

La explotación de las aguas subterráneas y su implicación en la desertización^(*)

A. Pulido Bosch

Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería. 04120-Almería. E-mail: apulido@ual.es

RESUMEN

La explotación racional de las aguas subterráneas constituye un elemento clave en el desarrollo económico de un país, área o región. En las regiones de clima semiárido o árido el agua subterránea tiene un interés estratégico. La explotación intensiva o incontrolada de las aguas subterráneas puede ocasionar, en determinados casos, ciertos problemas ambientales que favorezcan los procesos de desertización. En terrenos arenosos, el descenso del nivel freático puede favorecer la erosión eólica, la formación y el avance de las dunas. En regiones de gran aridez, el regadío con aguas de elevado contenido salino puede salinizar los suelos, obligando al abandono de tierras. Frecuentemente, la contribución de la explotación de las aguas subterráneas en los procesos de desertización queda enmascarada por la intervención sinérgica de muchos otros factores, más visibles y activos. Serían necesarios estudios específicos sobre la cuestión con el fin de determinar las posibles actuaciones erróneas que contribuyen al desarrollo de los procesos de desertización. Los aspectos teóricos se ilustran con tres ejemplos de explotación intensiva de acuíferos (Crevillente y Campo de Dalías en España, y Tozeur-Douz, en Túnez).

Palabras clave: Aguas subterráneas, Desertización, Explotación intensiva, Regiones semiáridas, Salinización.

Groundwater exploitation and its influence on desertification processes

ABSTRACT

Rational use of groundwaters constitutes a key element in the economic development of a country or region. In regions with a semiarid climate groundwater also has a strategic importance. The intensive or uncontrolled exploitation of groundwaters can induce, in particular cases, certain environmental processes that favour desertification. In sandy terrains the fall of the water table can favour wind erosion, and the formation and advance of sand dunes. In highly arid regions, irrigation using water with a high salinity can cause the soils to become saline, forcing the land to be abandoned. Frequently, the effect of the exploitation of groundwater on the process of desertification is masked by the synergistic intervention of many other, more obvious and more active factors. Specific studies of this issue would be required to identify the misguided activities which contribute to the development of desertification. The theoretical aspects are illustrated using three examples of intensive exploitation of aquifers (Crevillente and Campo de Dalías in Spain, and Tozeur-Douz, in Tunisia).

Key words: Desertification, Groundwater, Intensive exploitation, Salinization, Semi-arid regions.

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas constituyen con cierta frecuencia el único recurso hídrico disponible en regiones de clima árido y semiárido, teniendo el valor de recurso estratégico, único susceptible de

hacer frente a las necesidades para los diferentes usos. Si nos atenemos al caso español, se estima que en los primeros 500 m de terreno se almacenan 300 km³, mientras que la capacidad de todos los embalses que jalonan nuestros ríos no alcanza los 50 km³. Su interés desde el punto de vista agrícola se puede constatar de las cifras siguientes: de los 3,5 millones de hectáreas de regadío que hay en nuestro país 2,5 millones se riegan con aguas superficiales, para lo cual se emplean 20 km³/año; el millón restante se riega con aguas subterráneas con unos 5 hm³/año

* El contenido de este artículo coincide sensiblemente con el texto elaborado por el autor para el Curso "Las tierras mediterráneas en la frontera de la desertificación: el mayor riesgo ambiental para el siglo XXI", organizado por la UIMP, en Valencia, en octubre de 1999.

(Llamas, 1999). Domínguez (1996) da unos valores ligeramente menores. Resulta expresivo el marcado menor consumo de los regadíos con aguas subterráneas. Si nos atenemos a los rendimientos económicos, los regadíos con agua subterránea tienen una rentabilidad 5 veces superior a los que se hacen con agua superficial (*in Llamas, op. cit.*).

Queda igualmente claro que hasta los máximos detractores de las aguas subterráneas se rinden ante la evidencia de que éstas son la "salvación" en las sequías extremas que, desgraciadamente, afectan a los países áridos y semiáridos cada cierto número de años, sin que el uso conjunto aguas superficiales-aguas subterráneas sea una herramienta común en la planificación de los recursos de tales países.

Pero la explotación desordenada de las aguas subterráneas puede plantear -junto con las muchas ventajas de su uso racional y ordenado (Custodio, 1995)- una serie de problemas directos o indirectos (Llamas, 1989; Llamas y Custodio, 1999; Pulido Bosch, 1993) de índole técnica, ambiental, social, económica, administrativa y legal. Entre otros, se pueden citar el descenso de los niveles piezométricos, con el aumento consiguiente de la altura de elevación y su consecuencia inmediata de incremento de los costes de explotación; la afección a las superficies de agua libre, ya sean ríos, lagos o humedales (Llamas, 1991); la salinización de acuíferos y/o de suelos; la afección a los intereses de terceros; la inducción de colapsos -especialmente en áreas kársticas (LaMoreaux, 1991)-; los asentamientos diferenciales del terreno con la consiguiente afección a la estabilidad y funcionalidad de infraestructuras (carreteras, canales, canalizaciones subterráneas y alcantarillados). Por otro lado, los acuíferos costeros son especialmente vulnerables ante el riesgo de intrusión marina. En los Congresos de Sobreexplotación celebrados en Almería en 1989 de ámbito nacional (Pulido Bosch *et al.*, 1989) y en el Puerto de la Cruz en 1991 (IAH, 1991) se tiene un muestrario denso de la problemática a escala nacional y mundial -en el segundo de los casos- donde se describen numerosos ejemplos muy singulares y espectaculares. El segundo de los eventos fue objeto de una publicación monográfica de la IAH (Simmers *et al.*, 1992), reco-

giendo algunas de las contribuciones más relevantes.

Curiosamente, la desertización no aparece descrita de manera precisa en prácticamente ninguno de los casos, aunque parece claro que la explotación intensiva de los acuíferos puede contribuir a la desertización del medio, como trataré de mostrar en lo que sigue. Posiblemente su tratamiento específico sea poco común ante el hecho de que la explotación de los acuíferos es un factor más que queda diluido dentro de muchos otros (Puigdefábregas y Mendizábal, 1995) de entre los que sobresalen la erosión (Bryan, 1990) y la degradación de los suelos por motivos muy diversos (Sala *et al.*, 1991; Rubio y Calvo, 1996).

Igualmente resulta claro que las áreas del planeta con mayor escasez de agua son las más vulnerables a la expansión del desierto y las que más se resienten en caso de sequías eventuales (Agneur y Anderson, 1992). Son sistemas especialmente frágiles y vulnerables que carecen de margen de maniobra frente a situaciones "extremas". Es posiblemente en estas áreas donde la inadecuada gestión del agua subterránea puede resultar más impactante con respecto a la desertización.

El objetivo esencial de este artículo es analizar aquellos casos en que el uso inadecuado del agua subterránea puede contribuir al desarrollo de los procesos de desertización. También es cierto que, en muchos casos, el correcto uso del agua subterránea puede ser una garantía de mantenimiento del equilibrio y un arma de lucha contra la desertización. No obstante, aquí sólo se trata de desarrollar aquellos aspectos en los que la explotación de las aguas subterráneas puede contribuir a la desertización del medio.

EL AGUA EN EL SUELO Y LAS FREATOFITAS

Siguiendo a Westing (1995), podemos diferenciar el "agua verde" -que ocupa la franja no saturada y que es susceptible de ser utilizada por las raíces de las plantas- del "agua azul" que ocuparía todos los huecos interconectados dentro de la

franja saturada, además de los ríos, lagos y otras superficies de agua libre. Esa humedad del suelo condiciona la vida vegetal y depende, entre otros factores, de las precipitaciones -cantidad, intensidad y distribución-, granulometría del terreno y especialmente del porcentaje de la fracción lutítica, insolación, orientación de la vertiente, vegetación -densidad y tipo-, y de la permeabilidad vertical, como más relevantes. La reducción y/o eliminación de esta humedad puede tener graves consecuencias sobre la vegetación y ésta a su vez sobre la protección del suelo y sobre los procesos erosivos anexos. Frecuentemente este agua verde se puede encontrar en continuidad con el agua azul del acuífero, por lo que la afección a una de ellas tiene su influencia sobre la otra.

Las plantas freatofitas, especialmente las "improductivas", frecuentemente protectoras del medio frente a la erosión de los agentes externos, fueron consideradas durante mucho tiempo como "enemigas" del aprovechamiento racional de los recursos hídricos de una región, por lo que había que eliminarlas y, en el mejor de los casos, sustituirlas por otras de menor consumo, aunque posiblemente menos adaptadas al medio. En la lógica racional imperante hace varias décadas, los hidrogeólogos recomendaban su eliminación, dentro de una política de aprovechamiento "óptimo" de los recursos (Davis y de Wiest, 1966).

