

## **ACUIFEROS COSTEROS E INTRUSION MARINA**

### **1. Introducción**

### **2. Los acuíferos costeros**

### **3. Mecanismos de descarga de los acuíferos costeros**

### **4. Interfase agua dulce/agua salada**

#### **4.1. Introducción**

#### **4.2. Definiciones**

### **5. Importancia de los niveles semipermeables o acuitardos en los acuíferos costeros**

#### **5.1. Introducción**

#### **5.2. Los acuitardos en sistemas acuíferos poco profundos**

#### **5.3. El papel de los acuitardos en las zonas costeras**

### **6. Los acuíferos costeros carbonatados**

#### **6.1. Consideraciones generales**

#### **6.2. Conductos cársticos**

#### **6.3. Alteraciones diagenéticas en los carbonatos costeros**

### **7. Algunos ejemplos de aprovechamiento de acuíferos costeros salobres y salinos en Florida**

#### **7.1. Generalidades**

#### **7.2. Un caso histórico a imitar. San Petesburgo**

##### **7.2.1. Consideraciones generales**

##### **7.2.2. Sondeos de inyección**

#### **7.3. Inyecciones en sondeos profundos**

## **7.4. Tratamiento por ósmosis inversa e inyección del agua residual en Sarasota y Charlotte**

*7.4.1. Consideraciones generales*

*7.4.2. RO en Englewood*

*7.4.3. La desalinización por ósmosis inversa*

## **7.5. Almacenamiento y recuperación en el acuífero ASR**

*7.5.1. Generalidades*

*7.5.2. ASR en Los Cayos*

## **7.6. El sistema Bardenpho**

## **8. Algunas consideraciones sobre el aprovechamiento de los acuíferos Atlántico-Mediterráneos en España**

*8.1. Consideraciones generales*

*8.2. Las posibilidades de reutilización de agua depurada*

*8.3. Otras fuentes de agua de calidad*

*8.4. Posibilidad de utilización de aguas residuales depuradas, ósmosis inversa y otras técnicas para un mejor aprovechamiento de los acuíferos costeros*

*8.4.1. Las Planas costeras de la Cuenca del Júcar*

*8.4.2. Cuenca del segura*

*8.4.3. Almería*

## **9. Bibliografía**

## **10. Debate**

# Acuíferos costeros e intrusión marina

---

**Fernando Pendás Fernández**

Catedrático de Hidrogeología y Geología del Petróleo  
Universidad de Oviedo

---

**L**o verdaderamente importante de los acuíferos costeros no son sus recursos sino las posibilidades de emplearlos como almacenes reguladores de agua residual depurada o agua potable tratada y como elementos depuradores.

Combinados la reutilización, la ósmosis inversa y sistemas de depuración biológicos avanzados se puede conseguir un volumen de agua de calidad superior a los 2000 hm<sup>3</sup>/año en las cuencas más deficitarias a un precio competitivo, que permitiría desarrollar industrias medioambientales de futuro en estos momentos de desindustrialización y perentoria necesidad de dinamización económica.

Para lograr ésto hace falta un planteamiento hidrogeológico y de gestión integrada modernas así como una inversión en consonancia con la importancia del tema.

## 1. Introducción

Algunos de los acuíferos más intensamente aprovechados se encuentran en las zonas costeras donde hay importantes asentamientos de población e intenso aprovechamiento agrícola. Esto ha dado origen a los mayores problemas causados por la explotación de estos acuíferos: la intrusión de agua de mar, el elevado contenido en nitratos y la contaminación por aguas residuales no o deficientemente depuradas.

Así como el mar es un ecosistema más sensible que los terrestres, los acuíferos costeros son mucho más delicados y vulnerables a la contaminación que los continentales.

Los recursos renovables de los acuíferos costeros en España se han estimado en 5000 hm<sup>3</sup>/año y de ellos 3500 hm<sup>3</sup>/año en el litoral Atlántico-Mediterráneo, la zona más árida de la España peninsular. Pero el interés no está sólo en sus recursos; La reutilización de aguas residuales urbanas depuradas, la desalinización de las salobres mediante ósmosis inversa, su empleo como embalses de agua potable o de agua residual depurada etc. los hacen particularmente interesantes para, mediante un mejor aprovechamiento de los mismos, conseguir unos ambientes costero y marino más limpios y económicamente más prósperos.

## 2. Los acuíferos costeros

Los acuíferos costeros constituyen embalses subterráneos, del más variado volumen, donde el agua circula muy lentamente, cms/día en los más superficiales a cms/año en los profundos.

Podemos agrupar los acuíferos costeros en dos grandes tipos:

- Acuíferos no consolidados detríticos, están constituidos por gravas y arenas de cauces de arroyada y fluviales meandriformes o trenzados. Limos y arcillas ocupan las llanuras de inundación procedentes de la erosión y transporte de los relieves circundantes. A pesar de su extensión reducida son acuíferos de gran interés ecológico y económico por su particular situación. Tienen porosidades y permeabilidades altas que les permite almacenar y transmitir el agua con gran facilidad. Cuando poseen grandes espesores, como en Valencia y Castellón son grandes almacenes del recurso.
- Acuíferos consolidados carbonatados. En ellos el agua además de los

intersticios entre granos, ocupa los huecos creados por la fracturación de la roca y los originados por procesos de disolución de la caliza y diagénesis en la dolomitización.

Los carbonatos suelen poseer esta porosidad dual y la red de fisuras y conductos en las zonas costeras suele estar tan desarrollada que puede haber flujos muy importantes y la descarga se realiza por conductos preferentes en grandes manantiales.

En los acuíferos carbonatados costeros se produce una carstificación según el modelo Bahamas que suele incrementar la permeabilidad de una manera espectacular. En el aprovechamiento económico esto tiene ventajas y desventajas que consideraremos posteriormente.

## 3. Mecanismos de descarga de los acuíferos costeros. (Fig. 1)

Los acuíferos costeros se recargan directamente o en las zonas interiores; el agua dulce fluye y se descarga por diversos mecanismos en las zonas costeras.

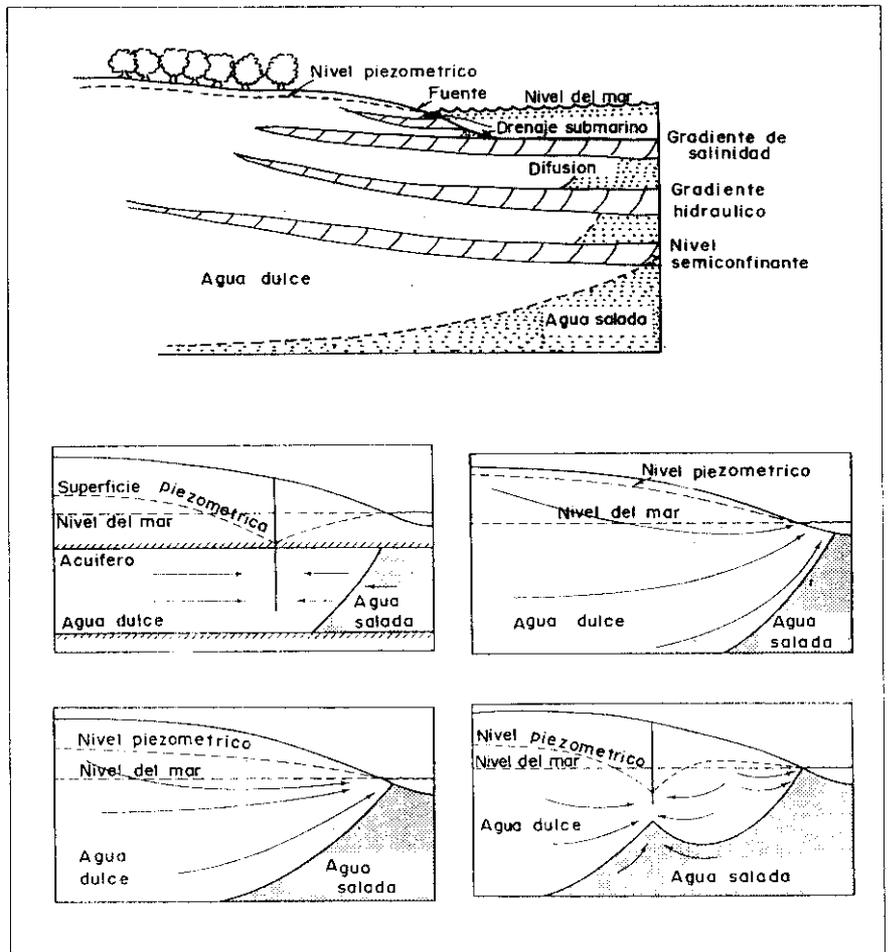


Figura 1. Relación agua dulce - agua salada en acuíferos costeros (Fetter, 1988).

La cantidad de agua que circula y "lava" el acuífero es una función del volumen de recarga del acuífero y la cantidad de agua que puede escapar a favor del gradiente mediante los mecanismos disponibles. El agua salada que existió en los acuíferos se ha lavado hasta 1070 metros bajo el nivel del mar en St. Tammany Parish (Luisiana) o 1200 metros en el sondeo de Caldones (Gijón), aunque éste no es frecuente. Se encuentra agua dulce hasta 300 metros bajo el nivel del mar en algunos acuíferos costeros. Se ha encontrado agua dulce en acuíferos confinados muchos kilómetros mar adentro (a 64 Km. de la costa en Nueva Inglaterra, Nantucket Island) a profundidad de 300 metros en arenas cretáceas confinadas por arcillas que se recargaron durante el Pleistoceno cuando el mar estaba más bajo. (FETTER, 1988).

