

Hidrogeología del Valle del Guadiamar y zonas colindantes. Funcionamiento del sistema acuífero

Coordinadora: Marisol Manzano^(1 y 2)

Autores: C. Ayora⁽¹⁾, O. Bernet⁽²⁾, J. Bolzicco⁽²⁾, J. Carrera⁽²⁾, C. Domènech⁽¹⁾, J. C. Cerón⁽³⁾, I. Fernández⁽³⁾, P. Gómez⁽⁴⁾, M. Jaén⁽²⁾, R. Mantecón⁽⁵⁾, M. Manzano^(1 y 2), M. Martín Machuca⁽⁶⁾, C. Mediavilla⁽⁶⁾, L. Moreno⁽⁷⁾, P. Navarrete⁽⁸⁾ y J. M. Salvany⁽²⁾

(1) Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera (CSIC). e-mails: marisol.manzano@upc.es; ayora@ija.csic.es; cdomenech@ija.csic.es

(2) Universidad Politécnica de Cataluña; Dept. d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica y Geofísica. e-mails: jesus.carrera@upc.es; j.bolzicco@upc.es; josepm.salvany@upc.es

(3) Universidad de Huelva, e-mail: cerón@uhu.es; infernan@uhu.es

(4) Centro de Estudios Energéticos y Medioambientales (CIEMAT), e-mail: paloma.gomez@ciemat.es

(5) Compañía General de Sondeos (CGS), email: cgs_sevilla@cgs-sevilla.supercable.es

(6) Instituto Geológico y Minero de España, Sevilla, e-mail: oficina.sevilla@itge.mma.es

(7) Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, e-mail: l.moreno@itge.mma.es

(8) Instituto Geológico y Minero de España, Tres Cantos (Madrid), e-mail: p.navarrete@itge.mma.es

RESUMEN

Entre mayo de 1998 y la actualidad se ha realizado diversos trabajos hidrogeológicos para caracterizar el funcionamiento de los acuíferos afectados por el vertido de Aznalcóllar de abril de 1998. Entre ellos destaca la perforación de 44 sondeos de gran diámetro; un estudio geológico detallado de los aluviales de los ríos Agrio y Guadiamar y de la conexión de éste con los materiales de Almonte-Marismas (ver Capítulo 3); un buen número de ensayos de bombeo en los nuevos sondeos y de trazadores en 6 de los mismos, además de la re-interpretación de los ensayos de bombeo realizados por el IRYDA para el estudio del Plan Regable Almonte-Marismas; varias campañas piezométricas; varios muestreos hidroquímicos en unos 120 puntos y diversos modelos numéricos de flujo de agua subterránea (en el Capítulo 9 se presentan 4 de ellos).

Como resultado de estos trabajos, el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero aluvial que se ha propuesto es el siguiente: el acuífero drena las formaciones adyacentes entre la balsa accidentada y comienzo de la marisma. A partir de aquí y hacia el S, el aluvial alimenta los sedimentos del acuífero Almonte-Marismas, cuyos niveles piezométricos están por debajo del nivel freático del aluvial debido a las intensas extracciones para regadío localizadas en el Sector I y Sector Marismas del Plan Regable Almonte-Marismas. El flujo principal de agua subterránea es paralelo al valle, de sentido N a S y se concentra en la parte inferior (paleo-cauce) del acuífero, mientras que en la parte superior el flujo es más oblicuo al río.

El acuífero aluvial se recarga aproximadamente en un 50 % por la infiltración de la lluvia (entre 100 y 150 mm/año) y otro tanto por las entradas laterales (flujo superficial y subterráneo) a lo largo del contacto con las formaciones adyacentes (Margas Azules, Arenas Basales y Limos Basales). En el valle del Agrio y parte intermedia del Guadiamar alrededor de un 90 % de la descarga tiene lugar al río y el resto es principalmente flujo subterráneo hacia el S. En la zona de conexión del aluvial con el acuífero Almonte-Marismas, en ausencia de bombeos el 100 % de la descarga es por transferencia lateral hacia las formaciones de este último acuífero, mientras que si hay bombeos (valores actuales) la transferencia a Almonte-Marismas se reduce al 40 % de la descarga total.

La composición química del agua subterránea del aluvial no afectada por el vertido varía de N a S: entre la mina y la autopista las aguas son sulfatadas-cálcicas, entre este punto y el Vado del Quema son mayoritariamente bicarbonatadas-cálcicas y entre el Quema y la marisma son crecientemente cloruradas-sódicas. Esto se debe a la contribución relativa de la recarga superficial frente a la lateral, a la presencia de partículas de sulfuros entre los sedimentos aluviales y a la presencia de agua salina en los poros de los sedimentos de marisma. Los sulfuros, que pueden haberse depositado en medio acuoso o por vía atmosférica y con anterioridad al vertido de 1998, son fácilmente oxidables en la superficie del terreno y en la zona no saturada del acuífero durante la infiltración del agua de lluvia y riego. Los aportes laterales de las formaciones adyacentes son bicarbonatados-cálcicos por equilibrio con los minerales carbonatados presentes en las mismas. En el Capítulo 6 se expone las modificaciones observadas en la calidad del agua subterránea a consecuencia del vertido de abril de 1998.

Palabras clave: Acuífero aluvial, Parámetros hidráulicos, Balance hídrico, Composición química, Agrio, Guadiamar, Almonte-Marismas.

Hidrogeology of the Guadamar river alluvial valley and adjacent areas. Working of the aquifer system.

ABSTRACT

Several hydrogeological studies have been carried out since May, 1998 to characterise the aquifers affected by the Aznalcóllar tailings spill in April, 1998. These include the drilling of 44 boreholes; a detailed geological study of the Agrío and Guadamar rivers alluvial aquifers, and of the connection between the latter and the Almonte-Marismas aquifer (see Chapter 3); several piezometric surveys; pumping and tracer tests in the new boreholes; the reinterpretation of old pumping tests performed in the 1970's by IRYDA for the Plan Regable Almonte-Marismas study; several hydrochemical sampling surveys, and several numerical models (4 of them are presented in Chapter 9).

The proposed conceptual model states that the alluvial aquifer drains the adjacent formations between the Aznalcóllar mine and the NE edge of the Guadalquivir river marshes. To the S the alluvial sediments feed the Almonte-Marismas aquifer, where piezometric head is below the alluvial water table due to intense pumping for irrigation. The main groundwater flow path in the alluvial aquifer is from N to S and parallel to the river valley, and it concentrates in the palaeochannel placed in the lower part of the aquifer. In the upper part groundwater flow is slightly angled to the river.

All along the aquifer, 50% of recharge takes place by rain infiltration (between 100 and 150 mm/yr). The rest comes by lateral groundwater flow and runoff from the adjacent formations (Margas Azules, Arenas Basales and Limos Basales). In the upper and central part of the valley some 90% of discharge takes place to the river, while the rest is transferred to the S by groundwater flow. In the area of the alluvial/Almonte-Marismas connection, 100% of discharge would be groundwater flow to the Almonte-Marismas layers if pumping were absent, but taking into account the present pumping volumes groundwater transference to the Almonte-Marismas is only 40% of the total discharge.

Groundwater chemistry in the alluvial not affected by the spill varies from N to S. Between the mine and the Sevilla-Huelva highway groundwater is of the calcium-sulphate type; between the highway and the Vado del Quema it is of the calcium-carbonate type, and between the Vado and the marshes it is increasingly of the sodium-chloride type. This evolution is due to several reasons: 1) the relative contribution of surface recharge to lateral recharge (groundwater transference from the adjacent formations), 2) the presence of sulphide particles in the alluvial sediments, and 3) the presence of saline pore water in the marshy sediments. Sulphide particles may have both an aqueous or atmospheric origin prior to the 1998 spill. They are easily oxidised on the ground surface and in the unsaturated zone during rain and irrigation water infiltration. Groundwater coming from the adjacent formations is of the calcium-carbonate type due to water equilibrium with calcite in those formations. The observed modifications of groundwater quality due to the 1998 spill are presented in Chapter 6.

Key words: Alluvial aquifer, Aquifer parametres, Water balance, Chemical composition, Agrío, Guadamar, Almonte-Marismas.