LOS EMBALSES SUBTERRÁNEOS Y SU EXPLOTACIÓN

Aunque no es el objeto de esta exposición, parece oportuno recordar que los materiales acuíferos -aquellos que almacenan y transmiten el agua- pueden constituir embalses subterráneos de dimensiones muy variables, rodeados de acuitardos y/o acuicludos que constituyen sus límites y bordes. Los aliviaderos de los embalses son los manantiales que, junto con los ríos, han sido objeto de aprovechamiento ancestral por el hombre. Este aprovechamiento normalmente requirió azudes de derivación y canales de conducción del agua. Su influencia en la desertización cabe pensar que fuera mínima, dado que se trataba de una explotación en régimen natural, sin posibilidad de afección a los caudales fluyentes, aunque sí a su distribución espacial.

Durante los períodos secos muchos de los manantiales se secaban; con cierta frecuencia en su lugar se excavaba una galería cuyo desarrollo se solía parar al encontrar de nuevo el agua. El proceso podía repetirse en sucesivos períodos secos. La técnica de las galerías alcanzó una gran perfección técnica en la antigua Persia, mediante la construcción de los *qnats* (khanats, kanats, son otros nombres dados a este tipo de captación, aunque ha recibido nombres muy diversos según los países), algunos de los cuales alcanzaban varias decenas de kilómetros de recorrido. Posiblemente este tipo de construcción contribuyó a la desertización en las regiones áridas y semiáridas, al afectar al agua verde en la mayor parte de su recorrido por actuar la galería de dren colector. Su expansión a todo lo largo del Mediterráneo, incluyendo todo el sudeste y el este peninsular, favoreció el desarrollo de la agricultura y dio ciertas garantías a los abastecimientos. En realidad estas "minas" no son obras de regulación en sentido estricto ya que arrojan más agua en los períodos húmedos y su caudal decrece o se anula en el estiaje y en los períodos secos. Al actuar de elemento estabilizador de la población, durante los períodos secos se puede romper el equilibrio entre la producción "sostenible" y el número de habitantes abastecidos por la galería; se inicia así una etapa que puede generar impactos irreversibles a la escala de la amplitud de los períodos de sequía-humedad, tales como sobrepastoreo con eliminación de la cobertura vegetal, aumento de la superficie cultivada para compensar la menor producción agrícola, erosión de los suelos, etc.

Cuando el hombre inventa sistemas de elevación del agua es cuando comienza la explotación de las aguas subterráneas mediante pozos, eventualmente combinados con galerías drenantes. Las norias de tracción animal ya sí constituyen un sistema de explotación que lleva asociado un mecanismo de control sobre el agua, de forma que la extracción se hace en función de las necesidades, sin que se produjeran "pérdidas" en período de no utilización. Aunque ha habido ejemplos ancestrales en algunos lugares del mundo (China y Francia, por ejemplo) de excavación de pozos muy profundos (hasta varios cientos de metros de profundidad; Puche, 1996), lo más frecuente era la excavación de pozos muy someros que eran paralizados en cuanto que la

lámina de agua superaba varios decímetros de espesor. Su influencia sobre el agua verde sería similar a la de las galerías, aunque mucho más localizada. Ahora bien, el uso de su agua favorecía el desarrollo agrícola. La construcción de galerías anejas podía hacer aumentar el área de influencia de ese drenaje inducido. Los pozos profundos podían ser aprovechados únicamente en caso de ser surgentes, al carecer de sistema de elevación.

La invención de la bomba sumergible y el avance en todas las técnicas de perforación hacen que desde mediados del siglo actual se hayan roto casi todas las barreras en lo que a profundidad de perforación y/o elevación del agua se refiere; la profundidad de la obra ha dejado de ser un límite a la extracción del agua en la mayoría de los casos, incluyendo los drenajes de las explotaciones mineras y de las grandes obras subterráneas (Fernández-Rubio, 1978).

Se llega de esta manera al período en el que la explotación intensiva de los acuíferos puede hacerse realidad; se perfora a percusión, rotación con circulación normal o inversa, rotopercusión, pozos con colectores radiales, etc. Se captan acuíferos someros, profundos, confinados, semi-confinados, o multicapa, y todo ello con un buen conocimiento de las leyes que rigen el movimiento del agua subterránea. Las surgencias se pueden agotar, el agua puede estar cada vez a mayor profundidad. Acuíferos pequeños se llegan a vaciar prácticamente y otros de varios miles de kilómetros de superficie pueden ver reducido sensiblemente el volumen de sus reservas (Ogallala en USA, por ejemplo; Johnson, 1991).

EXPLOTACIÓN Y DESERTIZACIÓN

El uso intensivo del agua subterránea afecta tanto a la cantidad como a la calidad del recurso. Sobre este último aspecto hay multitud de ejemplos; frecuentemente, los acuíferos aumentan considerablemente la salinidad de sus aguas, y no solamente en los acuíferos costeros, donde se puede producir intrusión marina, sino en muchas otras circunstancias, como son movilización de aguas "fósiles" de alto contenido salino, en arsénico (Argentina, Bangladesh, Bengala y Méjico;

Nickson *et al.*, 1998; Schreiber *et al.*, 2000), en flúor, y en boro (Bajo y Medio Andarax, Almería; Sánchez Martos *et al.*, 1999), entre otros elementos, que pueden salinizar o hacer tóxica o fitotóxica el agua.

En regiones de clima semiárido, el regadío con agua subterránea puede ocasionar la salinización de los suelos y de las aguas (Adar, 1999); en efecto, el agua bombeada sufre una notable concentración en sales como consecuencia de la evapotranspiración; el agua que retorna al acuífero (puede superar el 20 % en dotaciones elevadas y suelos bien drenados) alcanza a tener más del doble de sales que el agua inicial, al margen de la sal depositada en el suelo; la repetición del proceso puede acabar degradando suelos y agua. En el Bajo y Medio Andarax se tiene un buen ejemplo, complicado con la presencia de boro en concentraciones elevadas (Martínez Raya, 1986; Sánchez Martos, 1997).

El paso siguiente puede ser el abandono de los cultivos por el deterioro de los suelos, de las aguas o de ambos, y se inician otros procesos mucho más activos que los relacionados con el agua, que pueden terminar dando un paisaje degradado (García-Ruiz, 1996). En el caso del Andarax, la consecución de aguas externas de calidad aceptable ha permitido recuperar varios miles de hectáreas para el cultivo (Sánchez Martos *et al.*, 1996). El aumento de la profundidad de bombeo y, eventualmente, el agotamiento "físico" de los acuíferos puede tener consecuencias parecidas. Al carecer de agua, o al ser muy costosa la explotación, se tienen que abandonar los cultivos.

La combinación de ambos factores -cantidad y calidad del agua- puede resultar también altamente impactante, de consecuencias acrecentadas en climas semiárido y árido. Sería el caso de cuencas sedimentarias más o menos extensas alimentadas por las mayores precipitaciones de los bordes de mayor altitud, situándose el área de descarga en el interior de la cuenca, frecuentemente de forma difusa -desarrollo de freatofitas (Davis y de Wiest, 1966)- o en una laguna (*sebkhas*) cuyas aguas pueden ser saladas o salobres, favorecido por la elevada evaporación estival. La explotación de las aguas de los bordes de la cuenca -normalmente de escaso contenido

salino y facies bicarbonatada cálcica- puede reducir o anular totalmente la salida del agua a la laguna; su desecación acaba con la vegetación halófila que suele bordearla. El viento puede arrastrar las sales depositadas en el fondo de la laguna, las cuales, a su vez, degradan los suelos del entorno pudiendo favorecer la muerte de la vegetación.

Algo similar puede suceder de forma natural en regiones arenosas desprovistas de vegetación; el nivel freático mantiene fijada la arena; si sube, se puede producir encharcamiento y/o eventual "entrapamiento" de arenas transportadas por el viento; si baja el nivel se pueden movilizar las arenas, lo cual permitirá que se genere una laguna más profunda en el siguiente ciclo húmedo. Estos procesos, visibles en algunos sectores del Parque Nacional de Doñana, en España, -con diferentes variantes- (Custodio, 1999) se pueden acelerar sensiblemente si el hombre interviene explotando el acuífero; de esta manera

se puede producir el avance de dunas aparentemente estabilizadas. Ese avance puede hacer desaparecer la vegetación existente, dando lugar a un proceso de degradación autoalimentado de difícil solución.