En Murcia, Torrepacheco y Orihuela se encuentra agua salada en acuíferos confinados salinizados durante avances de mar Pliocenos, cuando el nivel del mar estaba más alto (THAUVIN; MORA, 1987).

Los mecanismos de descarga de agua dulce en la costa son:

- 1) Evapotranspiración en marjales y acuíferos costeros con nivel piezométrico somero.
- 2) Drenaje por fuentes, cauces, llanuras mareales y fondo del mar.
- 3) Mezcla con agua subterránea salada.
- 4) Flujo a través de niveles semipermeables bajo la influencia del gradiente hidráulico.
- 5) Flujo a través de un estrato semipermeable a causa de la presión osmótica originada por un gradiente de salinidad.

Los mecanismos 1 y 2 son muy eficientes. Fuentes en el fondo del mar ocurren por fracturación del confinante o por el desarrollo de conductos cársticos a través de dolinas de colapso.

Los acuíferos profundos descargan mediante los mecanismos 3, 4 y 5, que son menos eficientes.

## 4. Interfase agua dulce / agua salada

### 4.1. Introducción

El carácter más distintivo e importante de los acuíferos costeros es la posición del contacto agua dulce agua salada. Existen dos publicaciones recientes que hacen una revisión actualizada de la metodología de estudio y puesta en común de experiencias a las que necesariamente nos debemos remitir para una mayor profundización en las técnicas de estudio y evaluación: Tecnología de la Intrusión en Acuíferos Costeros (TIAC 88), Simposio de Almuñecar en Junio de 1988 organizado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid y el Instituto Tec-

nológico Geominero de España y la publicación de la International Association of Hydrogeologists, Hydrology of Salt Water Intrusion, 1991.

### 4.2. Definiciones.

El límite entre agua subterránea dulce y salada se denomina interfase. La forma y posición es función del volumen de agua que circula por el acuífero; la presencia y extensión de niveles semipermeables condicionan en gran manera la circulación en los acuíferos.

Causas naturales pueden producir variaciones en la posición del límite: mareas, cambios estacionales climáticos, variaciones del nivel del mar, etc.

Cuando la causa de la variación de la interfase es inducida por el hombre se llama intrusión o invasión, marina o salina. Ocurre cuando se deriva agua que de manera natural circulaba por el acuífero costero.

La variación de la posición de la interfase es lenta cuando el gradiente hidráulico condiciona el flujo hacia el mar (tarda cientos de años en desplazarse una cantidad significativa). Si el gradiente se invierte la intrusión es muy rápida. Este tipo de intrusión dejó inservibles los acuíferos de Brooklin N.Y. (FETTER, 1988) y San Petesburgo Fl. (JOHNSON, 1990) en los años 30 cuando el nivel descendió 10 m. bajo el nivel del mar.

Para la caracterización de la intrusión marina existen una serie de técnicas hidroquímicas, isotópicas, geofísicas, sondeos piezométricos y modelos numéricos que son herramientas de gran utilidad.

## 5. Importancia de los niveles semipermeables o acuitados en los acuíferos costeros. (Fig. 4)

### 5.1. Introducción.

Los niveles semipermeables ejercen una significativa influencia en la hidrogeología de los sistemas acuíferos costeros: la hidroquímica, la hidrodinámica, la interfase están condicionadas por ellos. En las zonas profundas condicionan la distribución de salmueras y zonas presurizadas

En zonas de profundidad media condicionan los acuíferos multicapas y son fuente de minerales e iones de intercambio.

En los niveles más superficiales influyen en los modelos de drenaje, almacenamiento y descarga de agua.

En los acuíferos costeros los niveles semipermeables determinan la profundidad de la interfase, distancia de la costa, posición de la zona de mezcla que da origen a la alteración diagenética de los minera-

les y el desarrollo de la porosidad; WITHERSPOON en 1971, evaluó en la costa de California el papel de los acuitardos.

Los niveles semipermeables, además de tener una conductividad hidráulica muy baja, se diferencian de los niveles almacén o acuíferos por ser de grano muy fino, tener abundancia de minerales reactivos (solubles y con alta capacidad de intercambio iónico) y por tener una dirección de flujo vertical hacia arriba o hacia abajo frente a la dirección de flujo horizontal en los acuíferos.

La alta porosidad pero baja permeabilidad de los acuitardos les hace actuar como grandes almacenes de agua de mala calidad que percola lentamente a los acuíferos adyacentes.

Fué en los estudios del régimen de flujo en acuíferos profundos donde se reconoció por primera vez (BERRY y HANSHOW, 1960) que el principio de exclusión iónica era un factor fundamental en el origen de las salmueras y en la formación de zonas geopresurizadas. La propiedad fundamental de los minerales arcillosos compactados es su capacidad de restringir o impedir el paso de cationes y aniones mientras permiten un flujo sin restricción, relativamente, de moléculas de agua.

## 5.2. Los acuitardos en sistemas acuíferos poco profundos.

En régimen de flujo a poca profundidad la presencia de semipermeables está en el origen del paso de acuíferos libres o cautivos; aumentan la carga hidráulica, disminuyen la velocidad de infiltración aumentando la escorrentía superficial y desarrollan los sistemas fluviales, generan humedales, disminuyen la contaminación al actuar como filtro natural y proporcionan un ambiente adecuado para la generación de CO<sub>2</sub>. Normalmente las capas confinantes superficiales han sido lixivadas de minerales solubles y son hidroquímicamente más inertes que los niveles profundos de baja permeabilidad.

El conocimiento de las propiedades hidrogeológicas de los acuitardos es esencial para el almacenamiento, vertido y gestión de los residuos sólidos y líquidos.

Los acuitardos son el primer control para la atenuación de metales, sustancias tóxicas y compuestos orgánicos. La presencia o ausencia de acuitardos también controla el volumen de recarga del acuífero inferior en respuesta al uso del terreno y la capacidad de almacenamiento de agua dulce en los acuíferos costeros.

Los modelos de flujo regional de agua subterránea se controlan normalmente por la distribución, potencia, extensión y permeabilidad de los niveles semipermeables. La velocidad de flujo vertical está controlada por la capa de más baja permeabilidad

vertical. Esta capa puede ser muy delgada pero su control es extraordinariamente importante, si tiene una permeabilidad muy baja.

FRANK y COHEM 1972, y BUXTOM y MODICA 1992, han mostrado las diferencias de edad de las aguas subterráneas en los acuíferos Magoghy y Lloyd en Long Island N.Y. como resultado del tiempo requerido por el agua para atravesar el acuitardo Raritan.

El flujo en un acuífero homogéneo es una respuesta pasiva a las distribuciones de presión, que están controladas por la existencia y propiedades hidrogeológicas de los acuitardos.

## 5.3. El papel de los acuitardos en las zonas costeras.

El problema de como influyen los acuitardos en la dinámica de los sistemas acuíferos ha sido objeto de una investigación muy activa. Esta influencia determina la extensión de la descarga de agua dulce a través de los acuitardos bajo el nivel del mar. La longitud del frente de descarga afecta a su vez a la distribución de agua salada en el acuífero. El área de infiltración del agua salada a través del acuífero aumentará cuando la transmisividad del acuitardo disminuye. La influencia del acuitardo mismo también se manifiesta en la magnitud del flujo de percolación en el límite de la recarga de agua salada. Si el acuífero no está abierto al mar, todo el flujo de los acuíferos costeros confinados debe descargar hacia arriba a través de los acuitardos. El área requerida para esta descarga vendrá determinada por la potencia y propiedades hidrogeológicas del acuitardo. Un acuitardo de baja transmisividad requerirá una mayor área de descarga dando lugar a que la interfase penetre más hacia el mar que lo haría con un acuitardo más transmisivo.

El nivel de agua en la costa en un acuífero no confinado estará esencialmente a nivel del mar y la interfase buzará hacia tierra. Por el contrario un acuífero confinado puede tener su superficie potenciométrica cerca o sobre la superficie del terreno. La mayor carga hidráulica producirá una interfase más profunda.

Un hecho que pone en evidencia la influencia de los semipermeables es la comparación de las características hidrogeológicas de las Penínsulas de Florida y Yucatán que geológica y climatológicamente son muy similares. Tienen clima subtropical con lluvia anual entre 1000 y 1500 mm.

Los acuíferos principales en ambas son las calizas eocenas muy similares litológicamente. Sin embargo, la hidrología e hidrogeología son muy diferentes principalmente porque el acuífero Florida no está bajo un nivel confinante: la formación fosfatífera Hawthorne, que falta en Yucatán.

Geomorfológicamente el resultado es que Yucatán no tiene ríos y en Florida son abundantes. En Yucatán las calizas permeables eocenas permiten al agua de lluvia percolar al acuífero, donde el agua fluye hacia la costa donde descarga. En Florida la altitud del terreno y la presencia de semipermeables genera carga hidráulica que permite mantener 700 m. de agua dulce sobre el agua salada infrayacente.

En Yucatán la máxima potencia de agua dulce es menor de 70 m. En Florida el gradiente de la superficie piezométrica es del orden de 1 m/km y en Yucatán 0.02 m/km.