INTRODUCCIÓN

M. Manzano

La información hidrogeológica existente acerca de los acuíferos de la zona antes del accidente de abril de 1998 era prácticamente nula. Por esta razón, y ante el riesgo de contaminación de dos de los acuíferos adyacentes, desde el mes de mayo de 1998 y hasta la actualidad se llevan a cabo diversos trabajos de caracterización geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica del aluvial de los ríos Agrío y Guadamar, y de la conexión de éste con el acuífero de Almonte-Marismas.

El objetivo general de los trabajos ha sido conocer con el mayor detalle posible la configuración geológica y el funcionamiento hidrogeológico de estos acuíferos, para poder simular razonable-

mente su comportamiento ante posibles cambios hidráulicos y de la calidad del agua. Los resultados han permitido establecer un modelo conceptual suficientemente robusto del funcionamiento del acuífero aluvial y de su conexión con el de Almonte-Marismas. Este modelo conceptual ha sido la herramienta básica para la construcción de los distintos modelos numéricos de flujo de agua subterránea y de transporte de contaminantes que se exponen en el Capítulo 9, así como la base para la propuesta, diseño y ejecución de la barrera geoquímica del aluvial del Agrío que se describe en el Capítulo 10.

En el apartado 4.1 se sintetiza la información hidrogeológica existente antes del vertido y los trabajos de caracterización llevados a cabo desde entonces.

En el apartado 4.2 se expone el modelo hidro-

geológico conceptual obtenido y los valores de los parámetros característicos de los acuíferos.

En el apartado 4.3 se presenta la primera caracterización química existente del agua subterránea "natural" (no afectada por el vertido) del acuífero aluvial y sectores colindantes de otros acuíferos del entorno (Paleozóico, Mioceno, Almonte-Marismas). Se discute su origen y las causas de las variaciones espaciales y temporales observadas durante los últimos dos años y medio.

En el apartado 4.4 se sintetiza el funcionamiento hidrogeológico global del sistema afectado por el vertido.

Por último, en el apartado 4.5 se recoge las principales conclusiones derivadas de los anteriores y se menciona cuáles son las necesidades de conocimiento actuales y cuál es la previsión futura en cuanto a los trabajos en marcha o por iniciar.

4.1. Información previa y estudios de caracterización realizados

C. Mediavilla, R. Mantecón y M. Manzano.

La información geológica e hidrogeológica existente en el área afectada por el vertido y su entorno próximo era escasa, y consistía en los mapas geológicos de la zona elaborados por el IGME (escala 1:50 000, serie Magna) y el vuelo fotogramétrico realizado el 2 de mayo de 1998 por ASAJA. Desde el accidente del 25 de abril de 1998 se han llevado a cabo varias actuaciones encaminadas a la caracterización hidrogeológica de la zona afectada por el vertido de lodos mineros. Dentro de estas actuaciones destacan la realización de un exhaustivo inventario de puntos de agua, incluyendo la nivelación topográfica de los mismos, y la realización de varias campañas de medidas piezométricas y de altura de lámina de agua en ríos y arroyos. A partir de los datos obtenidos durante las labores de inventario se diseñó la red básica de control para la realización de campañas de muestreo y análisis químico de aguas subterráneas. No existe información hidroquímica del agua del aluvial anterior al vertido de 1998. Tras el accidente la CHG inició campañas de control, primero quincenales, después mensua-

les y finalmente menos frecuentes, que continúan en la actualidad. También en mayo de 1998 los grupos de hidrología subterránea del CSIC-UPC y del IGME iniciaron, de forma coordinada, campañas de control hidroquímico de las cuáles se han realizado 13 hasta la actualidad. Las redes de muestreo de la CHG y del CSIC-UPC-IGME se superponen en buena parte, pero los métodos de muestreo son algo diferentes ya que los objetivos son también en parte diferentes (ver apartado 4.3.2).

Entre los trabajos realizados para completar la información hidrogeológica de la franja aluvial de los ríos Agrío y Guadamar y para completar la red de control existente, se construyeron en la zona un total de 47 sondeos de investigación de pequeño diámetro (27 de ellos realizados por EMGRISA y 20 por Boliden-Apirsa), así como 44 sondeos de gran diámetro realizados por la CHG. Estos sondeos representan un total de 884 metros de perforación.

Para el conocimiento detallado de la geometría y litología del aluvial del río Agrío en la zona de ejecución de la barrera geoquímica, se construyeron 7 sondeos según dos perfiles paralelos y transversales al cauce. Estos sondeos han servido además para la realización de ensayos de bombeo y de trazadores. Se emplearán en el futuro para el control de la eficiencia hidrogeoquímica de la barrera mediante muestreos y análisis periódicos. En el Capítulo 10 se da información sobre la geología de estas perforaciones, los ensayos realizados y la interpretación de los mismos.

Además de las campañas piezométricas se ha llevado a cabo diversos ensayos de bombeo que han permitido la obtención de valores de transmisividad en distintos puntos del aluvial, así como en la formación Limos Basales (ver Capítulo 3) situada bajo éstos. En el apartado 4.4.2 se discuten los resultados más significativos de estos ensayos y su distribución espacial.

Dentro del área afectada por el vertido de lodos mineros se diferencian tres acuíferos con significación hidrogeológica: acuífero de Niebla-Posadas, acuífero del aluvial y terrazas antiguas de los ríos Agrío y Guadamar y acuífero Almonte-Marismas. A los efectos de poder seguir

las discusiones de los capítulos subsiguientes, se presenta a continuación una breve descripción del funcionamiento hidráulico de estos acuíferos. En el apartado 4.4 se completa esta descripción.

La información hidrogeológica previa existente se concentraba en el acuífero Almonte-Marismas y su prolongación oriental hacia el acuífero del Aljarafe, cuyos primeros trabajos de investigación se remontan al Proyecto del Guadalquivir-FAO (1965-1969). Este acuífero se conoce bastante bien y ha sido objeto de numerosos trabajos. En el Capítulo 9 se discute brevemente su funcionamiento. Su papel en relación con el vertido de Aznalcóllar es especialmente relevante porque su sector NE recibe recarga del aluvial del Guadiamar (Fig. 4.1). Por tanto, en caso de conta-

minación del aluvial, las explotaciones afectadas más importantes serían las del acuífero Almonte-Marismas.

El acuífero Niebla-Posadas está formado por arenas miocenas y subyace a la formación Margas Azules, también miocena. Aflora en una franja estrecha y discontinua de orientación NE-SW. Es relevante porque las cortas de la mina lo intersectan, de forma que el llenado de agua de las mismas supone un riesgo de contaminación que requiere un estudio de detalle (ver Capítulo 12). Sin embargo, nada indica que esté conectado hidráulicamente con el aluvial del río Agrio, por lo que será ignorado en este capítulo.

Por último, el objeto principal de éste capítulo es el aluvial de los ríos Agrio y Guadiamar entre la balsa accidentada y la marisma. Como se deduce de la Fig. 4.1. (ver también Capítulo 3), el aluvial recibe agua tanto de las formaciones encajantes como de la recarga superficial (lluvia). La descarga tiene lugar al río (a lo largo de casi todo el valle aluvial) y por flujo subterráneo hacia el acuífero Almonte-Marismas (desde el entorno del Vado del Quema hacia el S). En la Fig. 4.2 se puede ver el esquema hidrogeológico conceptual aplicable a la mayor parte al valle aluvial.

4.2. Funcionamiento hidrodinámico del acuífero

J. Carrera, J. Bolzicco, M. Manzano y J. M. Salvany

4.2.1. Configuración geométrica y relación con los acuíferos laterales

El funcionamiento hidrogeológico del valle del Guadiamar viene definido por la geometría y disposición de los depósitos aluviales entre sí y respecto a las formaciones del entorno (ver detalles en Capítulo 3). La piezometría regional (Fig. 4.1) indica que el flujo en el acuífero aluvial permanece confinado lateralmente, ya que todas las aportaciones laterales fluyen hacia el Guadiamar. De esta forma, cualquier contaminante vertido en el acuífero aluvial permanecerá en el mismo hasta que descargue hacia el propio río o hacia el acuífero Almonte-Marismas, en el extremo S del aluvial.