De los escasos ejemplos localizados en bibliografía en los que se cita a la explotación del agua subterránea como causante directo de desertización se tienen los de regiones áridas y semiáridas de China (Zhaoxin, 1991); se trata de las llanuras septentrionales de China a las que se les estima unos recursos hídricos subterráneos explotables de 130.000 hm³/año. La explotación intensiva en esas extensas áreas produjeron amplios descensos del nivel freático en los sectores más explotados, con valores que alcanzaron 15 m entre 1960 y 1984; subsidencia del terreno; disminución de los caudales de numerosas surgencias; intrusión marina en las áreas costeras; colapsos en áreas kársticas (143 colapsos en el período 1970-1985); reducción de los caudales de los ríos;

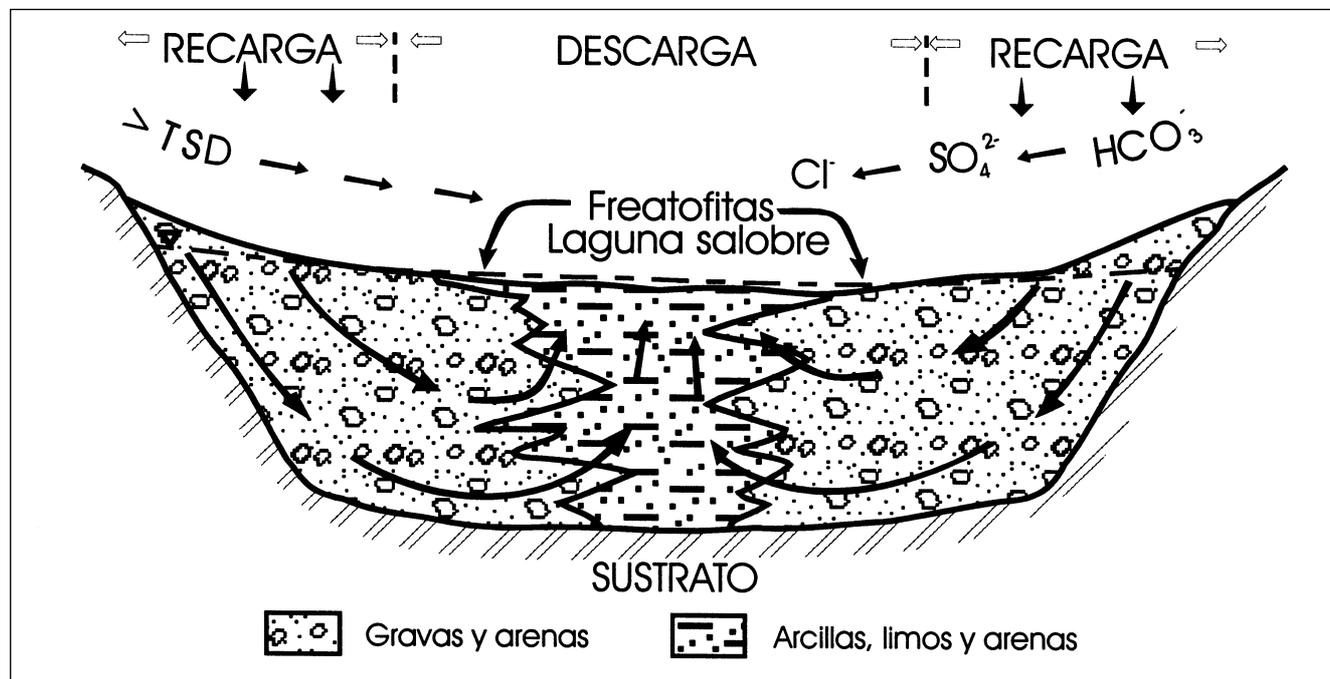


Figura 1.- Esquema de flujo en cuencas sedimentarias extensas en región semiárida (inspirada en Toth, 1963, y Engelenc y Jones, 1986). Para más detalles, ver texto.

Figure 1.- Scheme of flow in a great sedimentary basin in semi-arid regions (inspired in Toth, 1963, and in Engelenc and Jones, 1986). For more explanations see the text.

y abandono de numerosas granjas debido a la salinización de los suelos con el consiguiente avance del desierto.

Mucho más frecuentes son los ejemplos tipo Valle de Guaymas (NE de Méjico), donde la explotación descontrolada en los acuíferos, iniciada en la década de los 40 (Rodríguez, 1991), dio lugar al avance de la cuña salina 25 km, habiéndose abandonado 600 km² de tierras agrícolas en el año 1990. Las autoridades contemplaron como alternativa emplear los pozos intruidos en acuicultura (criaderos de camarón). Las extracciones pasaron de 20 hm³/año en los años cuarenta, a unos 100 hm³/año en los setenta y a 180 en los años ochenta, con un conoide de 90 metros bajo el nivel del mar en un área superior a 40 km².

ALGUNOS EJEMPLOS

España tiene numerosos ejemplos de explotación intensiva de acuíferos (MINERMOPTMA, 1994) pero son muy escasos los estudios detallados que relacionan fehacientemente explotación y desertización, posiblemente por lo ya expuesto de la dificultad de hacer la parte del todo. A escala mundial posiblemente el proyecto más singular sea el realizado por Libia para llevar a cabo la explotación minera de las aguas fósiles (17.000 a 34.000 años de antigüedad) detectadas bajo el desierto con motivo de la perforación de los pozos petrolíferos (Lucks y Gladwell, 1999). Fue una decisión meditada y asumida, sabiendo que su duración va a ser limitada. El proyecto, denominado *Great Manmade River*, fue concebido en tres fases. La primera fase, terminada en Agosto de 1991, consistió en transportar 23 m³/s a lo largo de unos 600 km, hasta la franja costera, mediante tubería de hormigón de 1,6 a 4 m de diámetro enterrada a 6 – 7 m de profundidad. En la segunda fase transportan el agua desde el área desértica de la mitad occidental del país hasta la franja Trípoli-Sirt. La tercera fase se encuentra en realización.

La posibilidad de aplicar la explotación minera a las aguas subterráneas es una opción legítima (Llamas, 1998) y económicamente aceptable cuando los beneficios superan a los costes. Es el caso de Libia que, además, es la alternativa

menos costosa de las diferentes analizadas (Salem, 1992), aunque parece muy alejada del “desarrollo sostenible” como panacea surgida de la Conferencia de Río.

Para ilustrar lo expuesto, comentaré tres ejemplos, tomados del ámbito mediterráneo, de explotación intensiva de acuíferos susceptibles de favorecer la desertización, dos de ellos en España -Crevillente y Campo de Dalías- y el de los acuíferos de la mitad Sur de Túnez, en las puertas del Sahara.

La Sierra de Crevillente (Alicante, España)

El acuífero de la Sierra de Crevillente constituye un ejemplo singular de sobreexplotación de acuífero kárstico que sirve para ilustrar la gran potencialidad de los acuíferos en rocas carbonatadas muy por debajo de las cotas de los manantiales, frecuentemente consideradas como “niveles de base de la karstificación”. Los materiales acuíferos están constituidos esencialmente por calizas y dolomías jurásicas que reposan bajo una serie esencialmente margosa del Jurásico superior-cretácico inferior. Los materiales pertenecen al Dominio Subbético y en consecuencia presentan pliegues de típica directriz bética (ENE-WSW). Su ubicación a lo largo del contacto tectónico entre los Dominios Subbético y Prebético, cabalgando el primero sobre el segundo, ha debido tener alguna influencia en el desarrollo profundo de la karstificación, posiblemente favorecido por la existencia de CO₂ de origen profundo (Pulido Bosch *et al.*, 1998). Los afloramientos acuíferos (figura 2) ocupan algo más de 70 km² de superficie que corresponden esencialmente con tres anticlinales separados por dos sinclinales; el borde meridional del sistema está ocupado por la falla de Crevillente, accidente tectónico de gran relevancia en la Cordillera Bética (Andreu, 1997).

Las primeras explotaciones se iniciaron a principios de los 60; se trataba de pozos poco profundos ubicados en el borde oriental, cercanos a los lugares de mayor uso agrícola potencial; paralelamente se inició una curiosa obra en el borde meridional, consistente en la construcción de una galería, bajo el nivel piezométrico, de unos 2360 m de longitud y de 2,5-3 m de diámetro. Los primeros 775 m están excavados en margas terciarias.

