertenecen o que se mencionan en el texto.

REFERENCIAS

- Andreu, J. (1993). Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. CIMNE. Barcelona: 1-391.
- Anguita, F. (1971). Construcción de un modelo R-C basado en datos del acuífero del delta del Llobregat. Primer Congreso Hispano-Luso Americano de Geología Económica. Madrid-Lisboa. Comunicación E-3-4.
- Bocanegra, E.; Martínez, D.; Massone, H.; Cionchi, J.L. (1993). Exploitation effect and saltwater intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. Study and Modelling of Seawater Intrusion into Aquifers. CIMNE. Barcelona: 177-192.
- Bocanegra, E.; Benavente, M.A. (1994). Simulación numérica del sistema de flujo de las aguas subterráneas en Mar del Plata, Argentina (período 1920-1969). II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Santiago. Chile. ALHSUD: 213-224.
- Candela, L.; Custodio, E.; Fernández-Rubio, R. (1981). Contaminación por boro en un área del sector occidental del delta del Llobregat (Barcelona, España). Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas en España. Curso Intern. de Hidrología Subterránea. Barcelona: 331-348.
- Cuena, J.; Custodio, E. (1971). Construction and adjustment of a two layer mathematical model of the Llobregat Delta, Barcelona, Spain. Studies and Reports in Hydrology n°15, UNESCO. Paris II: 959-964.
- Custodio, E. (1966). Calidad química de las aguas subterráneas del delta del río Llobregat. Documentos de Investigación Hidrológica, n° 2. Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua. Barcelona, págs. 129-139.
- Custodio, E. (1967). Etudes hydrogéochimiques dans le delta du Llobregat, Barcelona (Espagne). Intern. Assoc. Scientific Hydrology. Pub. 62: 135-155.
- Custodio, E. (1968). Datación de aguas en el delta del río Llobregat. Documentos de Investigación Hidrológica, n° 6. Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua. Barcelona, págs: 205-237.
- Custodio, E. (1981). Sea water encroachment in the Llobregat and Besós areas near Barcelona (Catalonia, Spain). Intruded and Relict Groundwater of Marine Origin. Sveriges Geologiska Undersökning, Rapport och Meddelanden. 27. Uppsala: 120-152.
- Custodio, E. (1982). Nitrate buildup in Catalonia coastal aquifers. Inter. Symp. Impact of Agricultural Activities on Groundwater. Praga. Intern. Assoc. Hydrogeologists. XVI(1): 171-181.
- Custodio, E. (1986). Recarga artificial de acuíferos: avances y realizaciones. Boletín del Servicio Geológico 45. Servicio de Publicaciones del MOPU. Madrid: 1-134.
- Custodio, E. (1987). Sea-water intrusion in the Llobregat delta, near Barcelona (Catalonia, Spain). Groundwater Problems in Coastal Areas. Studies and Reports in Hydrology, 45. UNESCO, París: 436-463.
- Custodio, E. (1992). Progresiva degradación de la cantidad y calidad de los recursos de agua en el sistema acuífero del Bajo Llobregat. Anais 7º Congresso Brasileiro de Aguas Subterráneas. Belo Horizonte. Associação Brasileira de Aguas Subterráneas: 18-48.
- Custodio, E. (1993). Contamination of the Lower Llobregat system: the need for integral protection. Environmental Pollution: Science, Policy, Engineering. European Centre for Pollution Research, London. I: 163-170.
- Custodio, E. (1994). Endurecimiento del agua del Valle Bajo del Llobregat por cambios en los procesos de recarga. Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Asoc. Intern. Hidrogeólogos-Grupo Español. (2): 123-140.