El aluvial se encuentra encajado en materiales

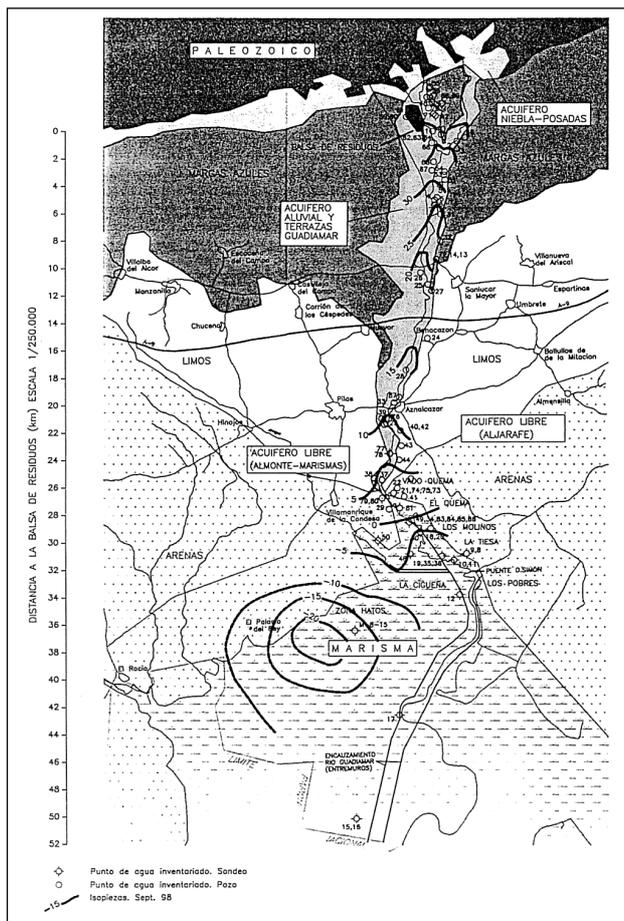


Fig. 4.1. Esquema piezométrico del entorno del aluvial del río Guadiamar y sector adyacente del acuífero Almonte-Marismas.

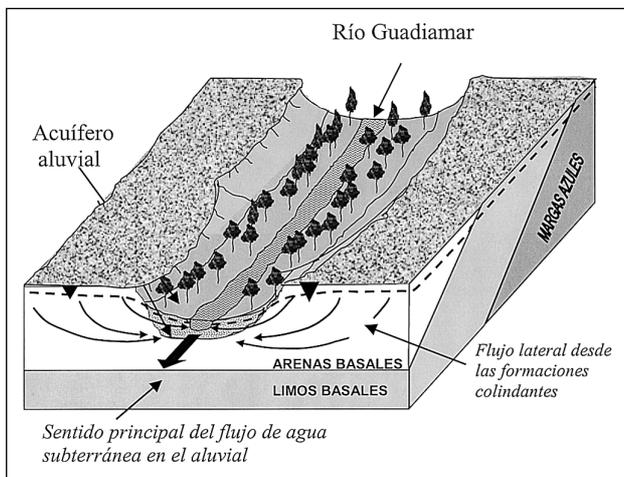


Fig. 4.2. Esquema del funcionamiento hidrogeológico del aluvial de los ríos Agrio y Guadamar. Los depósitos fluviales se disponen discordantes sobre las Margas Azules miocenas y sobre las Arenas Basales y Limos Basales plio-cuaternarios que forman parte de los sistemas acuíferos de Almonte-Marismas y de Aljarafe. El valle aluvial actúa como eje drenante de las formaciones del entorno y queda confinado hidráulicamente hasta el entorno del Vado del Quema, desde donde la situación se invierte hacia el sur.

menos permeables: la formación Margas Azules del Mioceno Superior y Plioceno Inferior y las formaciones Arenas Basales y Limos Basales del Plioceno Medio (Fig. 4.2). Pese a ello, las aportaciones laterales por flujo superficial y subterráneo son relativamente importantes debido a la gran longitud de contacto en comparación con la superficie del acuífero. En el próximo apartado se verá que las entradas subterráneas laterales son comparables a la recarga por la superficie.

Las aportaciones laterales parecen tener lugar tanto de forma distribuida como concentrada a favor de los pequeños aluviales de los afluentes del Guadamar (Molinillo, Alcarayón, San Cristóbal, etc.). Dado que los datos disponibles no permiten distinguir entre unas y otras aportaciones, en lo que sigue éstas se tratarán conjuntamente.

La descarga se produce fundamentalmente hacia el río y, en menor medida, hacia el acuífero Almonte-Marismas. La conexión con éste es particularmente compleja y su estudio se ve dificultado por la multitud de explotaciones para rega-

dío. Por este motivo la zona ha sido objeto de un estudio geológico muy detallado y de un modelo de flujo singular (ver Capítulo 9).

La geología de esta conexión ha sido analizada en detalle (Salvany et al., 2000) y queda resumida en la Fig. 4.3.

A los efectos de ordenar la presentación de los apartados sucesivos conviene dividir el acuífero aluvial longitudinalmente en tres partes: zona del río Agrio, zona intermedia y zona de conexión con la marisma. La zona del río Agrio incluye los depósitos aluviales del río Agrio y del Guadamar hasta aproximadamente el arroyo Valdegallinas (corte B de la Fig. 4.4). La zona intermedia se extiende entre este corte y el Vado del Quema. Aguas abajo del mismo se sitúa la zona de conexión con las formaciones del acuífero Almonte-Marismas.

4.2.2. Parámetros hidráulicos

A continuación se describen los tres sectores mencionados, haciendo referencia a sus parámetros más característicos y comentando brevemente la piezometría de cada uno de ellos. Los parámetros se han obtenido a partir de ensayos de bombeo y de análisis granulométricos. Estos valores se han refinado en el proceso de construcción de los modelos numéricos de flujo de agua subterránea. Tres de los modelos tienen por objeto los tres sectores del valle aluvial mencionados (Modelo Local de Flujo del aluvial del Agrio, Modelo de Flujo del Guadamar y Modelo Local de Flujo de la conexión aluvial del Guadamar/Almonte-Marismas) y el cuarto es un modelo regional que abarca los acuíferos Almonte-Marismas, Aljarafe y aluvial del Guadamar (ver Capítulo 9).

Zona del río Agrio

En la zona del río Agrio se han realizado numerosos ensayos de bombeo para caracterizar el entorno de la barrera geoquímica, situada alrededor de 1 km aguas abajo de la balsa minera. La metodología de los ensayos y una interpretación geoestadística de los mismos se presenta en el Capítulo 10. En la Tabla 4.1 se resumen los valo-