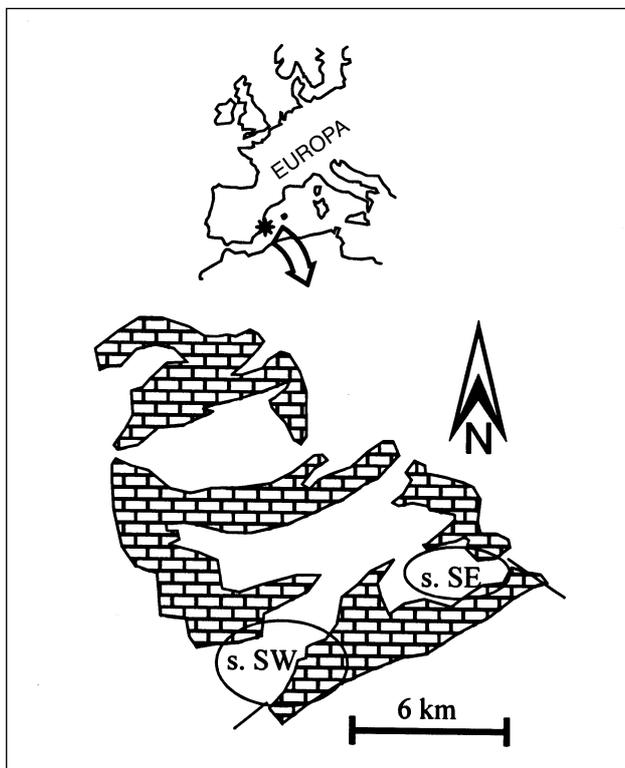


Figura 2.-Esquema hidrogeológico del acuífero de la Sierra de Crevillente. s.SE y s.W, sectores mostrados en la figura 3.

Figure 2.- Hydrogeological scheme of the Sierra de Crevillente aquifer. s.SE and s.W, sectors showed in figure 3.

rias y arcillas con yesos triásicos y otros terrenos poco consistentes. La construcción duró 4 años (1961-1964; Andreu, op. cit.) estando el nivel freático inicial unos 100 metros sobre la base de la galería, motivo por el cual llegó a arrojar hasta unos 200 l/s por su boca, aunque por poco tiempo. En su interior se perforaron 12 sondeos con un potencial de bombeo superior a 1200 l/s.

Los sondeos del sector oriental fueron reprofundizados en la década de los 70 y en la de los 80, buscando nuevos emplazamientos en donde ubicar nuevas captaciones para hacer frente a una demanda creciente de agua para una rentable agricultura dominada por la uva de mesa. Las extracciones fueron aumentando hasta alcanzar un máximo de algo más de 30 hm³/año en 1978. Si tenemos en cuenta que la alimentación media del acuífero puede ser del orden de 10 hm³/año,

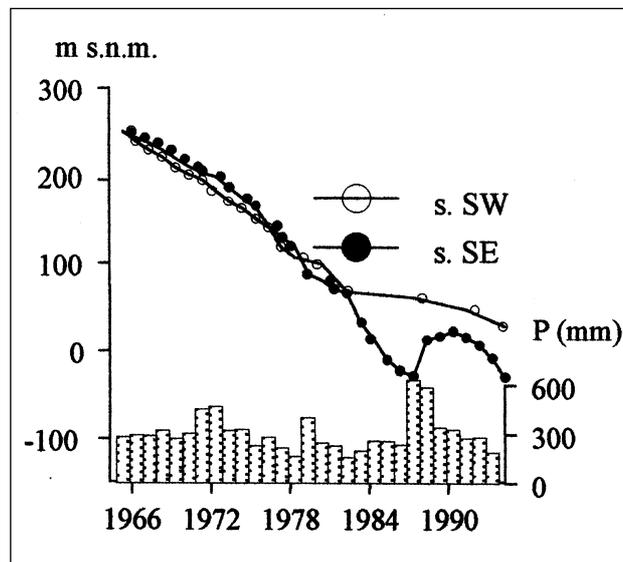


Figure 3.- Evolución de los niveles piezométricos en el acuífero de Crevillente. (Modificado de Pulido Bosch *et al.*, 1998). La situación de los sectores se muestra en la figura 2.

Figure 3.- Evolution of the piezometric levels in the aquifer of Sierra de Crevillente. (Modified from Pulido Bosch *et al.*, 1998). Situation is showed in figure 2.

con valores nulos en los años muy secos, se comprende que la consecuencia de tal sobreexplotación no podía ser otra que el descenso continuado de los niveles, cuya evolución se muestra en la figura 3.

La existencia de materiales evaporíticos en el sustrato y en los bordes del acuífero y la eventual zonación gravitatoria del agua, trajeron aparejado un aumento de la salinidad del agua bombeada con distribución espacial variable, aunque en muchos pozos se extrae agua de facies clorurada sódica (Andreu, 1997). El aumento tan considerable de la profundidad a la que hay que extraer el agua, con el consiguiente aumento de los costes de explotación, el abandono de algunas captaciones por quedarse secas o por el deterioro de la calidad del agua bombeada, la disminución de la rentabilidad de los productos agrícolas cultivados, son otros tantos factores que motivaron el abandono de muchas parcelas, lo cual tuvo su reflejo en la disminución de los bombeos.

De proseguir en la línea que se iba, lo más probable es que se tuvieran que abandonar todos los riegos con las aguas del acuífero por agotamiento del mismo -como sucedió en el acuífero del Cid, también en la provincia de Alicante (Andreu, 1997)- por lo que podría haber llegado un momento en que se habría alcanzado un cierto equilibrio, al igual que sucede en la actualidad con el citado acuífero del Cid. Sin embargo, las consecuencias socioeconómicas pueden ser desastrosas, dado que la uva de mesa requiere mucha mano de obra. Las consecuencias ambientales, aunque poco marcadas aún, parece que habían ido en la línea de la salinización de suelos, abandono total de cultivos, eventual aumento de la erosión y pérdida de suelo y, en definitiva, progreso de la desertización. Algunos agricultores del lugar, a finales de los 80, parecían resignados a la vuelta al cultivo tradicional de secano, incluyendo el algarrobo, árbol de gran resistencia en un medio semiárido. En la actualidad parece estabilizado el proceso de abandono, aunque ya es mucha menor la superficie cultivada y regada, debido a los problemas citados.

El Campo de Dalías (Almería, España)

Este área, con unos 330 km² de superficie, ha sido la base del "milagro económico" de Almería, que ha pasado de estar entre las provincias más pobres de España a ocupar un lugar entre el tercio de las de economía más desarrollada. En la actualidad se estima que se riegan unas 20.000 ha bajo plástico, que mueven directa o indirectamente más de 200.000 millones de pesetas al año. En realidad, el Campo de Dalías se encuentra muy estrechamente relacionado con toda la Sierra de Gádor, la cual constituye su borde septentrional (figura 4). La superficie ocupada por el área de la Sierra de Gádor vertiente al Campo de Dalías cubre otros 330 km², con la peculiaridad de registrar una precipitación mucho más elevada (de 2 a 3 veces la medida en el área cubierta por los plásticos; Martín Rosales, 1997; Vallejos, 1997; Molina, 1998).

El borde meridional de Gádor constituiría esencialmente el área de recarga de los acuíferos del Campo de Dalías, de los que se bombean unos 130 hm³/año (González, 1999) que abastecen los regadíos -ayudados con agua procedente del

embalse de Benínar y del Canal de San Fernando, ambos en el río Adra, situado al Oeste del Campo, y de la galería de Fuentenueva (Navarrete, 1992)- la demanda urbana de los núcleos del Campo, que pueden superar los 250.000 habitantes en verano, y la ciudad de Almería, que recibe unos 15 hm³/año. Si tenemos en cuenta que las entradas al sistema pueden alcanzar 60-80 hm³/año, nos encontraríamos frente a otro caso de flagrante explotación intensiva que presenta aspectos paradójicos, como expondré posteriormente.

Desde el punto de vista geológico, los materiales aflorantes más antiguos corresponden a las metapelitas alpujárrides que soportan una potente serie carbonática triásica. Estos materiales alpujárrides representan a las unidades de Gádor -extensamente desarrollada en el área- y de Felix, cuyos afloramientos se ciñen a la mitad oriental. Entre los terrenos triásicos y los miocenos no se han descrito materiales. Los materiales miocenos están representados por conglomerados de rocas volcánicas sobre los que se depositan calizas pararecificales y calcarenitas que parchean el borde meridional de la sierra.

Los materiales pliocenos comienzan por un conglomerado basal sobre el que descansa una potente serie margosa (figura 4) que puede alcanzar 700 m, que culmina con un tramo calcarenítico la serie. Los materiales cuaternarios están ampliamente representados por grandes abanicos aluviales que jalonan el borde de la sierra. Los sedimentos de playas, las arcillas de borde de abanico y los sedimentos de cuencas litorales restringidas completan el resto de los materiales aflorantes.