Los acuíferos con pequeñas cantidades de minerales arcillosos (GOLDEMBERG, 1991) muestran que la conductividad hidráulica puede disminuir por lavado del agua salada con agua dulce.

## 6. Los acuíferos costeros carbonatados. (Fig. 2 y 3)

### 6.1. Consideraciones generales.

En el caso de acuíferos costeros carstificados existe una compleja relación agua dulce - agua salada.

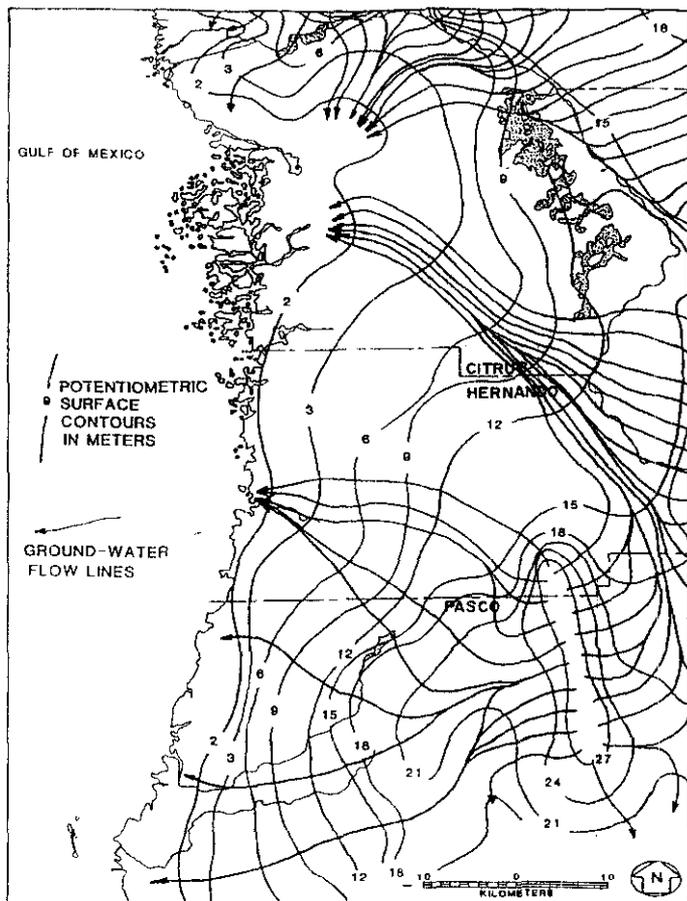


Figura 2. Convergencia y divergencia de líneas de flujo en las costa W de Florida al N de Tampa. (Barr y Schnier, 1981).

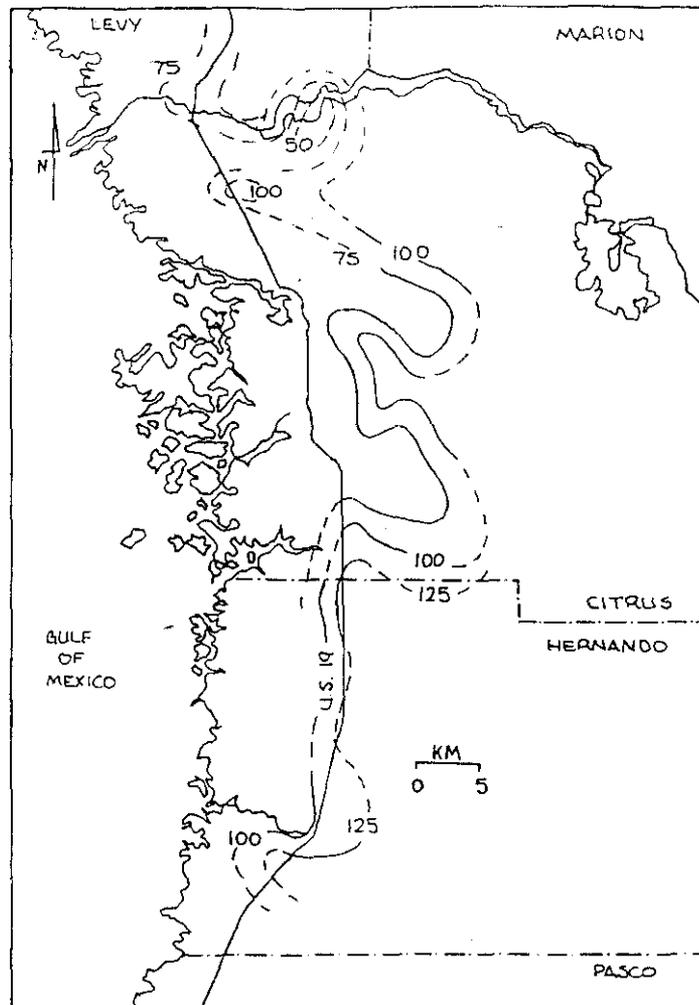


Figura 3. Profundidad del contacto agua dulce - agua salada en la costa W de Florida al N de Tampa. (Stewart, 1983).

Existe un flujo de tierra a mar y de mar a tierra asociada a la interfase dando lugar a una zona extremadamente reactiva que produce la alteración de los materiales presentes, dolomitización y fenómenos de disolución.

### 6.2. Conductos cársticos.

En el caso de acuíferos costeros carbonatados cársticos los conductos formados por la variación del nivel de mar durante el Pleistoceno, cortocircuitan la malla de flujo de agua dulce, cuando el nivel descendió a un mínimo ahora inundado, y actúan como colectores. En estos casos el contacto agua dulce - agua salada suele ser plano a lo largo del conducto y el agua dulce lo utiliza en su camino hacia las fuentes marinas. Alterando el nivel piezométrico por bombeo, el sistema puede invertir el flujo fácilmente y el agua salada penetrar a través del sistema de conductos para contaminar los acuíferos dulces.

El fenómeno de carstificación ligado a variaciones climáticas, posición de la interfase, glaciación

nes, variaciones en el nivel piezométrico, etc. está siendo bien estudiado en las Bahamas. De igual manera que allí se realizaron los estudios que dieron origen a los modernos sistemas de clasificaciones sedimentológicas de los carbonatos, Dunham, Folk, la sistemática de la investigación de los carst costeros está recibiendo allí un gran impulso.

### 6.3. Alteraciones diagenéticas en los carbonatos costeros.

Si se considera un acuífero carbonatado costero con agua dulce, con la calcita en equilibrio, en la interfase se mezclan agua dulce que está sobresaturada con respecto a la calcita y agua salada. La mezcla resultante puede estar subsaturada y dar origen a la disolución de la calcita. Se forman así en las zonas de mezcla cavernas de disolución que pueden generar extensas zonas de porosidad.

Además de ser una zona de amplio desarrollo de porosidad y permeabilidad también en ella existe una diagénesis de los carbonatos minerales. El proceso diagenético incluye la alteración de aragonito a calcita, dolomitización del aragonito y de los carbonatos. Esta disolución y alteración diagenética puede ser un control significativo de la distribución de la permeabilidad y de la porosidad. La zona de mezcla emigrará a través de los acuíferos carbonatados, en respuesta a las alteraciones del nivel del mar a través de los tiempos geológicos y su profundidad y posición relativa a la línea de costa y la presencia o no de acuitardos.

## 7. Algunos ejemplos de aprovechamiento de acuíferos costeros salobres y salinos en Florida. (Fig. 4)

### 7.1. Generalidades.

En 1985 se consumieron en Florida aproximadamente  $75 \text{ m}^3/\text{s} \approx 2000 \text{ Hm}^3/\text{año}$  para abastecimiento público, el 90 % de los cuales procedía de sondeos. El acuífero Floridiano, que contiene agua potable y está presente en la mayor parte del Estado