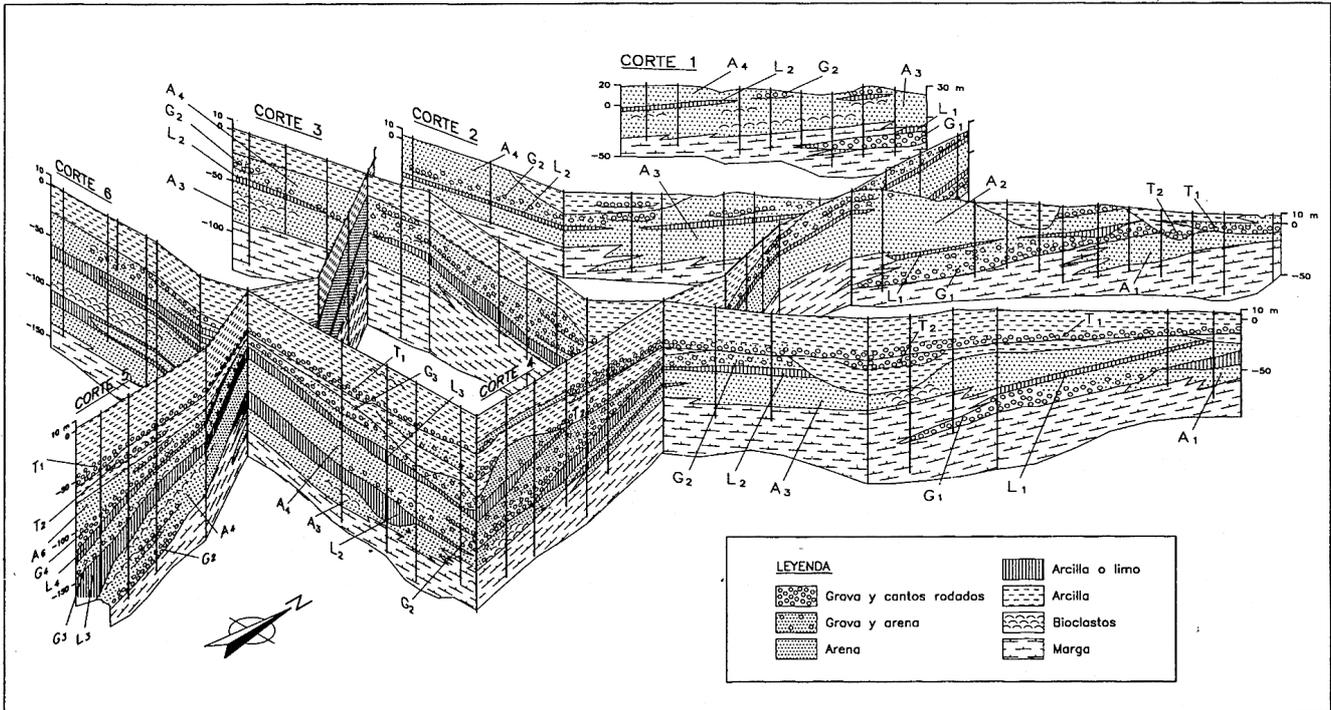


Fig. 4.3. Bloque diagrama de la conexión aluvial del Guadiamar - Almonte - Marismas. (Salvany et al., 2000).

res de transmisividad y almacenamiento obtenidos mediante interpretación convencional (método de Cooper-Jacob y Theis) y así como la conductividad hidráulica media. Dado que estos ensayos están restringidos a una zona pequeña, se han complementado con información procedente de análisis granulométricos de muestras superficiales del aluvial (Tabla 4.2). La Fig. 4.4 muestra la ubicación de la barrera geoquímica, de los sondeos (S1 a S6) utilizados para los ensayos y de los emplazamientos de muestreo superficial para análisis granulométricos. Los valores de porosidad eficaz, que en acuíferos libres es equivalente al coeficiente de almacenamiento, difieren de los estimados mediante los ensayos de bombeo debido, principalmente, a que el volumen (y por tanto la heterogeneidad) de medio que se estudia, de forma integrada, mediante uno y otro método son muy diferentes. Los valores de los parámetros obtenidos de las muestras granulométricas se encuentran dentro de los rangos fijados por la bibliografía para este tipo de materiales. Los parámetros estimados a través de los ensayos de bombeo, considerados como más representativos del conjunto del

medio, presentan algunas diferencias a lo largo de la sección estudiada. Los mayores espesores saturados y transmisividades se encuentran en la parte central. En la margen izquierda, el menor espesor de acuífero y un menor grado de conectividad con el resto del medio, producto de la posible intercalación de lentejones de material de menor permeabilidad, hacen que el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad sean inferiores que en el resto de la sección.

Los valores calibrados mediante el Modelo Local de Flujo del aluvial del Agrío (ver detalles en Capítulo 9) resultan ser similares a los inicialmente adoptados (ver Tabla 4.3), aunque deben tomarse con precaución dado que están influenciados por el grado de incertidumbre de las condiciones de contorno y recarga adoptadas.

Zona intermedia

La zona intermedia es la que menos densidad de información posee. Los parámetros hidráulicos utilizados en los diversos modelos numéricos de

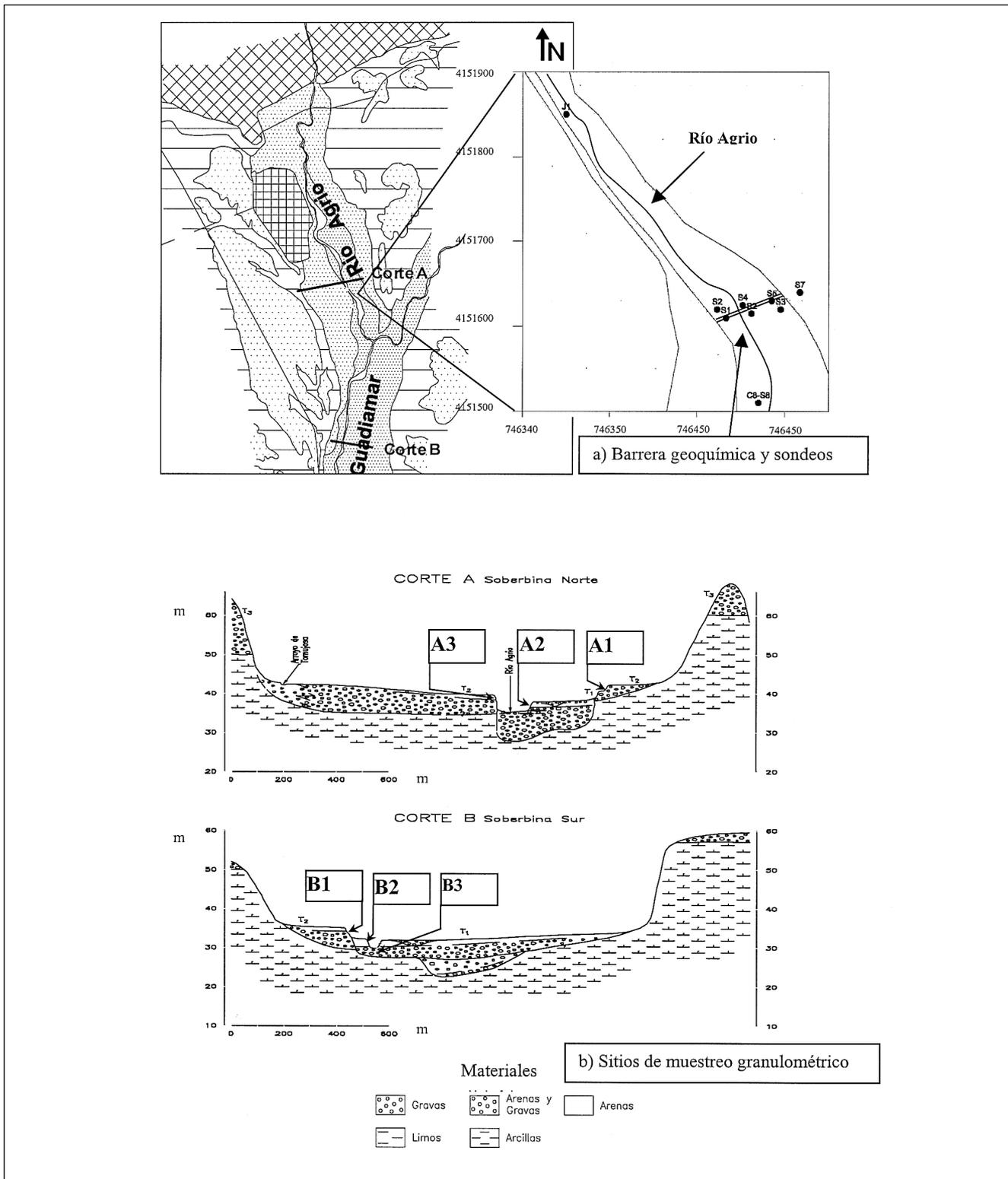


Fig. 4.4. a) Ubicación de la barrera geoquímica, de los sondeos (de la barrera) utilizados para los ensayos de bombeo en el aluvial del río Agrio y b) de los sitios de obtención de muestras granulométricas utilizadas para la estimación de parámetros hidráulicos (ver Tabla 4.2).

Sondeos de la barrera geoquímica	T (m ² /día)	S	K (m/día)	Ho (m)	Espesor Aluvial (m)
Margen derecha	2000	0,23	480	4,15	6,8
Sector central	2900	0,18	690	4,20	5,5
Margen izquierda	1700	0,08	595	2,85	4,0

Tabla 4.1. Parámetros del acuífero en la zona del río Agrio deducidos de ensayos de bombeo en los sondeos de caracterización de la barrera geoquímica (ver situación en Fig. 4.4).