Los carbonatos triásicos, los conglomerados volcánicos y los terrenos miocenos calizos y detríticos, las calcarenitas pliocenas y los abanicos aluviales constituyen las principales formaciones acuíferas del área. De acuerdo con criterios geométricos se consideran tres unidades hidrogeológicas dentro del Campo: Aguadulce, Balanegra, y Balerma-Las Marinas (figura 5).

La unidad de Aguadulce es la de mayor complejidad geológica; en ella se pueden encontrar en una misma vertical formaciones acuíferas y otras de comportamiento acuitado y/o acuícludo, tales

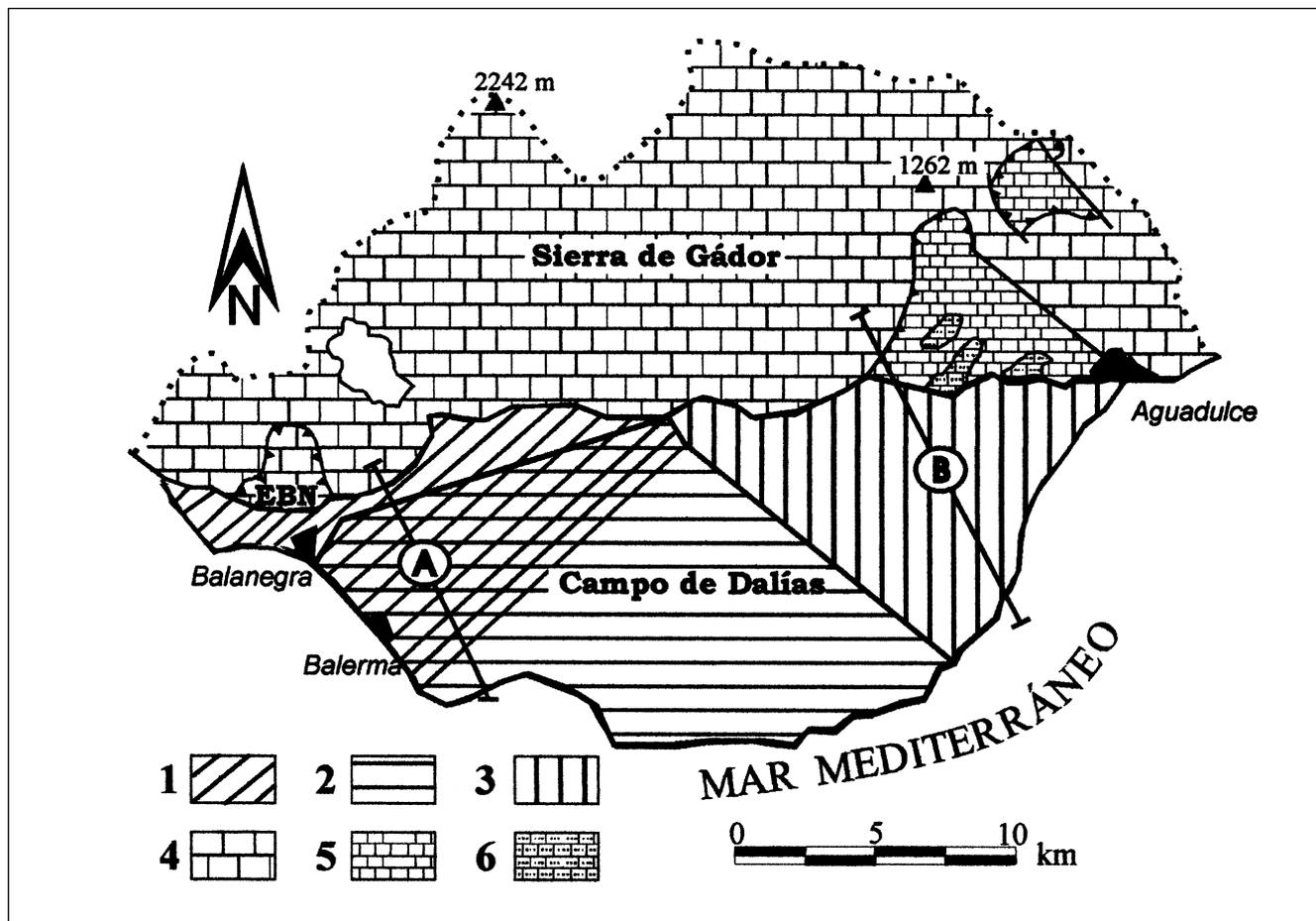


Figura 4.- Esquema hidrogeológico del Campo de Dalías y del borde meridional de la Sierra de Gádor, con diferenciación de las Unidades hidrogeológicas de Balanegra (1), Balerma-Las Marinas (2) y Aguadulce (3), así como los materiales de la Unidad de Gádor (4), los materiales de la Unidad de Felix (5) y las calcarenitas de Mioceno (6). EBN: Escama de Balsa Nueva. A y B corresponden a la situación de los cortes esquemáticos de la figura 5.

Figure 4.- Hydrogeological scheme of the Campo de Dalías and southern part of Sierra de Gádor. The hydrogeological units are differentiated: Balanegra (1), Balerma-Las Marinas (2) and Aguadulce (3). Terrains of Gádor unit are (4), Felix (5) and Miocene calcarenites (6). EBN: Balsa Nueva slice. A and B correspond to the situation of the schematical cross-sections showed on figure 5.

como las gravas cuaternarias, calcarenitas pliocenas, margas pliocenas, calcarenitas miocenas, calizas triásicas de Felix, metapelitas de Felix y carbonatos de Gádor. En esta unidad se encontraba la surgencia principal del sistema. Actualmente una fracción considerable de la unidad muestra niveles piezométricos bajo el nivel del mar y numerosos pozos tuvieron que ser abandonados como consecuencia de la salinización de sus aguas, posiblemente de origen marino actual (Vallejos *et al.*, 1998; Molina, 1998).

La unidad de Balanegra ocupa el extremo occi-

dental del sistema y no parece tener conexión con el mar en gran parte de la franja costera, de ahí que a pesar de que los niveles en los carbonatos triásicos de Gádor se encuentren localmente a más de 20 m bajo el nivel del mar, no existen evidencias de intrusión marina, salvo en la Escama de Balsa Nueva (Thauvin, 1986; Molina, 1998). Al igual que la unidad de Aguadulce, ésta mantiene una explotación extensiva desde hace más de 20 años.

La unidad de Balerma-Las Marinas, con unos 220 km² de superficie, es la más superficial de las tres.