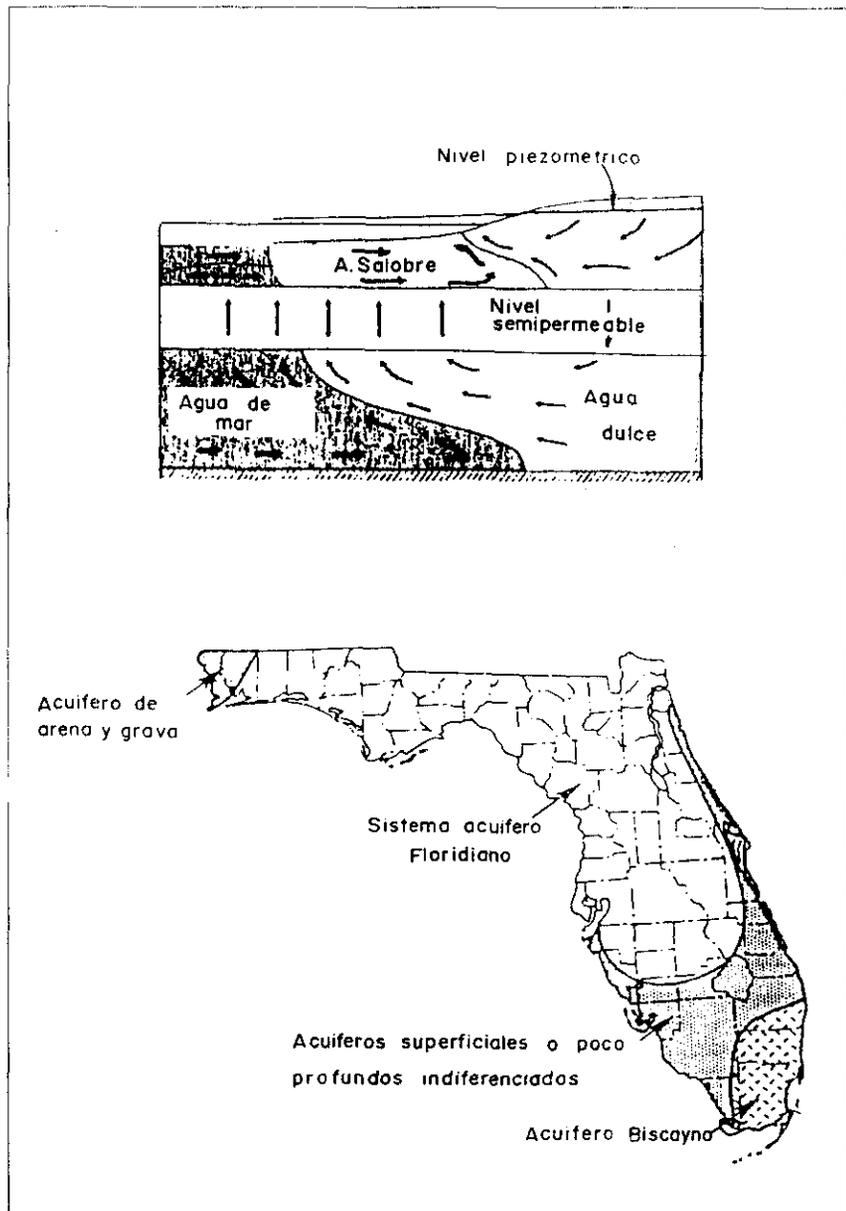


Figura 4. Efecto de un nivel semipermeable en la posición de los interfases. Acuíferos principales de Florida.

proporciona  $31 \text{ m}^3/\text{s}$  para abastecimiento público. El acuífero Biscayno suministra  $25 \text{ m}^3/\text{s}$  y se encuentra solamente en el Sur y el Este. Las extracciones de estos dos acuíferos suponen el 85 % de todos los bombeos.

El acuífero Biscayno es la única fuente de agua potable que abastece a una población de 5 millones de personas en el Sur y el Este de Florida, además de proporcionar agua a la industria y agricultura. Tiene unos 60 m. de espesor y es un acuífero de arenas y calizas, no confinado, con transmisividades de  $62.100 \text{ m}^2/\text{día}$  y coeficiente de almacenamiento de 0.2.

La intrusión salina y la contaminación superficial son dos riesgos permanentes para el acuífero.

El acuífero Floridiano no está sujeto a estos ries-

gos de contaminación. Abastece a toda la costa del Golfo al Norte de Tampa. En el Sur de Florida contiene aguas saladas y se utiliza para inyectar aguas residuales urbanas depuradas. Al Sur de Tampa el agua salobre presente en el acuífero es una fuente de agua dulce. Mediante el tratamiento por ósmosis inversa y la utilización de la tecnología ASR (Acuífer Storage Recovery) de almacenamiento y recuperación en el acuífero.

**7.2. Un caso histórico a imitar. San Petesburgo (Fig. 5).**

**7.2.1. Consideraciones generales.**

En 1971, la EPA identificó a la Bahía de Tampa como la costa más contaminada de USA y el SWFWMD consideró a San Petesburgo (250.000 h. al W de Tampa, Florida) área con problemas de abastecimiento en agua; es decir que no se podría utilizar el agua potable para riego.

En respuesta a aquellos problemas y a la legis-

lación, que requería, o tratamiento avanzado de las aguas residuales (incluyendo la remoción de nitrógeno), o el vertido cero, la ciudad amplió sus plantas de tratamiento para producir un efluente casi potable pero sin quitarle N (10 - 18 mg/l) ni P.

Bajo la ciudad existe un acuífero salinizado como consecuencia de la masiva extracción de agua subterránea en los años 30. En la actualidad el agua, 2600 l/s, proviene de pozos situados en el Condado de Pasco 60 km. al Norte. Hay cuatro plantas de tratamiento de agua residual con una capacidad aproximada de 3000 l/s y 10 pozos de inyección.

Se dejó entonces de verter a las aguas superficiales usando el efluente tratado como agua de riego para zonas de jardines y recreo, o zonas de negocios, mediante una red de agua reciclada. Se construyeron sondeos de inyección profunda como una alternativa del sistema de riego, en los que se bombearía al acuífero salado, situado debajo de la península de Pinellas, cuando la demanda de agua en época de lluvia fuera inferior a la descarga de la planta y la capacidad de almacenamiento no fuera suficiente, o la calidad no alcanzara los mínimos requeridos. Esta operación se consideró más rentable que tratar el efluente hasta un nivel más avanzado.

En 1990, más de 900 l/s de agua tratada de emplean en riego diariamente por 5000 clientes. Para el año 2000, San Petesburgo atenderá a 17000 clientes y se regarán casi 7000 has. con un agua de muy buena calidad (3 mg/l de SS).

Como consecuencia de la utilización en riego del agua depurada, no ha habido incremento de la demanda de agua potable y no ha sido necesaria la expansión de la depuradora de 2600 l/s. Los gastos hasta la fecha han sido de 100 millones de dólares.

**7.2.2 Sondeos de inyección.**

Existen 10 pozos de inyección en las 4 plantas de tratamiento. Hay 2 de 30 pulgadas, tres de 24 y tres de 20 que inyectan el exceso de agua tratada mediante sondeos sin entubar en la zona de inyección, en un acuífero confinado entre 230 y 400 m bajo la superficie del terreno.

La zona de inyección está

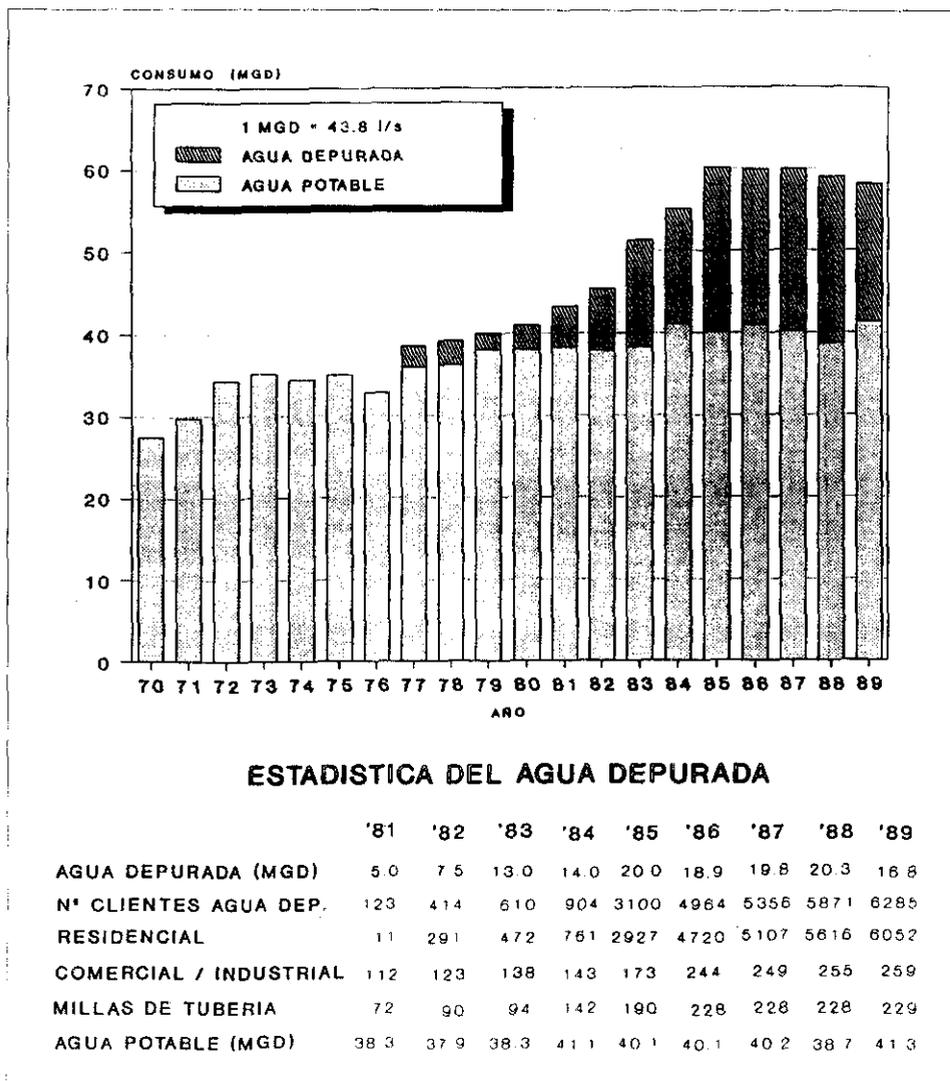


Figura 5. Ciudad de San Petesburgo. Consumo de agua potable y depurada. (Johnson, 1991).

muy fracturada y los pozos tienen una capacidad entre 400 l/s y 1000 l/s. La zona de inyección en San Petesburgo aflora en el Golfo de Méjico, a cientos de millas al W.

El tiempo de tránsito del agua tratada es miles de años y tiene lugar una mezcla y dilución considerable.