Muestra	Contacto	K (m/día)	m _e
A1	T2-T1	140	0,35
A2	T2-T1	43	0,35
A3	T0-T2	21	0,26
B1	T1-T2	65	0,35
B2	T0-T1	4,5	0,29
B3	T0-T1	285	0,40

Tabla 4.2. Conductividad hidráulica (K) y porosidad (m_e) del aluvial del río Agrio (sondeos A) y Guadamar (Sondeos B) estimada a partir de datos granulométricos en muestras superficiales del aluvial en el contacto entre las diferentes terrazas.

flujo realizados provienen de una serie de ensayos de bombeo efectuados a lo largo del aluvial del río Guadamar y cuyos resultados, obtenidos mediante interpretación convencional, se resumen en la Tabla 4.4. La ubicación de los pozos ensayados se ve en la Fig. 4.5.

Estos valores son inferiores a los de la zona anterior (el pozo J-1 está situado en el aluvial del río Agrio). Pese a ello se cree que la transmisividad efectiva puede ser significativamente superior a

causa de la conectividad entre los depósitos de gravas fluviales. Por ello en el Modelo Regional de Flujo se introdujo un valor inicial de 750 m²/día (Tabla 4.5). El resultado de la calibración fue un aumento de la transmisividad, lo cual parece confirmar la hipótesis comentada. No obstante debe tomarse con precaución, ya que durante la etapa de calibración del Modelo Regional no se contaba con información detallada de la zona del Guadamar. Se considera que el valor representativo de la transmisividad puede estar entre 500 y 1000 m²/día.

Zona de conexión aluvial del río Guadamar/Almonte-Marismas

Como ya se ha dicho, la conexión entre el aluvial del río Guadamar y el acuífero Almonte-Marismas es compleja debido a la intercalación de los sedimentos de ambos sistemas (Fig. 4.3). Desde el punto de vista de los parámetros hidráulicos es importante distinguir entre los diferentes niveles transmisivos y su conectividad lateral y vertical. Para ello se han reinterpretado los ensayos de bombeo realizados durante el estudio del Plan Regable Almonte-Marismas (IRYDA, 1976),

Zona	Estimación previa	Valor calibrado	Estimación previa	Valor calibrado
	K (m/día)	K (m/día)	S	S
T2, N confluencia Guadamar	80	20	0,20	0,18
T1, N confluencia Guadamar	300	170	0,30	0,35
T2, S confluencia Guadamar	65	11	0,20	0,17
T1, S confluencia Guadamar	100	250	0,30	0,33
Paleocauce, N confluencia	800	375	1E-05	1E-05
Paleocauce, S confluencia	800	375	1E-05	1E-05

Tabla 4.3. Parámetros hidráulicos del aluvial del río Agrio estimados y deducidos durante la calibración del Modelo Local de Flujo. (Tomado de Bernet, 2000).

Pozo	Ubicación	Prof. inicial (m)	Descenso máximo (m)	Bombeo			Recuperación	
				Q (l/seg)	T (m ² /día)	K (m/día)	T (m ² /día)	K (m/día)
I-1	Vado del Quema	7,60	2,70				171	31
H-1	La Moraima	5,02	0,59	1,2	190	47	210	52
H-2	La Moraima	5,01	4,86	2,1	45	5	144	16
G-1	Vega del Puente	2,12	2,96	12,0	570	38	450	30
F-1	La Juncosa	3,20	3,99	10,0	312	29	177	16
F-2	La Juncosa	2,78	6,53	8,0	340	34	380	38
F-3	La Juncosa	5,74	5,48	7,0	200	15	300	20
E-1	Los Lagares	3,90	3,50	13,0		77	2500	
E-2	Los Lagares	3,27	3,21	7,0	360	50	770	107
D-1	Frutansa	5,39	4,35	1,4	140	32	430	98
J-1	Soberbina	1,56	0,36	4,0	1814	330	1200	220

Tabla 4.4. Parámetros hidráulicos del aluvial del río Guadamar (zona intermedia) deducidos de ensayos de bombeo.

dando lugar a los valores que se presentan en las tablas 4.6 y 4.7. Los valores ahora obtenidos presentan algunas diferencias con los obtenidos entonces. Los parámetros finalmente adoptados para los modelos numéricos se muestran en la Tabla 4.8.

4.2.3. Piezometría

Los datos de niveles que aquí se presentan proceden de las cuatro campañas realizadas por CGS para la CHG en 1998 y de las medidas que los equipos del CSIC-UPC e IGME han ido realizando paralelamente a los muestreos hidroquímicos. La situación observada corresponde a un período atípico sin extracciones en el aluvial, es decir al funcionamiento natural del acuífero. La existencia de importantes bombeos antes del accidente ocasionaba modificaciones estacionales del papel del río respecto al aluvial, como se comenta más adelante. Los datos disponibles se resumen en la Fig. 4.1, que muestra la superficie piezométrica representativa del período observado, y en la Fig. 4.5, que muestra la evolución temporal de los niveles en puntos seleccionados.

Zona del río Agrío

En la zona del río Agrío el gradiente hidráulico en el aluvial es del orden de 0,002. Las isopiezas conservan la misma morfología a lo largo de

todo el período considerado (mayo 1998-noviembre 1999), aunque algunos niveles podrían estar localmente influenciados por los bombeos practicados por Boliden durante las operaciones de limpieza de sesenta pozos y sondeos localizados en esta zona. También se registran alteraciones de carácter local en los niveles medidos en el río Guadamar como consecuencia de las obras de derivación y/o represamiento realizadas durante las operaciones de limpieza del cauce.

La piezometría de la terraza T2, ajustada mediante el Modelo Local de Flujo del aluvial del Agrío, indica que el agua subterránea fluye casi en forma perpendicular al valle debido a la menor cota topográfica del río y a la mayor transmisividad de la terraza T1 (figuras. 4.6 y 4.76). En esta terraza el flujo es esencialmente paralelo al valle, tanto en la capa superior (más arenosa) como en la inferior (con más gravas). Sin embargo en período de aguas altas se hace más apreciable la componente perpendicular al río (ver más detalles en Capítulo 9.4). En general el paleovallecauce, o parte basal del aluvial más encajada en el substrato y con granulometría más gruesa, canaliza la mayor parte del flujo paralelo al cauce.

Zona intermedia

En la zona intermedia del valle, tanto los datos medidos como los resultados de la modelación