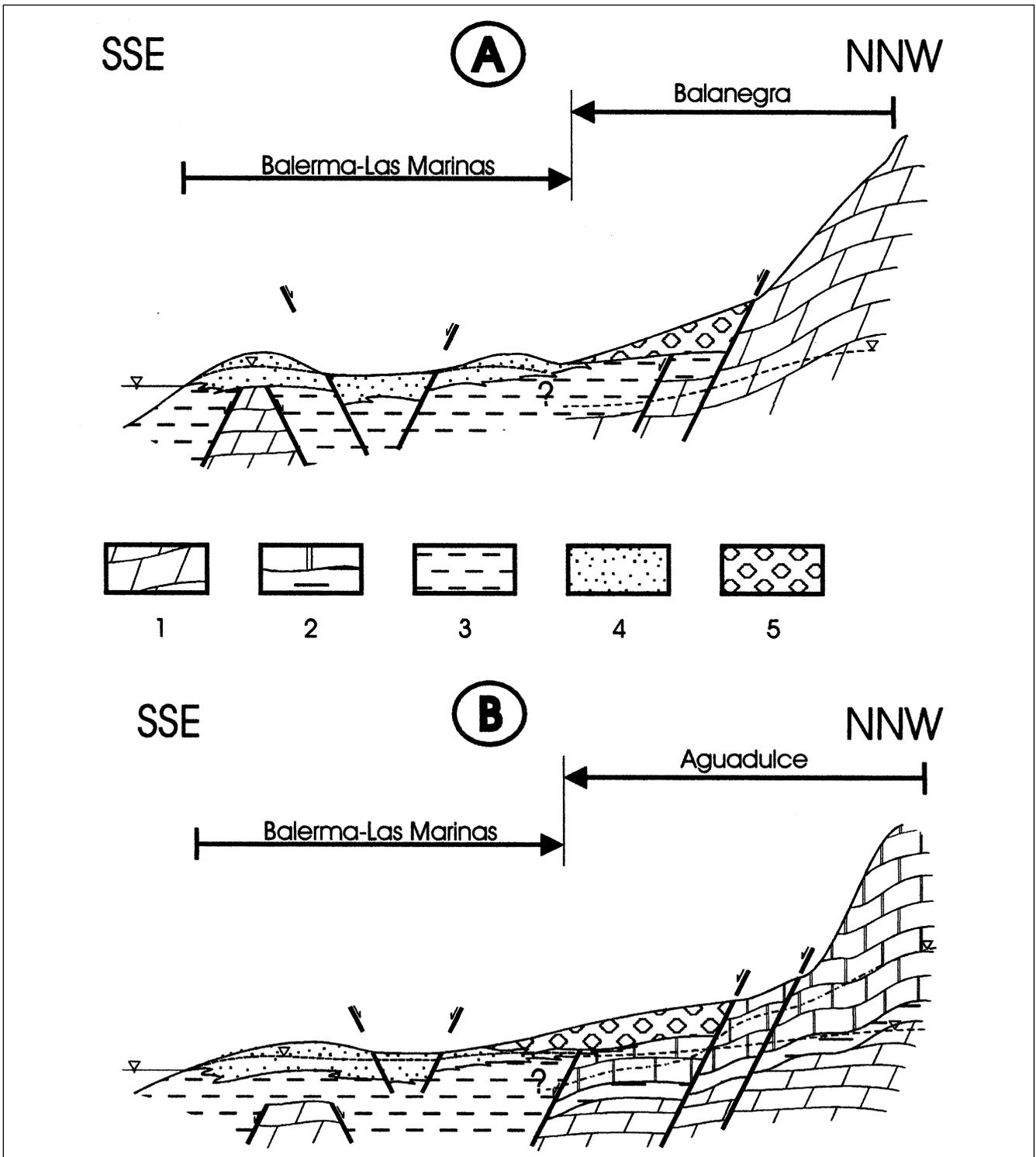


Figura 5.- Cortes hidrogeológicos esquemáticos del Campo de Dalías, sin escala. 1: Carbonatos de Gádor; 2: Carbonatos y meta-pelitas de Felix; 3: Margas pliocenas; 4: Calcarenitas pliocenas; 5: Abanicos aluviales

Figure 5.- Schematic hydrogeological cross-sections of the Campo de Dalías, with no scale. 1: Carbonates of Gádor unit; 2: Carbonates and metapelitics of Felix unit; 3: Pliocene marls; 4: Pliocene calcarenites; 5: Alluvial fans

Está esencialmente constituida por las calcarenitas pliocenas y aislada de las otras dos unidades por las margas pliocenas, aunque a lo largo de su borde septentrional puede existir conexión. El borde meridional está ocupado por las margas pliocenas, sin que las calcarenitas contacten directamente con el mar. Las aguas de esta unidad presentan una calidad natural mediocre (Pulido Bosch *et al.*, 1991), motivo por el cual las extracciones son muy inferiores a las otras dos unidades (Domínguez y González, 1995). Si a la escasez de los bombeos unimos el hecho de que la mayor superficie irrigada se sitúa sobre esta unidad, se comprenderá que el nivel freático haya ascendido durante los últimos años, al contrario de lo que sucede en las otras dos unidades. Por otro lado, la parte central del Campo es endorreica, acrecentada por la extracción de arcillas para soporte del cultivo en invernaderos. Por todo ello, en los últimos 10 años se ha formado un humedal cuyo tamaño aumenta visiblemente cada año (Castro *et al.*, 1999).

El sistema también ha sido declarado legalmente sobreexplotado, aunque son muchos los problemas que se están planteando al momento de establecer la Comunidad de Usuarios y definir el Plan de Ordenación de las Extracciones. Se contemplan soluciones que pasan por trasvases de agua, construcción de numerosos embalses -bajo condiciones climáticas que admiten muy escasa garantía en la satisfacción de la demanda- construcción de plantas desaladoras de agua de mar, y -sobre todo- muchos kilómetros de canales que interconectarían diversas cuencas hidrográficas.

La sobreexplotación ¿ha favorecido o va a favorecer la desertización? ¿El paso de un pedregal a un mar de plásticos es negativo? Según el experto en botánica de la provincia de Almería, Ingeniero A. Pallarés (1996, com. personal), el número de especies vegetales en el Campo de Dalías ha aumentado espectacularmente y no sólo en plantas nitrófilas. Lo que parece claro es que el desarrollo -en lo que respecta al agua- no es sostenible y que las medidas para mantener el tipo de desarrollo pasan por aumentar el ámbito de influencia de los impactos (trasvases), incluyendo la desalación. Por otro lado, en el Campo de Dalías es donde el rendimiento neto del metro cúbico de agua es, posiblemente, el mayor de toda España.

Región de Tozeur-Douz (Túnez)

El área en cuestión, situada en el borde del Sahara y en la orilla del gran lago estacional (*chott*) de Djerid (figura 6), cuenta con espectaculares oasis ocupados por altas palmeras que dan cobijo a árboles frutales de menor porte, que a su vez protegen y permiten el crecimiento del maíz, tomates y otras legumbres. Estos oasis estaban alimentados por las surgencias que constituían los aliviaderos naturales de grandes embalses subterráneos, confinados en la mayor parte de su superficie.

Se trata de los denominados "Manto del Complejo Terminal" (materiales del Senonense al Mioceno y eventualmente al Cuaternario) y "Manto del Continental Intercalar" (materiales del Jurásico superior-Cretácico). En algunos casos las surgencias tienen galerías excavadas desde la dominación romana o posteriores, hechas con el fin de permitir que sigan manando en los períodos muy secos.

Los planes de transformación en regadío de nuevas áreas y el aumento de la demanda urbana como consecuencia del turismo han favorecido una explotación superior a las entradas medias a los sistemas, trayendo como consecuencia el agotamiento de muchas de las salidas naturales. La abundancia de arenas y la escasa vegetación existente, unido a los frecuentes vientos cálidos saharianos, favorecen el avance de los materiales sueltos que llegan a enterrar la poca vegetación protectora existente. Los palmerales -grandes consumidores de agua- muestran en muchos lugares indicios de agotamiento que se traduce en un avance del desierto. Las grandes acumulaciones de sales existentes en los *chotts* Djerid y Fejej (figura 7) son susceptibles de ser transportadas por las tempestades de viento, agravando los notables problemas de escasez de agua que tiene la mayor parte del país (Mamou, 1995).

Este es un ejemplo muy extremo, pero que pretende llamar la atención sobre el hecho de que la periferia de los desiertos es especialmente vulnerable a la desertización, al ser ecosistemas extremadamente frágiles. La tentación de aumentar la afluencia de turistas y los cultivos -incluso bajo plástico, como se puede ver en algunos puntos del área citada- es muy grande en regiones de