Hay un elevado número de pozos monitores para controlar el nivel de agua y la calidad.

Puesto que los pozos de inyección son una

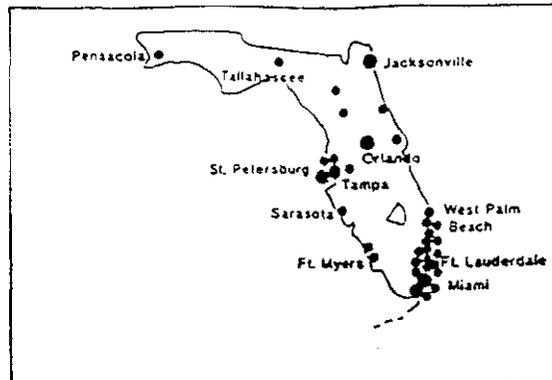
alternativa a los sistemas de reutilización del agua, el flujo inyectado varía considerablemente.

En periodos secos casi no se usan; sin embargo, en la época de tormentas y huracanes se usan al máximo de su capacidad.

Tener los pozos de inyección como alternativa permite servir al cliente en base a la demanda y proporcionar protección al agua de superficie puesto que no hay vertido en aguas superficiales.



Proyectos de reutilización en Florida



Las 35 ciudades mayores de Florida

Tabla (a)

COSTO PARA EL USUARIO DEL AGUA TRATADA			
Localidad	Comienzo de operación	Método de reuso	Costo al cliente
Altamonte Springs	1989	Riego	Residencial 8\$/mes Comercial 0.5/1000 gal
Cape Coral	1990	Riego	Residencial 8.5\$/mes
Cocoa Beach	1985	Riego	Residencial 6\$/mes
Dunedin	1991	Riego	0.55\$/1000 gal
Encon (Jupiter)	1985	Riego	0.275\$/1000 gal
Largo	1987	Riego	0.205\$/1000 gal
Naples	1983	Riego	0.065\$/1000 gal
Orange County	1986	Refrigeración Creación de humadales cítricos, golf Parques, riego	Sin cargo al usuario
Sanford	1990	Riego	3.25\$/mes cargo básico 0.055\$/1000 gal
San Petesburgo	1977	Riego	Residencial 10.36\$/acre o menos 8.125 por cada acra adicional al mes Comercial 0.303/1000 gal
Carpon Springs	1989	Riego	0.533\$/1000 gal

Tabla (b). Crecimiento de la reutilización en Florida.

	1966	1990	Aumento
Número de Proyectos de Reutilización	118	199	69%
Capacidad de reutilización (mgd)	362	526	45%
Caudal reutilizado (mgd)	206	266	29%
Caudal de agua residual doméstica (mgd) (a)		(b) 1000	
Porcentaje reutilizado	-----	-----	27%

Notas: (a) Cantidad de agua residual tratada en grandes plantas  
(b) Datos no disponibles  
(c) 1 mgd = 44 l/s

Figura 6. (Florida Water Journal, 1991).

El caudal y presión de los pozos se monitoriza continuamente y, si hay colmatación, se restablece la capacidad de inyección mediante acidificación.

El alcantarillado drena agua salada de los acuíferos con lo que las depuradoras producen a veces agua inaceptable para riego. Se aprovecha el 40 % del agua de abastecimiento que supone un 30 % del abastecimiento total.

El agua dulce por difusión y convección se separa del punto de inyección no siendo posible la recuperación de agua dulce que era la idea primitiva, como consecuencia del gran espesor y transmisividad del acuífero calizo.

La reutilización es una solución realista, no hay razón para depurar el agua y luego tirarla.

El coste del agua reutilizada, que es función principalmente de la longitud de la conducción, varía entre 10 y 20 pts/m<sup>3</sup>. Aunque es necesario un análisis de costo de cada proyecto, en una planta con tratamiento secundario se puede implementar un sistema de aprovechamiento para 200 l/s de agua depurada por un costo entre 1200 y 1700 millones de pesetas. En Florida la utilización de agua depurada ha aumentado un 30 % en los últimos años y actualmente se utilizan unos 13000 l/s procedentes de depuración de agua residual. Este caudal es del orden del que actualmente se trasvasa del Tajo al Segura (Fig. 6).

### 7.3. Inyección en sondeos profundos.

En zonas con grandes variaciones estacionales de población y condicionantes climáticos extremos como Florida, para hacer frente a una demanda irregular o condiciones meteorológicas cambiantes ha sido de gran utilidad la inyección en sondeos profundos.

El único uso de la mayor parte de los acuíferos salinos es su empleo como depósito de aguas residuales depuradas. Se requiere que el acuífero esté aislado del resto del ambiente. Las aguas residuales son típicamente más calientes, menos salinas y densas que el agua del acuífero y formarán, cuando se inyectan, grandes burbujas bajo el nivel confinante. El agua de buena calidad con tratamiento terciario puede ser almacenada en grandes cantidades para ser bombeada después como recurso.

Si el espesor es grande y la permeabilidad elevada, la difusión en la interfase es muy rápida y el agua almacenada se hace salada en un corto periodo de tiempo.

La inyección en sondeos profundos se puede realizar en:

- Acuíferos salinos sin recuperación del agua inyectada, como en la zona de Miami, donde después de un tratamiento primario se inyecta ; o en combinación con sistemas SR o RIB, como en San Petesburgo, cuando el agua depurada no satisface los requisitos del riego. Esta técnica evita el vertido y, por tanto, los

elevados gastos de capital de una depuración avanzada. En este caso el almacén debe tener un nivel confinante por encima y por debajo para evitar la contaminación de los acuíferos adyacentes y el agua de formación ser de elevada salinidad para que no pueda tener otro uso. En USA se ha puesto un límite de 10 gr/l porque se cree que será el límite de rentabilidad para la desalinización por ósmosis inversa.

- Acuíferos de agua dulce con recuperación posterior, utilizados en abastecimientos públicos o riego. En este caso las restricciones institucionales suelen ser muy estrictas. Cada proposición de pozo de inyección debe ser examinada y los requisitos varían en función del tipo de efluente, caudal de inyección, uso del acuífero, etc. La tecnología es bien conocida y existe una gran experiencia, puesto que desde los años 40 se han inyectado salmueras en el subsuelo sin riesgos especiales.

### 7.4. Tratamiento por ósmosis inversa e inyección del agua residual en Sarasota y Charlotte (Fig. 7).

#### 7.4.1. Consideraciones generales

En un área de 250 millas cuadradas entre Sarasota y Charlotte hay un sistema hidrogeológico

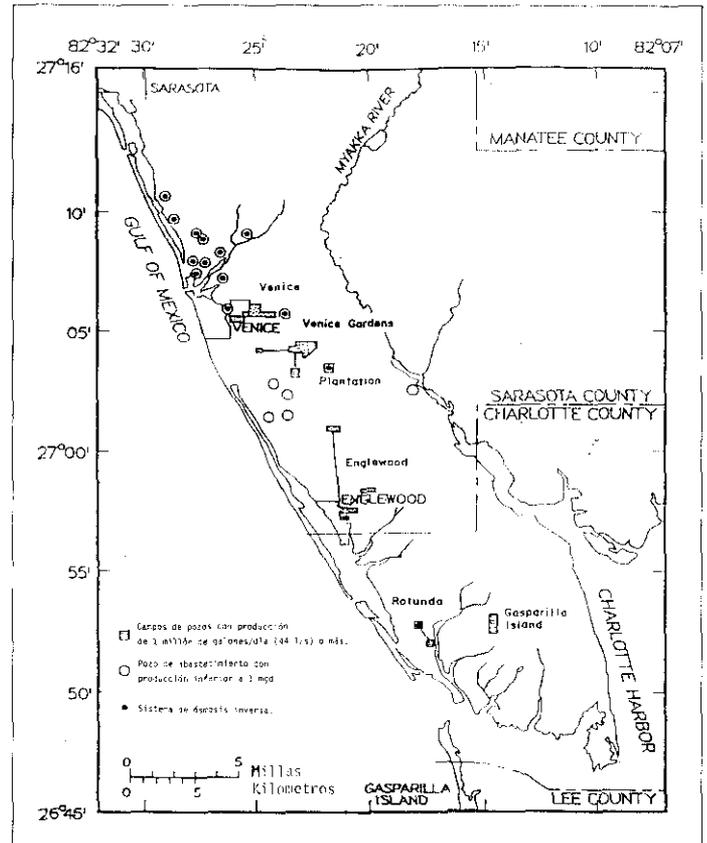


Figura 7. Sistemas de abastecimiento entre Sarasota - Charlotte. (Hutchinson, 1991).

muy complejo, con calidades de agua muy diversas. Los sistemas acuíferos superficiales e intermedios, el Floridiano Superior y Floridiano tienen seis niveles acuíferos separados con una potencia total de 700 metros.

El agua en el acuífero superior clástico es potable y se explota por centenares de sondeos superficiales de poca producción. En el acuífero intermedio en el que alternan carbonatos y areniscas el agua es potable en la parte superior, pero la inferior a causa del incremento de salinidad, se utiliza principalmente para la alimentación de las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa y riego. El Floridiano Superior también se utiliza para abastecimiento a las plantas RO.

La unidad semiconfinante Swanee - Ocala condiciona la transición de agua salobre a muy salada.

La formación Avon Park, muy permeable y con alta salinidad se utiliza como zona de inyección.