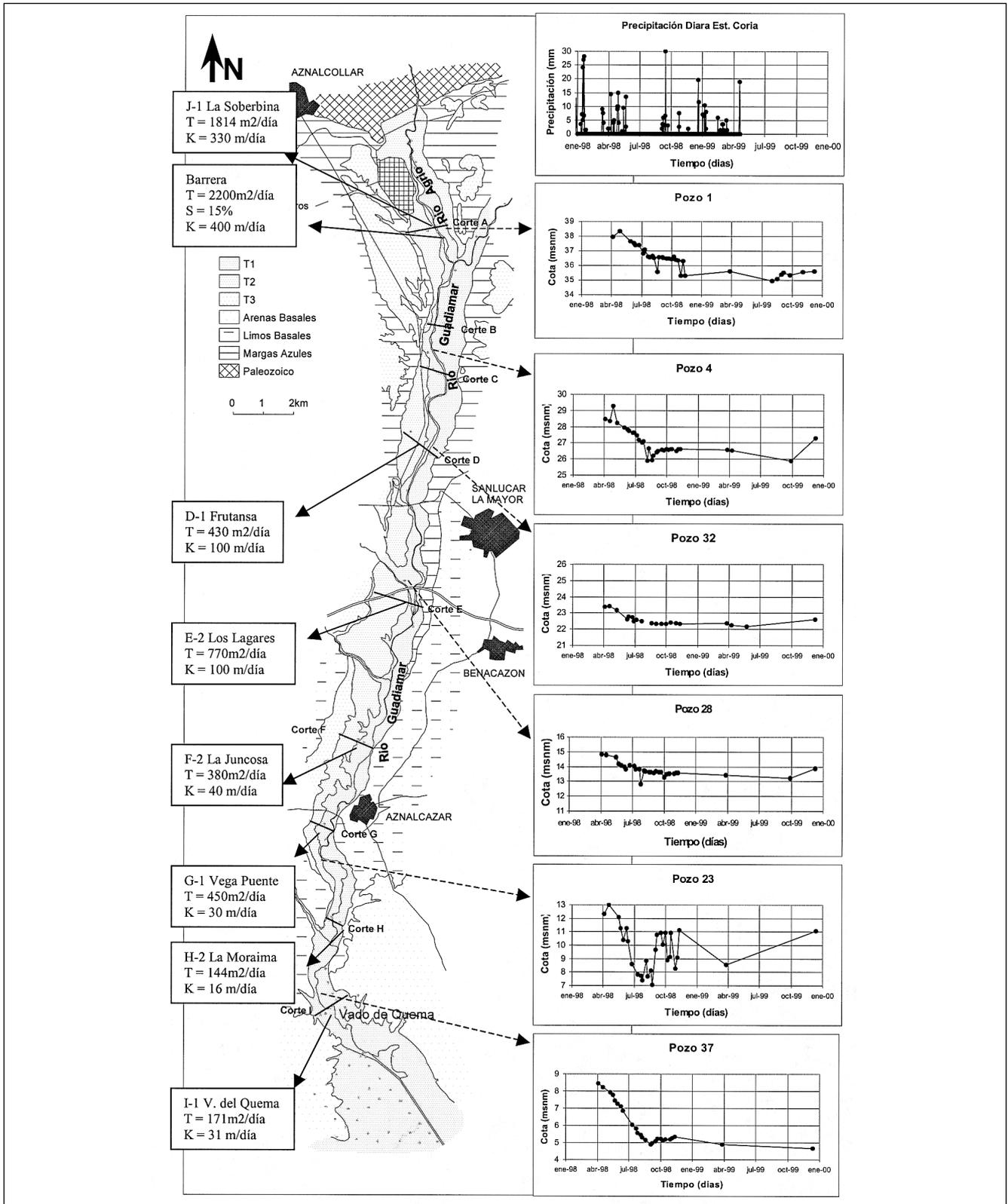


Fig. 4.5. Distribución de parámetros hidráulicos y evolución piezométrica en pozos de los ríos Agrío y Guadiamar desde el vertido.

Modelo Regional de Flujo	K (m/día)	Transmisividad (m ² /día)		Almacenamiento (S)	
		Previa	Calibrada	Previo	Calibrado
Aluvial		750	980	0,22	0,22
Relación río-acuífero	86,4				

Tabla 4.5. Parámetros hidráulicos del aluvial del río Guadamar obtenidos mediante el Modelo Regional de Flujo. (UPC, 1999).

Pozo	T (m ² /día)	Capa	Espesor (m)	K (m/día)
I-9-13	777	A ₃	30	26
I-6-5	1111	G _m	5	222
I-6-11	463	G ₁	5	93
I-6-6	961	G _m	5	192
I-6-13	612	A ₁	22	28
I-6-14	350	A ₁	13	27
I-6-4	912	G _m	5	182

Tabla 4.6. Parámetros hidráulicos de la zona de conexión entre el aluvial del guadamar y los sedimentos de Almonte-Marismas obtenidos de ensayos de bombeo en los pozos del Plan Regable Almonte-Marismas. Ver identificación de las capas en Fig. 4.3 (Tomado de Jaén, 1999).

Pozo	Capa	K _{vertical} (m/día)
I-4-2	L1	0,0020
I-4-5	L1	0,0038
I-4-6	L1	0,0060
I-4-16	L1	0,0016
I-4-8	L1	0,0023
I-6-4	L1	0,0027
I-6-13	L1	0,0020

Tabla 4.7. Conductividades hidráulicas verticales de las capas de limos estimadas por Castro (1999) a partir de los ensayos de bombeo del Plan Regable Almonte-Marismas. Ver ubicación de la capa L1 en Fig. 4.3.

indican que el flujo tiene lugar principalmente también en la dirección del valle, aunque con una componente de drenaje hacia el río. Las isopiezas conservan en general la misma forma en todo el período considerado (mayo 1998-noviembre 1999), aunque con algunas variaciones locales, especialmente al N de Sanlúcar la Mayor, donde los niveles podrían haber estado influenciados por los bombeos efectuados durante las operaciones de limpieza. Por el mismo motivo se aprecian modificaciones de carácter local en los niveles medidos en el río Guadamar.

Capa	Presente trabajo	IRYDA (1976)	Valor escogido
A ₁	27,8 26,9	235,2	30
G ₁	92,6	-	90
A ₂	-	71,13 88,7	80
L ₁	0,002 0,0023 0,0038 0,0027 0,006 0,002 0,0016	-	0,002
A ₃	-	26,9	30
G _m	222,2 192,2 182,4	143,8 117,5	200

Tabla 4.8. Conductividades hidráulicas (m/día) utilizadas en el Modelo de Flujo de la zona de conexión aluvial del Guadamar/Almonte-Marismas. (Tomada de Jaén, 1999).

Antes del accidente minero de 1998 este sector de aluvial era intensamente explotado para regadío en primavera y comienzo del verano. Los bombeos ocasionaban la inversión temporal del

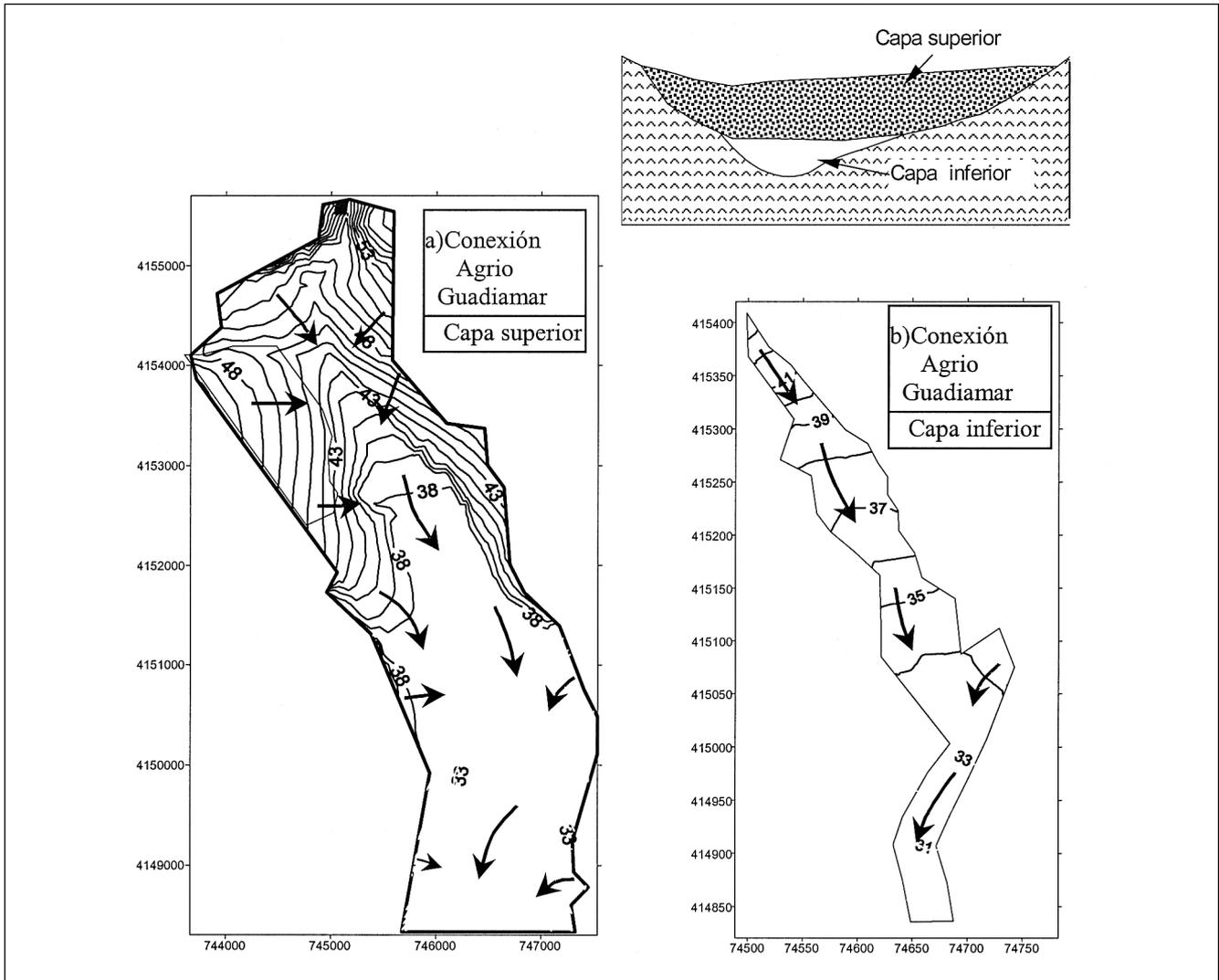


Figura 4.6. Piezometrías obtenidas mediante el Modelo Local de Flujo del aluvial del Agrio y conexión con el Guadamar. Las cotas están en metros sobre el nivel del mar (msnm) (ver sección transversal del aluvial en la Fig. 9.15).

sentido del gradiente hidráulico entre el aluvial y el río, pasando éste a recargar al acuífero (cuando el cauce llevaba agua).