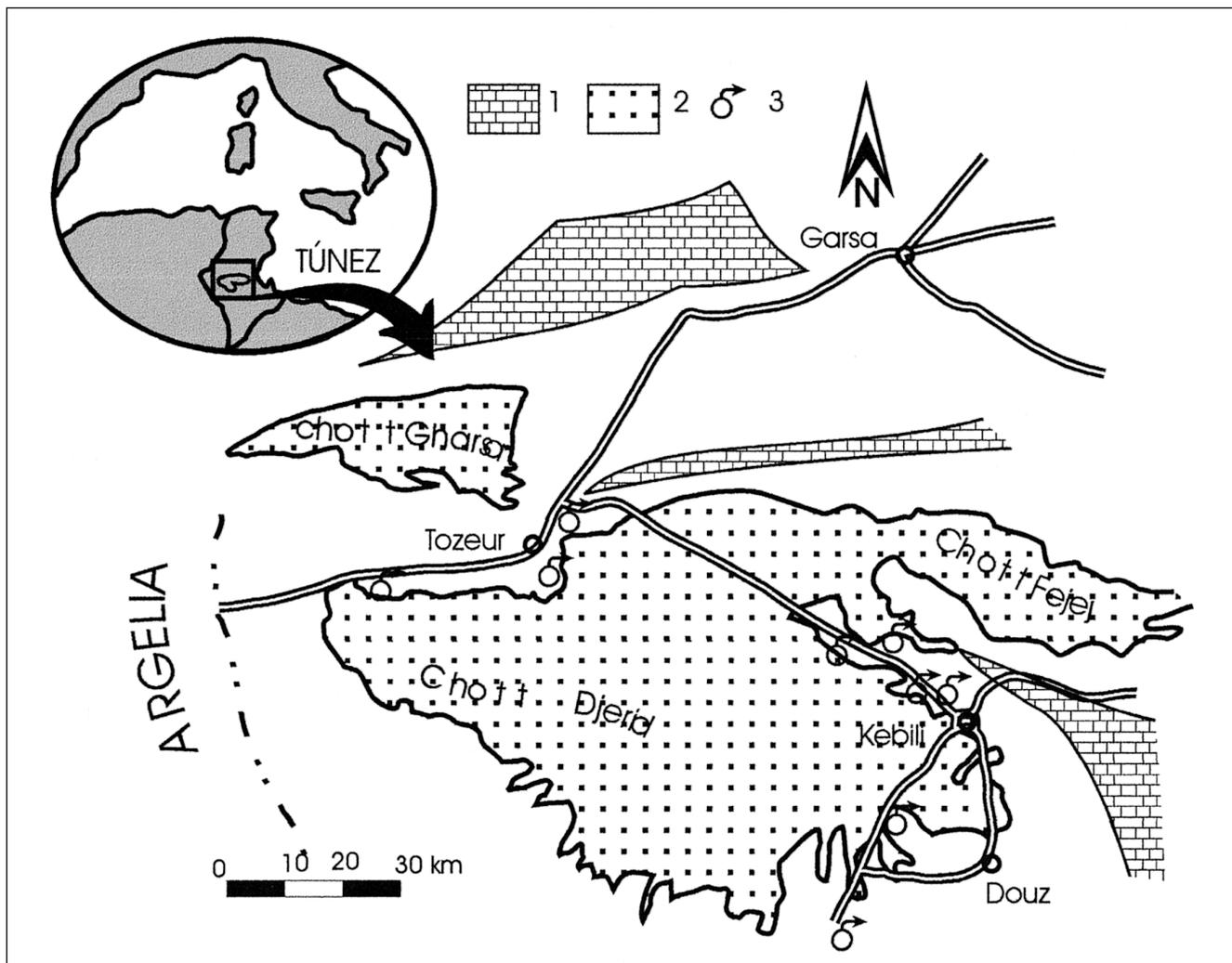


Figura 6.- Esquema hidrogeológico del entorno de Tozeur-Douz. 1: Afloramiento de materiales del Complejo Terminal. 2: Lago salado efímero (*chott*). 3: Oasis.

Figure 6.- Hydrogeological scheme of Tozeur-Douz area and its surroundings. 1: Outcrops of the materials from the Terminal Complex. 2: Salt ephemeral lake (*chott*). 3: Oasis.

recursos muy limitados, cuya única alternativa que parecen ofrecer a los habitantes del lugar es pasar a engrosar las cifras de las chabolas de la periferia de las grandes ciudades del Norte.

Además, alguna de las nuevas transformaciones que ocupan áreas de suelos arcillosos se encharcan con facilidad, lo que se traduce en un notable aumento de la evaporación que en muy poco tiempo saliniza el suelo; ello obliga al paradójico esquema de un sistema de regadío a manta y/o

en surcos, y a la excavación de largas zanjas de drenaje tendentes a evitar la salinización.

CONSIDERACIONES FINALES

La explotación racional de las aguas subterráneas no tiene por qué contribuir al desarrollo de la desertización; muy al contrario, puede ser una herramienta que permita hacer frente a la degradación del medio, al menos en una primera etapa



Figura 7.- Foto del entorno de Douz. En primer plano se observan los sistemas de protección contra la erosión eólica. A la derecha se observan palmeras secas.

Figure 7.- A view of the surroundings of Douz. Protection system against the eolic erosion are visible. On the right, there are some dry palmers.

en la que se hace preciso restaurar el agua verde en los primeros decímetros del suelo hasta que la nueva vegetación consigue alcanzar un nuevo equilibrio.

La explotación inadecuada de las aguas subterráneas puede eventualmente contribuir a la degradación del medio, aún mediante técnicas de captación tan primitivas como las largas galerías, al facilitar el drenaje vertical del agua de la franja no saturada. La explotación intensiva de los acuíferos, tan frecuente en las regiones de clima semiárido y árido, puede favorecer la desertización de forma directa y -más frecuentemente- de manera indirecta, a menudo por la contribución a la salinización de los suelos como resultado del bombeo -concentración por evaporación-infiltración-bombeo-. La litología de la franja no saturada y la eventual existencia de rocas evaporíticas en el subsuelo pueden acelerar los procesos de salinización de las aguas.

El continuo descenso de los niveles piezométricos puede provocar un desequilibrio que favorezca el desplazamiento de aguas de mayor contenido salino -en las áreas costeras o en regiones con zonación vertical de la salinidad- con el impacto consiguiente sobre la vegetación y los suelos. Una vez iniciado el proceso de degradación, comienzan su labor los demás factores sus-

ceptibles de actuar: abandono de cultivos (García-Ruiz, 1996; Martínez-Fernández *et al.*, 1996); erosión acelerada; sobrepastoreo; incendios forestales (Molina y Sanroque, 1996); conflictos humanos (Bächler, 1995), y otros.

La explotación intensiva también puede dar lugar a procesos curiosos que pueden contribuir a acelerar la degradación del medio. Como anécdota, se puede citar el caso del Alto Guadalentín, en el sudeste español, donde la sobreexplotación a que se ha visto sometido el sistema acuífero, al tiempo que producía un continuo descenso del nivel freático, favoreció la liberación de gran cantidad de gases (Rodríguez Estrella *et al.*, 1989; Cerón, 1995) de entre los que dominan el CO₂; el aumento de la presión parcial de CO₂ confirió una notable agresividad al agua, con el consiguiente aumento en HCO₃ de las aguas de bombeo en los pozos, habiéndose abandonado muchos de ellos.

En la gran mayoría de estas áreas hay una escasez crónica de agua y un uso no sostenible del agua subterránea. Las soluciones que se plantean desde distintos sectores de la Administración y desde los propios usuarios pasan por un mejor aprovechamiento de los recursos, desalación de agua de mar, unión y trasvase entre cuencas, como más relevantes (MMA, 1999); en el caso de esta última solución no está nada claro si, a la larga, no tendrá unas consecuencias ambientales más indeseables que las de la situación actual, aunque tras cuantiosas inversiones.

La solución más duradera, aunque social y políticamente muy costosa, sería la vuelta al uso sostenible del agua. Ahora bien, ¿cuántos miles de hectáreas de terrenos cultivados tendrían que abandonarse? ¿cuántas miles de personas tendrían que abandonar las áreas de explotación intensiva?. Posiblemente se esté a tiempo de hacer una adecuada ordenación del medio, con participación activa de toda la sociedad, que contemple la utilización más racional de los recursos de cada área. La mayor concienciación medioambiental de las nuevas generaciones será buen abono para la toma de decisiones más adecuadas, aunque la solución "milagrosa" está muy lejos de ser alcanzada.

AGRADECIMIENTOS

Este texto desarrolla algunas de las ideas elaboradas en el marco del proyecto HID98-0689 (CICYT). Pablo Pulido participó activamente en la elaboración de los gráficos que ilustran este artículo. El prof. Dr. R. Llamas y el Dr. Durán revisaron el manuscrito original e hicieron correcciones y sugerencias; mi agradecimiento a ambos.