En la zona considerada hay siete emplazamientos para inyección con una capacidad de 29 Mgd (1320 l/s) en una zona entre 350 y 700 metros bajo la superficie. Se empezó a inyectar agua residual de RO en 1984. Se ha realizado un modelo para evaluar los diseños de pozos de inyección y el potencial de admisión de agua inyectada a un ritmo de 43.8 l/s durante 10 años.

#### 7.4.2. RO en Englewood.

En Englewood la mala calidad del agua fue crónica históricamente al abastecerse de pozos poco profundos vulnerables a la contaminación. Los primeros 20 pozos de abastecimiento de 15 a 30 metros de profundidad proporcionaban 0.3 Mgd en 1964. En 1975, 43 pozos se agrupaban en dos campos y proporcionaban 1 Mgd con una concentración en sólidos disueltos entre 500 y 600 mg/l. Un tercer campo, 3 millas al Norte de la ciudad comenzó a bombear en 1980. Poco después comenzó la contaminación del tercer campo a causa de unos pozos abandonados próximos. En 1985 se puso en marcha una planta desalinizadora RO, nueve pozos de 150 metros de profundidad y un pozo de 600 metros para la inyección de agua residual de la RO que tiene una salinidad doble del agua influente. La planta tiene una capacidad de 3.6 Mgd (158 l/s) de agua dulce. El pozo de inyección se instaló para cumplir con el requerimiento del FDER para un vertido seguro del agua, que tiene niveles elevados de radio.

Ha habido un aumento en la concentración de TSD de 14000 mg/l en 1988 a 18000 mg/l en 1989. Esto indica un incremento correspondiente en el agua de alimentación de los nueve pozos de bom-

beo. Esto hay que atribuirlo a un incremento en TDS al aumentar la demanda.

#### 7.4.3. La desalinización por ósmosis inversa.

El proceso de depuración por ósmosis inversa (se pasa el agua por una membrana y las impurezas quedan retenidas) es muy efectivo en aguas costeras salobres. Los costos se incrementan de manera lineal al incrementar la salinidad y en el momento actual no es rentable ni práctico el tratamiento del agua del mar.

Aunque cada vez se acerca y admite comparación con los costos de sistemas tradicionales, los contaminantes atascan las membranas y la RO necesita investigación para encontrar mejores sistemas de filtración y limpieza.

Florida tiene el mayor número de instalaciones RO con 100 instalaciones en 1988 variando el tamaño de 0.6 l/s (el sistema portable que se utilizó en la guerra de Kuwait) a 13 Mgal/d (Cape Coral, Sarasota, Sanibel, Rotunda Beach) para complementar los abastecimientos municipales. La extensa costa de Florida proporciona un abastecimiento ilimitado de agua salobre que se puede transformar en agua potable.

Las aplicaciones de las membranas incluyen la eliminación de la dureza, remoción de orgánicos (color y precursores de Trihalometanos) y remoción de inorgánicos específicos.

La RO está siendo cada vez más tomada en consideración cuando los problemas causados por los fertilizantes son mayores. El rechazo de nitratos por algunas membranas es muy elevado. Poliamidas composite de baja presión dan un rechazo Nitrato y Sodio de 93 - 97 %.

Un sistema RO de 4 MGD en operación desde 1990 trata agua en Arlington, California conteniendo 90 mg/l  $\text{NO}_3^-$  y 1200 mg/l TDS. El permeado se mezcla con 2 MGD para producir 6 MGD con niveles de nitratos menor de 40 mg/l y 500 mg/l. El costo estimado del agua es 1 \$/1000 galones - 30 pts/m<sup>3</sup>.

Los costos de una planta de 4 MGD con un agua salobre de 2 gr/l basados en los costos de plantas de 1 a 6 MGD construidos entre 1988 y 1991 (SURATT, 1992) son los siguientes:

En Palm Beach en una planta en construcción de 14 MGD (616 l/s) está previsto un costo de \$ 27.4 ~5 MP/l/s.

#### 7.5. Almacenamiento y recuperación en el acuífero ASR.

##### 7.5.1. Generalidades.

El almacenamiento y recuperación en el acuí-

fero (ASR) empezó almacenando agua potable tratada en un acuífero adecuado durante los meses "húmedos" y recuperándolo en los "secos" para cubrir los picos de la demanda que excedían la capacidad de tratamiento de las plantas. El agua recuperada solo se desinfectaba, sin más tratamientos. Esta técnica permite a una planta cubrir mayores puntas de demanda sin una expansión de la planta y típicamente a menos de la mitad de costo. Aunque hay muchas semejanzas con la tecnología de recarga, se distinguen los ASR por la utilización de sondeos con un doble fin, recarga y recuperación. Sondeos de inyección se han utilizado con frecuencia para recargar acuíferos con agua proveniente de los más variados orígenes incluido el efluente de plantas de tratamiento de aguas residuales. Es también práctica común retener las aguas de tormenta en zonas permeables para que percolen al acuífero. Las ventajas de los ASR comparados a los métodos tradicionales en recarga son mínimos requerimientos de permisos, puesto que es despreciable el riesgo de patógenos, que se debe considerar cuando se inyecta agua superficial no tratada o efluente de agua residual tratada, y la no colmatación de sondeos o mantenimiento costoso de las balsas de infiltración o, riesgo cuando se inyectan aguas de tormenta con muchos sólidos en suspensión.

Aunque la tecnología es nueva hay más de 10 ASR funcionando en USA y más de 20 en investigación en Florida, California, Utah, etc.

Peace River se ha expandido de 1 a 5 Mgd, Cocoa de 6 a 9 en 1989 y Port Malabar tiene (1 Mgd~44 l/s).

### 7.5.2. ASR en Los Cayos

El almacenamiento de agua potable en acuíferos con agua salobre o salada para recuperarla en las puntas de demanda constituye una técnica muy interesante.

Un acueducto de 120 millas con 42 puentes lleva el agua a Cayo Hueso después de abastecer a 39 islas, desde la planta de tratamiento en Florida City. La capacidad de los depósitos superficiales está limitada por el alto costo de la tierra y los problemas con los huracanes. La capacidad del acueducto es de 13.5 Mgd.

Los requerimientos hidrogeológicos son acuíferos poco potentes, bien confinados y de baja permeabilidad. Es preciso evitar la mezcla excesiva entre el agua nativa y la inyectada. El porcentaje de recuperación, debido al alto coste del agua, debe ser importante.

Las características del acuífero son  $T = 8000$  gpd/ft y coeficiente de percolación 0.002/día y agua nativa con 20000 mg/l. Capacidad específica 4 gpm/ft. Se inyectan 5 Mgd y el agua se recupera

hasta que la calidad alcanza los 250 mg/l de cloruros. El costo es 2 millones de \$ el ASR en acuífero frente a los 70 millones de \$ que costarían si se hicieran instalaciones de almacenamiento en superficie.

Los costos de capital de sistemas ASR son mayores para el primer sondeo, que lleva las cargas completas de viabilidad, ingeniería, modelización, permisos, monitorización de la calidad del agua y ensayos de bombeo. Un costo típico puede ser de \$ 200000 a 500000 por Mgd de capacidad de recuperación. Los sondeos posteriores serán menos costosos.

### 7.6. El sistema BARDENPHO.

Ante las restricciones cada vez más fuertes que el Departamento de Regulación Ambiental de Florida impone (FDER) ha tenido un gran desarrollo el sistema BARDENPHO, iniciado por James Barnard en 1972, que consiste en un sistema de fangos activados en etapas en el que alternan zonas anaerobias anóxicas y aeróbicas para eliminar los nutrientes sin requerir cantidades significativas de aditivos químicos.

Por ejemplo, en la planta de Buenaventura Lakes, reconvertida al sistema BARDENPHO, se ha conseguido a partir de un influente:

DBO<sub>5</sub> 285 mg/l; SS 200 mg/l; N total 39 mg/l; P total 9.1 mg/l

un efluente de calidad:

DBO<sub>5</sub> 2.2 mg/l; SS 1.9 mg/l; N total 0.8 mg/l; P total 0.12 mg/l.

El alto rendimiento y bajo costo de estos sistemas permite cubrir todo tipo de demandas desde el pequeño cliente a grandes plantas con criterios muy restrictivos sobre el efluente.

El costo de adaptación de una planta convencional al sistema para 1.5 Mgd (65 l/s) es de unos 3 millones \$ y los de mantenimiento y operación anuales de 70.000 \$.

Existen en la actualidad 34 plantas en USA, de ellas 18 en Florida, que tratan 200 Mgd de efluentes municipales e industriales a niveles de agua potable.

El tratamiento biológico avanzado es una tecnología de resultados económicos y técnicos probados.