Zona de conexión aluvial del río Guadamar/Almonte-Marismas

La zona puede ser analizada en dos tramos: el primero se extiende entre el Vado del Quema y el cortijo de Los Molinos, en donde el río pasa de ser ganador a ser perdedor. En esa zona el nivel piezométrico del acuífero Almonte-Marismas

pasa a estar por debajo del nivel freático del aluvial debido a los bombeos que tienen lugar en el área de Hato Ratón-Hato Blanco. En la margen izquierda, a partir del cortijo de La Tiesa se pone de manifiesto una menor conexión entre el acuífero aluvial y los acuíferos de Almonte-Marismas y Aljarafe debido a un incremento progresivo de la fracción arcilla en los sedimentos de marisma. El extremo suroccidental del área de estudio (Sector I y Sector Marismas del Plan Regable Almonte-Marismas) presenta niveles piezométricos muy bajos debido a las extracciones para regadío. Estas extracciones han generado un

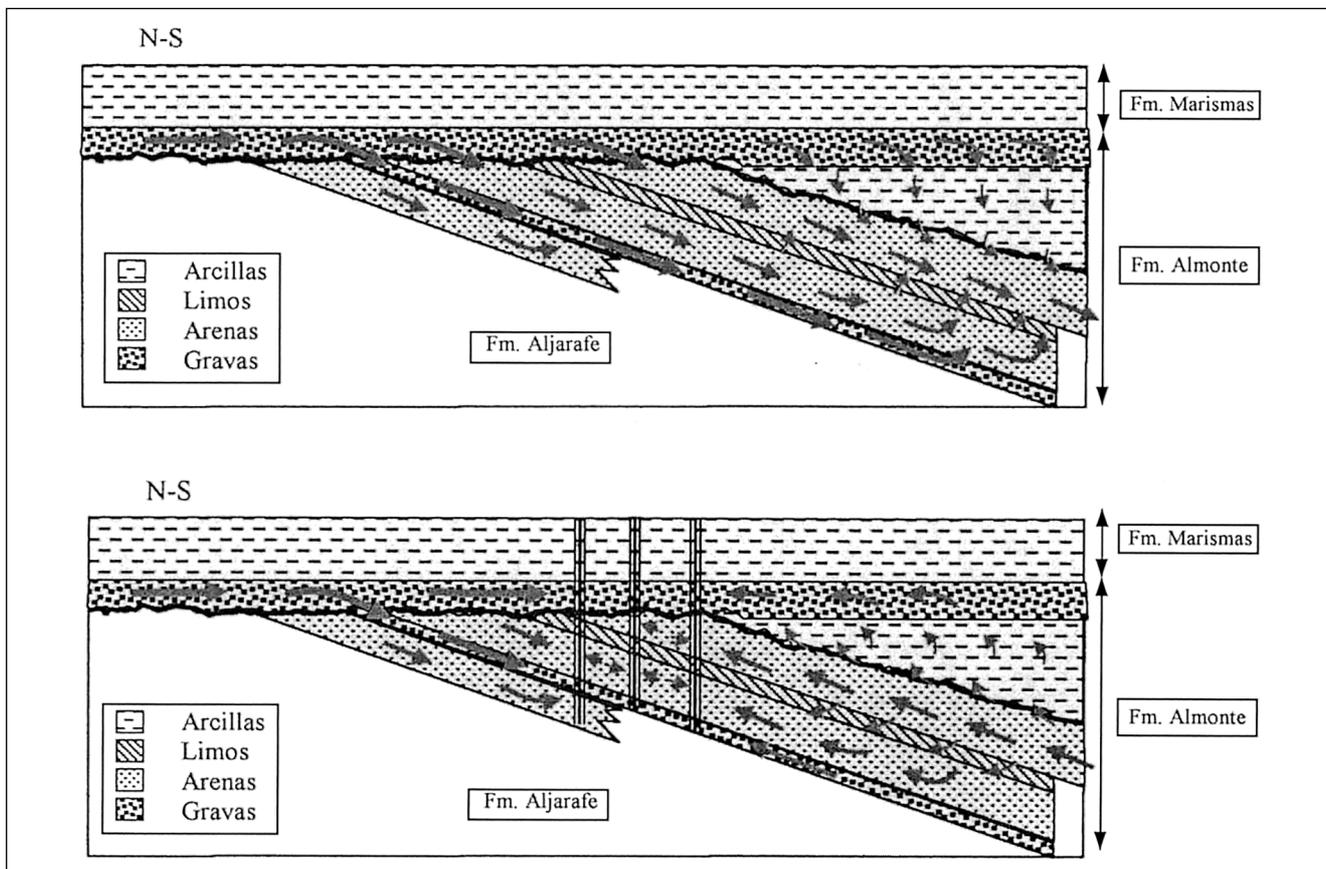


Fig. 4.7. Esquema conceptual del funcionamiento hidráulico de la conexión aluvial del Guadamar-Almonte-Marismas. Hipótesis 0, flujo natural (figura superior) e Hipótesis 1, con bombeos (figura inferior). La magnitud y longitud de las flechas son indicativas de la velocidad del flujo.

cono de bombeo de gran radio que llega a presentar en el período julio-septiembre cotas piezométricas inferiores a los 19 m bajo el nivel del mar. En época de menor demanda y comienzo de las lluvias (a partir de octubre) se produce una significativa recuperación de los niveles, aún cuando la precipitación registrada entre mayo y noviembre sea muy escasa. El gradiente hidráulico en ésta zona es también del orden de 0,002, aunque en el cono de bombeo es mayor.

La Fig. 4.8 muestra el esquema de funcionamiento hidráulico del acuífero en la zona de conexión para las situaciones de funcionamiento natural y de flujo influenciado por bombeo. Se puede apreciar la inversión de los sentidos de flujo en la segunda situación. En el Capítulo 9 (Fig. 9.10) se presentan las piezometrías correspondientes a ambas situaciones.

4.2.4. Balance hídrico

Los balances que se comentan a continuación para cada una de las tres zonas del valle aluvial son los obtenidos a partir de la modelación numérica del flujo de agua subterránea, cuyos detalles se presentan en el Capítulo 9.

Zona del río Agrio

Los aportes medios anuales del balance de masas global proceden de la simulación del flujo en régimen transitorio, considerando flujo no lineal, para el período 1994 -1999.

La recarga estimada mediante balance hidrometeorológico en el suelo es de 135 mm/año. La evapotranspiración potencial es de 960 mm/año.