- Custodio, E.; Bayó, A.; Peláez, M.D. (1971). *Geoquímica y dotación de aguas para el estudio del movimiento de las aguas subterráneas en el delta del Llobregat (Barcelona)*. Primer Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica. Madrid-Lisboa. Sección 6: 51-80.
- Custodio, E.; Cuena, J.; Bayó, A. (1971). Planteamiento, ejecución y utilización de un modelo matemático de dos capas para los acuíferos del delta del río Llobregat (Barcelona). Primer Congreso Hispano-Luso Americano de Geología Económica. Madrid-Lisboa. (1): 171-198.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1976; 1983). Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona. 2 vols: 1-2450.
- Custodio, E.; Suárez, M.; Galofré, A. (1976). *Ensayos para el análisis de la recarga de aguas residuales en el delta del Besós*. 2ª Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Instituto Geográfico y Catastral. Madrid: 1893-1936.
- Custodio, E.; Suárez, M.; Isamat, F.J.; Miralles, J.M.; (1977). *Combined use of surface and groundwater in Barcelona Metropolitan Area (Spain)*. Intern. Assoc. Hydro geologists. Vol. XIII. 1: 14-27.
- Custodio, E.; Touris, R. Balagué, S. (1981). *Behaviour of contaminants after injection of treated urban waste water in a well*. Intern. Symp. Quality of Groundwater. Studies in Environmental Sciences Vol. 17. Elsevier: 395-401.
- Custodio, E.; Isamat, F.J.; Miralles, J.M. (1982). *Twenty-five years of groundwater recharge in Barcelona (Spain)*. Artificial Groundwater Recharge. DVWK Bulletin. Dortmund. 11(1): 171-192.
- Custodio, E.; Bayó, A. (1986). *Interactions between land-use and aquifer behaviour in the surroundings of Barcelona (Spain)*. Integrated Land Use Planning and Ground-Water Protection Management in Rural Areas. Karlovy Vary. Intern. Assoc. Hydrogeologists: 90-97.
- Custodio, E.; Bruggeman, G.A. (1986). Groundwater problems in coastal areas. Studies and Reports in Hydrology. No 45. UNESCO Press. París: 1-596.
- Custodio, E.; Galofré, A. (1987). *Fast release of salinity after a flood in the Llobregat Valley (Catalonia, Spain)*. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants.
- Custodio, E.; Glorioso, L.; Manzano, M.; Skupien, E. (1989). *Evolución y alternativas de un acuífero sobreexplotado: el delta del Llobregat*. La Sobreexplotación de Acuíferos. Temas Geológico-Mineros. 10 (ITGE): 207-227.
- Custodio, E.; Iribar, V.; Manzano, M; Skupien, E. (1992). *Utilización de isótopos ambientales en el Valle Bajo y Delta del río Llobregat (Barcelona, España) para resolver problemas de flujo y de transporte de masa en los acuíferos*. Isotope Techniques in Water Resources Development, 1991. Intern. Atomic Energy Agency. Vienna, IAEA-SM-319/26: 385-414.
- Díaz, E., Custodio, E.; Galofré, A. (1978). *Influencia de la minería potásica catalana en la calidad del agua del río Llobregat (Barcelona)*. Simposio Internacional sobre el Agua en la Minería y Obras Subterráneas. Granada. Asoc. y Consejo Sup. Col. Ing. Minas: 989-1011.
- Fasano, J.L.; Bocanegra, E. (1989). *Técnicas matemáticas: variables regionalizadas, componentes principales y flujos tridimensionales aplicadas a la hidrología: un caso de estudio: Barrio Alfar, Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires*. Actas 1ª Jornadas Geológicas Bonaerenses. Tandil: 475-491.
- Fasano, J.L.; Bocanegra, E.; Suárez, C.; Benavente, M.; Hack, H. (1989). Simulación numérica por elementos finitos del flujo estacionario del acuífero de Camet. Mar del Plata, Argentina. Hidrología de Grandes Llanuras. Proc. Semin. Intern. UNESCO. Buenos Aires.
- Ferrante, V.; Hernández, M.; Pedriel, A. (1987). *Saline intrusion in the Mar del Plata aquifer (Argentina): present day situation, studies and measures undertaken*. Groundwater Problems in Coastal Areas. Studies and Reports in Hydrology 45. UNESCO, París: 494-498.
- Ferret, J. (1985). L'aprofitament de les aigües subterranies del delta del Llobregat. 1933-1983. Comunitat d'Usuaris d'Aigües de l'Àrea Oriental del Delta del Riu Llobregat. El Prat de Llobregat: 1-158.
- Galofré, A. (1991). *La comunidad de usuarios de aguas subterráneas: experiencias en la gestión y control de los recursos hidráulicos en Cataluña*. Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva. Curso Internacional de Hidrología Subterránea/Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona: 337-357.