## 8. Algunas consideraciones sobre el aprovechamiento de los acuíferos Atlántico-Mediterráneos en España (Fig. 8)

### 8.1. Consideraciones Generales

La intensa actividad agrícola, industrial y turística en las zonas litorales en las últimas décadas ha llevado a una explotación intensa de los acuíferos

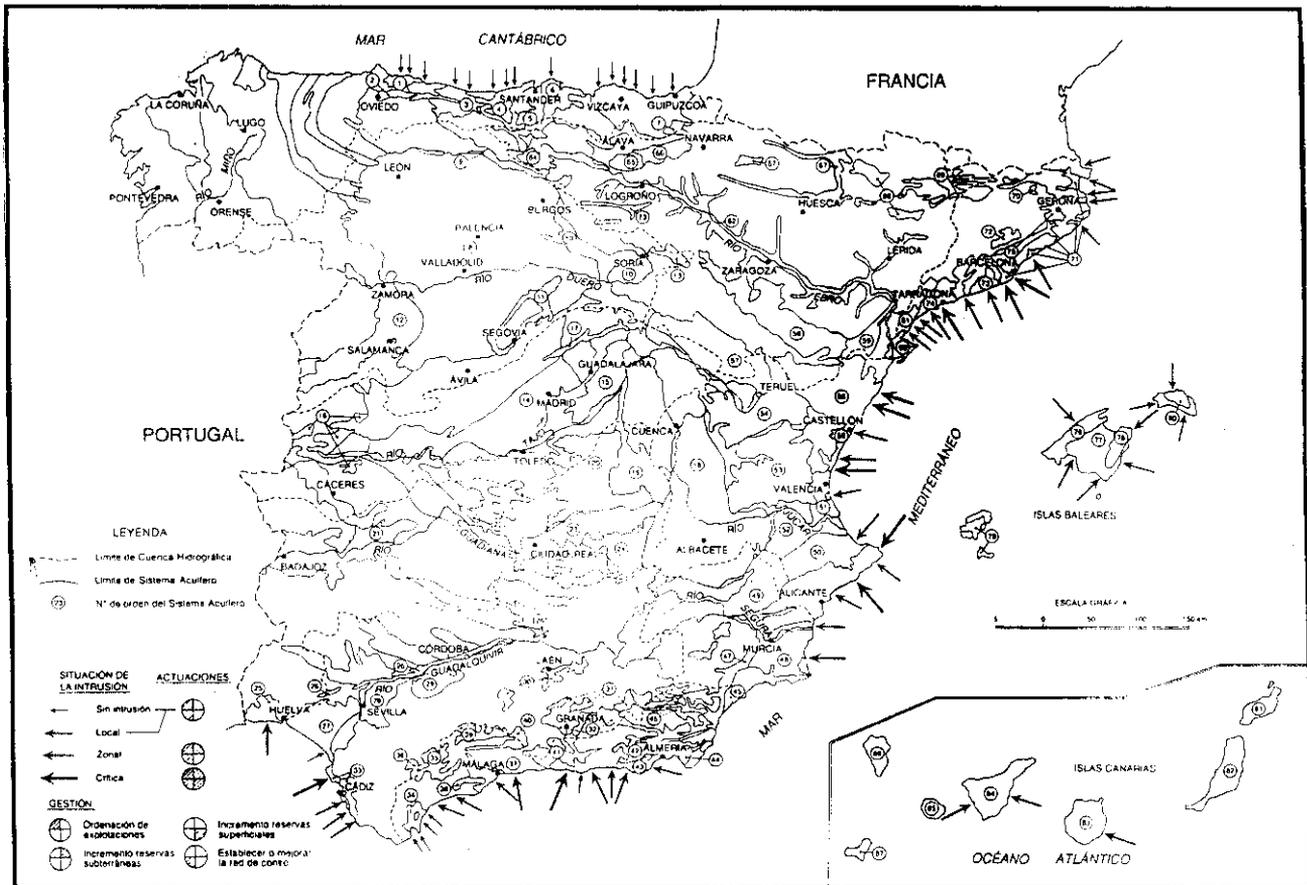


Figura 8. Mapa de situación de la contaminación por efecto de la intrusión marina. (López Geta, 1990).

costeros, realizada sin una planificación adecuada, que ha originado numerosos problemas de contaminación: aumento del contenido en cloruros, como consecuencia de la intrusión del agua del mar, y de nitratos a cifras verdaderamente inadmisibles y a la degradación de la calidad de las aguas litorales como consecuencia de una falta de planteamiento correcto en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

A continuación se considera como, mediante el uso de las técnicas descritas, reutilización de aguas depuradas urbanas, empleo de los sistemas acuíferos costeros como embalses reguladores, almacenamiento de agua dulce en agua salada, depuración por el terreno, desalinización de agua salobre por ósmosis inversa, que no son de futuro sino algo común y en las que hay numerosos expertos, y que están recomendadas reiteradamente en numerosas publicaciones e informes. Se podrían resolver la mayoría de los problemas en las cuencas donde la sobreexplotación y la contaminación por nitratos es más grave.

## 8.2. Las posibilidades de Reutilización de agua depurada (Cuadro I)

En el libro del MOPU "Las Aguas en España" 1977, se dice "En zonas costeras, donde los vertidos

municipales e industriales, que se descargan en aguas saladas (océanos, mares, bahías o estuarios) se traducen en pérdidas para el ciclo de agua dulce, el tratamiento y la reincorporación al citado ciclo constituye una nueva fuente de suministro". Si se tiene en cuenta que una gran parte de la población española se concentra en ciudades costeras, resulta evidente que de cara al futuro la reutilización de sus aguas residuales será una de las fuentes más importantes de recursos adicionales. Sin embargo, como ya se ha indicado en los balances actuales y futuros realizados, se han considerado como consumos la totalidad de las demandas en las cuencas costeras. La importancia del tratamiento de los vertidos queda bien patente si se observa que los correspondientes a las cuencas Sur y Júcar (1380 Hm<sup>3</sup>/año) serían suficientes para atender el 80 % de la demanda no atendible con recursos propios y trasvases en el litoral mediterráneo al Sur del Ebro.

ALMAGRO ACOSTA (1991) da, para una población de 25 millones de habitantes en la España árida, un recurso de agua residual urbana depurada de 1825 Hm<sup>3</sup>/año.

A pesar de los años transcurridos, en los balances sigue despreciándose el agua depurada reutilizable en las zonas costeras.

La reutilización es particularmente interesante

	MOPU 1977		PLAN HIDROLOGICO 1992			DEFICIT		
	Consumos Abastecimiento		Demandas	Consuntivas	Abastecimiento	MOPU 77 Mendiluce 90 Plan Hidrologico		
	1977	2010				1992	2002	2012
SUR	185	505	284	390	471	596	228	258
SEGURA	20	50	168	236	305	1976	797	845
JUCAR	355	1220	559	692	901	1607	1203	910
PIRINEO ORIENTAL	725	2405	676	834	1074	1125	1610	428
	1285	4180	1687	2152	2751	5304	3838	2441

Cuadro I. Consumos, abastecimientos y déficits en el balance. (Hm<sup>3</sup>/año).

en las zonas costeras, donde la tendencia es al aumento de población, donde ya no puede haber problemas con usuarios aguas abajo y el destino final del agua es un mar extraordinario y lamentablemente contaminado.

Es importante la consideración de los acuíferos costeros, no solo por sus recursos, que son importantes, sino además por su papel en la regulación de los recursos adicionales que pueden aportar las aguas residuales depuradas y la ósmosis puesto que existe una estacionalidad en la afluencia turística y en el uso en regadío. Además por el costo del terreno y condiciones geomorfológicas es difícil encontrar cerradas, adecuadas para la construcción de presas, que tendrían unas notables pérdidas por evaporación.

La reutilización de agua depurada en los grandes núcleos urbanos costeros de Barcelona, Valencia, Tarragona, Alicante, Cartagena, Almería permitiría liberar grandes volúmenes de agua para riego y un mejor aprovechamiento del agua potable de calidad.

### 8.3. Otras fuentes de agua de calidad

Existen muchos millones de m<sup>3</sup> de aguas salobres con menos de 7 gr/l y con más de 50 mg/l de nitratos que mediante la utilización de ósmosis inversa o sistemas de depuración tipo Bardenpho podrían ser utilizadas y además conseguir la regeneración de los acuíferos. El estudio debe realizarse caso por caso y las condiciones locales geológicas, topográficas y socioeconómicas, deberán ser tenidas presentes en las tomas de decisión.

### 8.4. Posibilidades de utilización de aguas residuales depuradas, ósmosis inversa y otras técnicas para un mejor aprovechamiento de los acuíferos costeros

#### 8.4.1. Las Planas Costeras de la Cuenca del Júcar

En los trabajos de BATLLE (1989) y CASTILLO - LOPEZ GETA (1989) se dan para los acuíferos coste-

ros de la Cuenca del Júcar, Planas de Sagunto, Castellón-Benicásin, Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peñíscola una explotación de reservas del orden de 25 Hm<sup>3</sup>/año cuya consecuencia ha sido una salinización importante de la zona de Moncofar y algo menor en Oropesa-Torreblanca y Vinaroz-Peñíscola.

Otro aspecto a tener en cuenta es el elevado contenido en nitratos de los acuíferos que en general sobrepasan los 50 mg/l máximo admitido.

Los 400.000 habitantes de la zona Castellón-Benicásin, con una dotación de 200 l/hab/año, suponen unos recursos de 30 Hm<sup>3</sup>/año. Los 80000 habitantes de la Plana de Sagunto 6 Hm<sup>3</sup>/año.

La existencia de una sedimentación canalizada de arenas, areniscas y gravas alternando con margas y arcillas, con un espesor medio de 50 - 100 m. favorecen a cualquiera de los tipos de tratamiento por el terreno y empleo de agua depurada. Se deben emplear en la depuración sistemas que eliminen los nitratos y en las zonas salinizadas emplear la ósmosis inversa.