REFERENCIAS

- Adar, E. M. (1999). Desertification processes associated with deterioration of groundwater quality. MEDESERT'99, pp.39-40. Perpignan
- Agneur, C. y Anderson, E. (1992). Water resources in the arid realm. Routledge, 329 p. London
- Andreu, J. M. (1997). Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeço d'Or (provincia de Alicante). Tesis Doct. Univ. Alicante
- Bächler, G. (1995). Desertification and conflict. The marginalization in poverty and of environmental conflicts. In « Desertification and migrations ». Geoforma ed., pp :185-224.
- Bryan, R. B. Ed. (1990). Soil erosion. Catena Supl., 17, 208 pp.
- Castro, H., Carrique, E. L., Aguilera, P. A., Ortega, M., Casas, J. J., Rescia, A., Schmitz, M. F. y Pineda, F. D. (1999). Humedales almerienses: importancia, problemática y gestión. Jornadas Agua Almería, pp: 31-46
- Cerón, J. C. (1995). Estudio hidrogeoquímico del acuífero del Alto Guadalentín (Murcia). Tesis Doct. Univ. Granada
- Custodio, E. (1995). Explotación racional de las aguas subterráneas. Acta Geol. Hisp., 30: 21-48.
- Custodio, E. (1999). Effects of groundwater development on the Environment. MEDESERT'99, pp. 62- 88. Perpignan
- Davis, S. N. y de Wiest, R. J. M. (1966). Hydrogeology. Willey, 563 p. New York (Trad. español 1971, ed. Ariel, Barcelona)
- Domínguez, J. M. (1996). Economía y racionalización de los usos del agua en los regadíos. In "Economía y racionalización de los usos del agua". Serie Mon. MOPTMA, pp: 21-34.
- Domínguez, P. y González, A. (1995). Situación de los acuíferos del Campo de Dalías (Almería) en relación con su declaración de sobreexplotación. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, XXI: 443-467. Sevilla
- Engelenc, G. B. y Jones, G. P. Eds. (1986). Developments in the analysis of groundwater flow systems IAHS Publ., 163, 356 pp.
- Fernández-Rubio, R., Ed. (1978). El agua en la minería y en las obras subterráneas. 2 vol. Granada
- García-Ruiz, J. M. (1996). Soil erosion after farmland abandonment in submediterranean mountains: a general outlook. In "Soil degradation and desertification in Mediterranean environments". Geoforma ed., pp: 165-183.
- González, A. (1999). Contribución de las aguas subterráneas al abastecimiento de la demanda en la provincia de Almería. Jornadas Agua Almería, pp:73-80.
- IAH (1991). Acuífer overexploitation. XXIII IAH Congress, 580 pp. Puerto de la Cruz
- Johnson, K. S. (1991). Exploitation of the Tertiary-Quaternary Ogallala acuífer in the High Plains of Texas, Oklahoma and New Mexico, Southwestern USA. XXIII IAH Congress, 313-328. Puerto de la Cruz
- Lamoreaux, P. E. (1991). Environmental effects to overexploitation in a karst terrane. XXIII IAH Congress, 103-113. Puerto de la Cruz
- Llamas, M. R. (1989). Hidrogeología de las zonas áridas: usos y abusos de las aguas subterráneas. R.A.C.E.F.N., pp: 239-251. Madrid
- Llamas, M. R. (1991). Ground Water exploitation and conservation of ecosystems. XXIII IAH Congress, pp: 115-131. Puerto de la Cruz
- Llamas, M. R. (1998). Groundwater overexploitation. In "water in the 21st Century: a looming crisis? UNESCO. 20 pp. Paris
- Llamas, M. R. (1999). Uso intensivo de las aguas subterráneas. Curso Univ. Complutense Almería, 44 p. Mekan.
- Llamas, M. R. y Custodio, E. (1999). Aguas Subterráneas. Afers Internacionals, 45-46: 35-67.
- Loucks, D. P. y Gladwell, J. P. Eds. (1999). Sustainability criteria for Water Resource Systems. Cambridge Univ. Press. UNESCO, 139 pp.
- Mamou, A. (1995). Nappe du Complexe Terminal dans le Djerid et la Nefzaoua. Nappe du Continental Intercalaire dans le Sud Tunisien. In "Expert Training in Applied Geology and Environment". Univ. Euro-Arabe, pp. 399-410. Granada.
- Martín Rosales, W. (1997) Efectos de los diques de retención en el borde meridional de la Sierra de Gádor (Almería). Tesis Doct. Univ. Granada
- Martínez-Fernández, J., Martínez, J., López Bermúdez, F., Romero, M. A. y Belmonte, F. (1996). Evolution of vegetation and pedological characteristics in fields with different age of abandonment. In « Soil degradation and desertification in Mediterranean environments » Geoforma ed., pp: 279-290.
- Martínez Raya, A. (1986). Estudio sobre el contenido en boro en aguas de riego de la cuenca baja del Andarax. II SIAGA, 2 : 125-134.
- MINER-MOPTMA (1994). Libro blanco de las aguas subterráneas. 135 p. Madrid
- Ministerio de Medio Ambiente (1999). Libro blanco del agua (borrador).

- Molina, L. (1998). Hidroquímica e intrusión marina en el Campo de Dalías (Almería). Tesis Doct. Univ. Granada
- Molina, M. J. y Sanroque, P. (1996). Impact of forest fires on desertification processes: a review in relation to soil erodibility. In « Soil degradation and desertification in Mediterranean environments. Geofoma ed., pp: 145-163.
- Navarrete, F. (1992). Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del Campo de Dalías. Tesis Doct. Univ. Granada
- Nickson, R., McArthur, J. Burgess, W. Ahmed, K. M. Ravenscroft, P. y Rahman, M. (1998). Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater. *Nature*, 395 :338
- Puche, O. (1996). Historia de la Hidrogeología y de los sondeos de agua en España y en el mundo desde sus orígenes hasta finales del siglo XIX. *Boletín Geológico y Minero*, 107: 80-99
- Puig de Fábregas, J. y Mendizábal, T., Eds. (1995). Desertification and migrations. Geofoma ed. 322 p. Logroño.
- Pulido Bosch, A. (1993). Sobreexplotación y contaminación de acuíferos. V. Reun. Nac. Geol. Amb. y Orden. Territ. I: 75-92. Murcia
- Pulido Bosch, A., Castillo, A. y Padilla, A. Eds. (1989) La Sobreexplotación de Acuíferos, Temas Geológico-Mineros. IGME, XI, 687 p. Almería.
- Pulido Bosch, A., Navarrete, F., Molina, L. y Martínez Vidal, J. L. (1991), Quantity and Quality of groundwater in the Campo de Dalías (Almería, SE Spain). *Water Science and Technology*, 24 (11): 87-96
- Pulido Bosch, A., Andreu, J. M., Estevez, A. y Ayanz, J. (1998) Zonation hydrogéochimique verticale dans l'aquifère karstique du Cid (Alicante, Espagne). *Comptes Rendues de l'Académie des Sciences de Paris*, 326: 421-426
- Rodríguez, R. (1991). Impacto socio-ambiental de la política de extracciones del acuífero de Guaymas, Son., México. XXIII Congreso AIH, Puerto de la Cruz, pp: 477-480.
- Rodríguez Estrella, T., Albacete, M. García, U. y Solís, L. (1989). Evolución espacial y temporal de los gases en el acuífero sobreexplotado del Alto Guadalentín (Murcia). In "La sobreexplotación de acuíferos", 1: 613-629. Almería
- Rubio, J. L. y Calvo, A., Eds. (1996). Soil degradation and desertification in Mediterranean environments. Geofoma ed., 290 pp. Logroño.
- Sala, M., Rubio, J. L. y García Ruiz, J. M. Eds. (1991). Soil erosion studies in Spain. Geofoma ed., 228 pp. Logroño.
- Salem, O. M. (1992). The Great Manmade River Project. *Water Resources Develop.*, 8: 270-278
- Sánchez Martos, F. (1997). Estudio hidrogeoquímico del Bajo Andarax (Almería). Tesis Doct. Univ. Granada
- Sánchez Martos, F., Pulido Bosch, A., Molina, L., Vallejos, A. y Navarrete, F. (1996). Recorrido hidrogeológico Bajo Andarax-Sierra de Gádor-Campo de Dalías. IV SIAGA, II: 475-489.
- Sánchez Martos, F., Pulido Bosch, A. y Calaforra, J. M. (1999), Hydrogeochemical processes in an arid region of Europe (Almería, Spain). *Applied Geochemistry*, 14: 735 –745
- Schreiber, M. E., Simo, J. A. y Freiberg, P. G. (2000). Stratigraphic and geochemical controls on naturally occurring arsenic in groundwater, eastern Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 8: 161-176
- Simmers, I, Villarroya, F. y Rebolla, L. F. Eds. (1992). Selected Papers on Aquifer Overexploitation. 3, 391 pp.
- Thauvin, J. P. (1986). Etude hydrogéologique, modélisation et gestion des aquifères du Campo de Dalías (Province d'Almería, Espagne). Tesis Univ. Niza.
- Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in a small drainage basin. *Journal of Geophysical Research*, 68: 4795-4812.
- Vallejos, A. (1997). Caracterización hidrogeoquímica de la recarga de los acuíferos del Campo de Dalías a partir de la Sierra de Gádor (Almería). Tesis Doct. Univ. Granada.
- Vallejos, A., Pulido Bosch, A., Martín Rosales, W. y Calvache, M. L. (1997) Contribution of environmental isotopes to the understanding of complex hydrologic systems. A case study: Sierra de Gádor, SE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 1157 – 1168
- Volker, A. y Henry, J. C., Eds. (1988). Side effects of water resources management. *IAHS Publ.* 172, 269 p.
- Westing, A. H. (1995). Socio-political dimensions of desertification-induced population movements. In «Desertification and Migrations». Geofoma, pp: 41-52
- Zhaoxin, W. (1991). Environmental effects related to aquifer overexploitation in arid and semiarid areas of China. XXIII IAH Congress, pp: 489-492

Original recibido: Mayo de 2000.

Original aceptado: Agosto de 2000.