- Groeber, P. (1954). *Geology and hidrogeology of Mar del Plata connected with the problem of provision of current water to the urban zone*. Rev. Museo Municipal de Mar del Plata, 1(2): 5-25.
- Hernández, M.; Fasano, J.L.; Bocanegra, E. (1991). *Overexplotation effects on the Quaternary aquifer of Mar del Plata (Argentina)*. Aquifer Overexploitation. Proc. XXIII Congress Intern. Assoc. Hydrogeologists. Puerto de la Cruz, Tenerife. I:
- Iribar, V.; Custodio, E. (1992). *Advancement of seawater intrusion in the Llobregat delta aquifer. Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers*. CIMNE. Barcelona: 35-50.
- Iribar, V.; Custodio, E.; Carrera, J. (1992). *Modelling seawater intrusion in the Llobregat delta deep aquifer. Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers*. CIMNE. Barcelona: 455-474.
- Llamas, M.R. (1988). El agua subterránea como recurso económico-ecológico y como factor geológico. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid: 1-83.
- Llamas, M.R. (1991). *Consideraciones iniciales sobre el pasado, presente y futuro de las aguas subterráneas en España*. Revista de Obras Públicas. Madrid. Dic. 1991: 7-12.
- Llamas, M.R.; Molist, J. (1967). *Hidrología de los deltas de los ríos Besós y Llobregat*. Documentos de Investigación Hidrológica, nº 2. Centro de Estudios, Aplicaciones e Investigaciones del Agua. Barcelona.
- Llamas, M.R.; Vilaró, F. (1967). *Die rolle der Grundwasserspeicher beider wasserversorgung von Barcelona*. Das Gas-und Wasserfach, Wasser-Abwasser, 34(15): 945-953.
- Manzano, M. (1991). *Síntesis histórica y estado actual de los trabajos sobre la hidrogeología del río Llobregat*. Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva. CIHS/Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona: 203-228.
- Manzano, M.; Peláez, M.D.; Serra, J. (1986-87). *Sedimentos prodeltaicos en el delta emergido del Llobregat*. Acta Geológica Hispánica, 21-22:205-211.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Carrera, J. (1993). *Fresh and salt water in the Llobregat delta aquitard: application of the ion Chromatographic theory to the field data. Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers*. CIMNE. Barcelona: 207-228.
- Marqués, M.A. (1984). Les formacions quaternaries del delta del Llobregat. Institut d'Estudis Catalans. Arxius de la Secció de Ciències. LXXI, Barcelona.
- Massone, H.; Martínez, D.E.; Cionchi, J.L.; Bocanegra, E. (1994). *Procesos de contaminación del acuífero de Mar del Plata, Argentina: diagnóstico y pautas de prevención y control*. II Congreso Latió americano de Hidrología Subterránea. Santiago. Chile. ALHSUD: 81-97.
- Miralles, J.M.; Cantó, J. (1984). *Realimentación artificial de los acuíferos subterráneos de los deltas de los ríos Llobregat y Besós*. Tecnología del Agua. Barcelona. 14: 46-56.
- Moragas, G. (1896). *Corrientes subálveas: estudio general sobre el régimen de las aguas contenidas en terrenos permeables e influencias que ejercen los alumbramientos por galerías o pozos, y especial, del régimen o corriente subterránea del delta acuífero del Besós*. Anales de la Revista de Obras Públicas. Madrid: 1-133.
- Navarro, A.; Carrera, J. Sánchez-Vila, X. (1992). *Contaminación por lavado piezométrico a partir de vertederos enterrados: aplicación a un acuífero aluvial*. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Madrid. XVI: 371-385.
- Ruiz Huidobro, O.J. (1971). *La intrusión de agua de mar en el acuífero de Mar del Plata*. 1^{er} Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica. Madrid/Lisboa. (3): 845-858.
- Ruiz Huidobro, O.J.; Tófaló, O. (1971). *La intrusión de agua de mar en acuíferos litorales: su control en Mar del Plata*. VI Cong. Geol. Argentino. Bahía Blanca.
- Sahuquillo, A. (1983). Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas, Madrid/Universidad Politécnica de Valencia.

- Sánchez-Vila, X.; Manzano, M.; Carrera, J.; Medina, A.; Galarza, G.; Custodio, E. (1994). *Simulación del movimiento en el medio saturado de un vertido accidental de gasolina en el Valle Bajo del Llobregat. Barcelona. Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas.* Asoc. Intern. Hidrogeólogos- Grupo Español (1): 265-278.
- Santa María, L.; Marín, A. (1910). *Estudios hidrológicos en la cuenca del Río Llobregat.* Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España. Madrid, pp: 31-52.
- Serra, J.; Verdaguer, A. (1983). *La sedimentación holocena en el prodelta del Llobregat.* Ed. A. Obrador Comunicaciones del X Congreso Nacional de Sedimentología. Maó, Menorca, (Sept. 1983). Universidad Autónoma de Barcelona, pp: 249-251.
- Solé Sabarís, L. (1963). *Ensayo de interpretación del Cuaternario Barcelonés.* Miscel. Barcionensia. Barcelona. II: 7-54.
- Stanley, D.J.; Warne, A.G. (1994). *Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise.* Science, 265: 228-230.
- Subirana, J.M.; Casas, A. (1985). *étude préliminaire sur la pollution d'un aquifère alluvial près de Barcelona (Espagne).* Hydrogéologie. Orléans. 1: 31-91.
- Vilaró, F. (1967). *Balace del aprovechamiento actual del Bajo Llobregat.* Documentos de Investigación Hidrológica n° 2. Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua. Barcelona: 155-169.