En cuanto al empleo del subsuelo falta realizar una adecuada definición geométrica de los acuíferos para que puedan llevar a cabo sus funciones de regulación, dada la gran estacionalidad de la población turística y del riego.

En la Plana Vinaroz-Peñíscola con 40000 habitantes se podrían reutilizar 3 Hm<sup>3</sup>/año y desalinizar 1.5 Hm<sup>3</sup>/año con lo que se podrían equilibrar bombeos y recursos. La de Oropesa-Torreblanca, si fuera necesario, se podría complementar desde Benicásin.

Otra circunstancia a considerar son los recursos posibles liberados por la reutilización de agua de Valencia que con 2 millones de habitantes suponen 150 Hm<sup>3</sup>/año.

#### 8.4.2. Cuenca del Segura

En la Cuenca del Segura con unos recursos superficiales de 525 Hm<sup>3</sup>/año y unos aportes desde 1978 por el trasvase Tajo-Segura, nunca superiores

a 400 Hm<sup>3</sup>/año ha habido en los últimos años un notable desequilibrio hidráulico que ha llevado a una sobreexplotación de 315 Hm<sup>3</sup>/año, aproximadamente el 50 % del total nacional.

En el Campo de Cartagena existió una sobreexplotación de 42 Hm<sup>3</sup>/año pero en el momento actual se encuentra equilibrado e incluso hay un exceso de recarga por los riegos del trasvase. Hay zonas próximas con graves problemas en el Bético de Murcia con una sobreexplotación de 35 Hm<sup>3</sup>/año y particularmente en Mazarrón donde la explotación de 25 Hm<sup>3</sup>/año y los recursos solo de 2 Hm<sup>3</sup>/año, (Aguilas -Cala Reona y Cope-Cala Blanca).

Hay unos 650000 habitantes que pueden originar unos recursos de agua depurada de 50 Hm<sup>3</sup>. En el campo de Cartagena existen también grandes volúmenes de agua salobre con salinidades bajas (1-6 gr/l) que en parte se explotan mezcladas con aguas del trasvase. las grandes reservas de los acuíferos Andaluciense 1000 Hm<sup>3</sup>, Plioceno 250 Hm<sup>3</sup>, Cuaternario más de 1000 Hm<sup>3</sup> permitiría desalinizar un volumen importante y liberar un volumen de agua de abastecimiento para recargar los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Segura. Una ventaja suplementaria es que existe un elevado número de sondeos para realizar cualquier explotación o recarga y una red de transporte de agua con al que podría hacer una recarga muy versátil.

#### 8.4.3. Almería

Ha sido en Almería donde por su particular situación y el extraordinario valor del agua se han realizado algunos intentos de desalinización de acuíferos salobres (Andarax) o inyección de agua depurada (El Ejido) que no dejan de ser muy tímidos.

En el Campo de Dalías donde existe un déficit de 35 Hm<sup>3</sup>/año y agudos problemas de intrusión marina, se presenta con bajo Andarax como una zona de gran interés económico para la reutilización de las aguas residuales de Almería y Dalías que pueden suponer más de 20 Hm<sup>3</sup>/año y la realización de ensayos de ósmosis inversa.

Las zonas costeras de Huelva, Málaga y los acuíferos costeros catalanes y en especial las áreas metropolitanas de Barcelona y Tarragona, ofrecen por supuesto un innegable interés en el aprovechamiento de sus sistemas detríticos costeros, por la estacionalidad del recurso y del riego.

#### 8.5. Conclusión

La reutilización de aguas residuales urbanas depuradas, el tratamiento con ósmosis inversa, el empleo de acuíferos en la regulación pueden suponer unos recursos entre 2000 y 4000 Hm<sup>3</sup>/año. En los ejemplos de Florida hay una estimación de costes. En

muchos de los estudios hidrogeológicos existentes, ya hay anteproyectos muy elaborados. El conseguir aprovechar las cifras indicadas no se va a dar gratuitamente ; hay que hacer un esfuerzo importante, estudiar las distintas alternativas y empezar por los casos social y económicamente más evidentes.

Dentro de los Estudios de Infraestructuras deberían incluirse estudios con la tecnología más actual de los acuíferos costeros. Hay que definir bien geoméricamente los acuíferos, saber de donde viene y a donde va el agua.

Hasta ahora se ha trabajado en hidrogeología con técnicas derivadas de las necesidades del abastecimiento de agua. Ahora son necesarias técnicas más precisas y entre otras la definición de permeabilidades en función de la posición vertical. Es preciso gastar dinero en técnicas geofísicas de superficie, de sondeos y tomografía sísmica y en la realización de sondeos y pozos de monitorización.

Todas las tecnologías relacionadas con la depuración, desalinización, almacenamiento y aprovechamiento de acuíferos pueden dar origen a una industria de futuro que podría ser un elemento económico dinamizador en la situación desesperanzadamente desindustrializadora que nos encontramos.

#### Bibliografía

Baonza E. y Plata A. **Hidrogeología de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zonas de influencia.** Cuadernos de Investigación 67. MOPU 189 pp.

Benavente y López Vera 1986. **Análisis preliminar del contenido en 18O en los acuíferos de Granada.** El agua en Andalucía, Vol II pp. 13 - 24. Granada.

Berry A. y Hanshaw (1960). **Geologic field evidence suggesting membrane properties of shales.** 21 Int. Geolog. Cong. Copenhagen.

Centro de Estudios Hidrográficos (1977). **El agua en España.** Dirección General de Obras Hidráulicas. MOPU.

Fetter C.W. (1988). **Applied Hydrogeology.** IAH.

Gasparini A. Fontes J. **Primeros datos sobre las características químicas e isotópicas del agua subterránea del macizo ofiolítico de Amurfo.** Gran Canaria. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Vol XI, pp. 281 - 298. Palma de Mallorca.

IGME. (1988) **Calidad de las A.S. en la Cuenca Baja del Segura y costeras de Alicante.** S P Mine.

Lozier J. (1992). **Membrane. Processes in water treatment.** FWRJ.

López Geta J.A. (1989). **Contaminación de las aguas subterráneas en España.** Libro a la memoria de Jorge Porras. ITGE.

Manzano M. y Custodio E. (1987). **Misterio de agua intersticial en acuitardos. Aplicación al delta del Llobregat. Hidrología y Recursos Hidráulicos.** Tomo XI. pp. 883 - 897. Palma de Mallorca.

Martín Mendiluce J.M. y Gil Egea J.M. (1990). **Infraestructuras en España. Carencias y Soluciones. (La Infraestructura Hidráulica).** Instituto de Estudios Económicos.

Rodríguez Estrella T., Mora Cuenca V. y Solís L. (1989). **Factores geológicos y antrópicos que determinan la calidad del agua subterránea en la región de Murcia.** Libro a la memoria de Jorge Porras. ITGE.

Solís García-Barbón L., Mora Cuenca V. y Rodríguez Estrella T. (1988). **Situación de la intrusión marina en la Cuenca del Segura.** Simposio Internacional TIAC'88. Almuñecar. Granada.

Suratt W. (1992). **Estimating the costs of membrane water treatment plants.** FWRJ.

Thauvin Helix J.P. (1974). **Contaminación marina fósil en la Vega baja del Valle del Segura.** Doc. Inv. Hidrol. número 16. San Sebastian.

**Comentario.- (Javier Angel Ramírez).**

Yo sólo quería hacer un pequeño comentario, y es que los humedales que es precisamente el tema que yo ahora mismo estoy estudiando en mi tesis doctoral pues tienen una parte muy interesante, que es que el agua que entra muchas veces no es igual que el agua que sale, es decir, se transforma y tienen una parte de la que hemos hablado muy poco que es el interés de esa transformación. Los humedales muchas veces sirven para tratar aguas contaminadas y en países del mundo que están más desarrollados que nosotros se utilizan en minas -yo soy de la Escuela de Minas- para tratar aguas que principalmente, bueno son aguas ácidas que tienen metales en suspensión y se pueden utilizar tanto humedales naturales como artificiales, entonces el interés de construir humedales no sólo es que son muy bonitos sino que el agua que sale pues a veces es interesante que pase por esos humedales. ¿Qué interés pueden tener estos humedales?, pues desde el punto de vista de las minas que no será el mismo que el punto de vista de una fábrica, pues para el minero es interesante en cuanto que si el río va negro no sólo es lo feo que queda sino que va negro porque se lleva el carbón y si va tinto no sólo lo feo que quede sino que va tinto porque se lleva el hierro y el cobre, bueno pues hay un interés económico y por otro lado como muchas veces ocurre como ahora que los precios del mercado mineralúrgico está muy bajo pues ese interés económico no es lo suficientemente elevado y a veces interesa que haya una presión ecológica que a veces es muy interesante.

**Respuesta.- (Fernando Pendás).**

Evidentemente los humedales como elemento depurador tienen una gran importancia, incluso yo creo que en nuestro país según he leído ahora en los informes de Puntaumbria, Isla Cristina y otros, la depuración de las aguas residuales urbanas fundamentalmente se hace en los humedales. Entonces efectivamente si se hace también en las minas puede ser una gran ayuda. El río Tinto dices que tiene mal color; yo creo que no es por las minas. Se llama Tinto de toda la vida y es que la madre naturaleza es uno de los mayores contaminadores que hay, y muchas veces no se pueden hacer muchas cosas para luchar contra un contaminador tan poderoso.