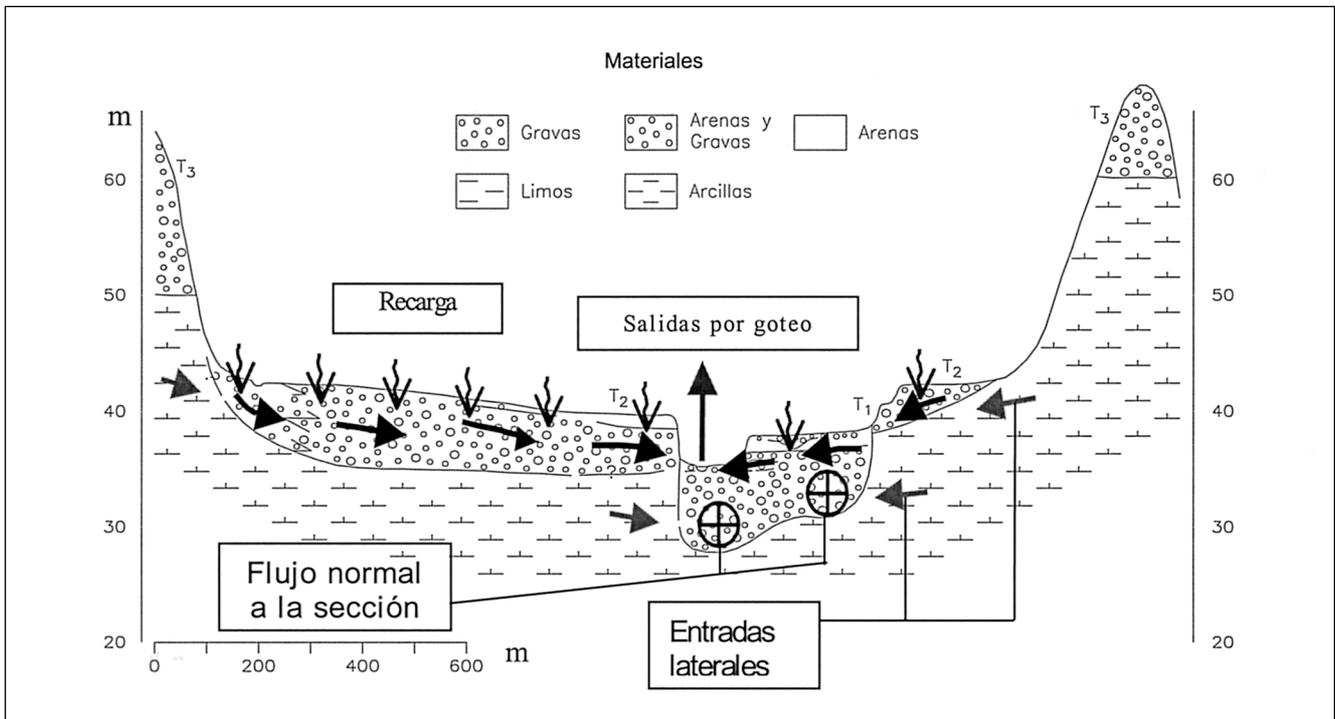


Fig. 4.8. Esquema conceptual del balance de agua en el acuífero en el entorno de la balsa accidentada. Corte A, Soberbina Norte (ver situación en Fig 4.4).

Del análisis de los componentes del balance surge que el río y los arroyos (de Los Frailes) siempre se comportan como drenantes y que el flujo por el paleocauce resulta ser hasta un orden de magnitud mayor que el de la capa superior. El 93% de las entradas al sistema se producen por recarga y flujo a través de los contornos, donde el aluvial limita con las margas. Las salidas principales del sistema se producen por descarga al río y arroyos (87%) y en menor magnitud como flujo subterráneo hacia la zona intermedia del aluvial (Tabla 4.9).

Zona intermedia

Los resultados que se presentan corresponden a los valores medios anuales del período simulado entre 1970 y 1997. La modelación corresponde a un régimen transitorio.

Dada la variabilidad espacial de las precipitaciones, la recarga calculada a partir del balance de agua en el suelo varía entre un 20-25% de la precipitación media anual. Los modelos numéricos

realizados han utilizado valores que oscilan entre 100 y 150 mm/año (ver discusión en Capítulo 9). El mismo inconveniente se aprecia al estimar las salidas por evapotranspiración potencial.

En la Tabla 4.10 se resume los resultados del balance obtenidos del Modelo Regional de Flujo para la zona del aluvial del río Guadiamar. Al igual que en la zona del Agrio, más del 90% de las aportaciones al sistema la constituyen la recarga por lluvia y las entradas laterales, en tanto que casi el 100% de las salidas del sistema se producen por descarga al río Guadiamar.

Zona de conexión aluvial del río Guadiamar/Almonte-Marismas

Los valores medios del balance corresponden al período 1970 a 1997. El régimen es estacionario, y se han considerado dos situaciones: con y sin bombeo.

En la zona de conexión la recarga es función directa de la lluvia. Los retornos de riego no

Parámetro	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)
Recarga por la superficie	8,47	
Flujo contornos E, W y N	3,78	
Entradas Guadamar	0,92	
Flujo contorno S		1,50
Goteo (salida a ríos y arroyos)		11,46
Extracciones		0,21
Total	13,17	13,17

Tabla 4.9. Balance de masas (hm³/año) del Modelo Local de Flujo del aluvial del río Agrío y conexión con el aluvial del río Guadamar. (Tomado de Bernet, 2000).

suponen recarga neta ya que el agua se saca del mismo acuífero.

En los trabajos realizados para el Modelo Local de Flujo se ha estimado que la recarga media es de 97 mm/año, considerando que dicha recarga sólo se produce en aquellos sectores donde el acuífero es libre.

En las tablas 4.11 y 4.12 se resume los resultados del balance para las hipótesis 0 y 1 (de flujo natural y con bombeo, respectivamente). Los balances resultan en ambos casos coherentes con el proporcionado por el Modelo Regional de Flujo. Para la hipótesis 0 las entradas por recarga superficial y aportes laterales de los contornos E y W son el 93% del total, en tanto que el 100% de las salidas se dan por el contorno sur hacia las capas de Almonte-Marismas. Para la hipótesis 1, el 87% de las entradas son aportes laterales del N

y E y el 96% de las salidas se dan por las extracciones y por flujo subterráneo (incluyendo goteo a través de capas de arcilla) a través del contorno sur.

4.3. Caracterización hidroquímica del aluvial de los ríos Agrío y Guadamar

M. Manzano, C. Ayora, P. Navarrete, P. Gómez, C. Domènech, I. Fernández, L. Moreno, J.C. Cerón

4.3.1. Objetivos

Los objetivos del estudio hidroquímico del agua subterránea de la zona son conocer el origen y las características del agua, identificar los procesos responsables de la variación espacial y temporal de la composición química y caracterizar la influencia de la actividad minera sobre la calidad

Parámetro	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)
Recarga por la superficie	12,80	
Regadíos Guadamar	1,89	
Flujo contorno W Guadamar	5,85	
Flujo contorno E Guadamar	1,95	
Almacenamiento	0,36	
Goteo (salida a) Guadamar		22,98
Goteo (entrada desde) Guadamar	1,22	
Goteo (salida a) Alcarayón		1,09
Total	24,07	24,07

Tabla 4.10. Balance de masas (hm³/año) del Modelo Regional de Flujo del aluvial de río Guadamar. (UPC, 1999).

Parámetro	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)
Recarga por la superficie	1,18	
Aportes arroyo Cigüeña	0,03	
Goteo zona N	0,45	
Goteo zona E	3,57	
Goteo zona O	1,55	
Goteo zona S		6,78
Total	6,78	6,78

Tabla 4.11. Balance de masas (hm³/año) del Modelo de Flujo de la zona de contacto aluvial del río Guadamar/Almonte-Marismas. Hipótesis 0 (flujo natural). (Tomado de Jaén, 1999).

Parámetro	Entradas (hm ³ /año)	Salidas (hm ³ /año)
Recarga por la superficie	1,18	
Aportes arroyo Cigüeña	0,37	
Goteo zona N	7,91	
Goteo zona E	7,40	
Goteo zona O	0,58	0,53
Goteo zona S		6,94
Caudal bombeado zona S		6,07
Caudal bombeado zona N		3,90
Total	17,44	17,44

Tabla 4.12. Balance de masas (hm³/año) del Modelo de Flujo de la zona de contacto aluvial del río Guadamar/Almonte-Marismas. Hipótesis 1 (bombeo). (Tomado de Jaén, 1999).

del agua. Paralelamente se ha estudiado el impacto del vertido minero de abril de 1998 sobre la calidad del agua subterránea, aspecto que sólo se introduce aquí y que se detalla en el subcapítulo 6.2 de esta publicación.

No existe información hidroquímica del agua del aluvial anterior al vertido de 1998, por lo que en este apartado se exponen los conocimientos existentes en la actualidad derivados de los muestreos realizados entre el accidente y la primavera del año 2000. Aunque se dispone de los datos correspondientes a las campañas de control de la CHG y estos son coincidentes con los de los equipos CSIC-UPC, IGME y CIEMAT, en aras de la rigurosidad en este trabajo se utiliza únicamente los procedentes de los tres primeros grupos ya que utilizan el mismo método de muestreo y de medida en campo y laboratorio (ver apartado siguiente).

4.3.2. Metodología

La red de muestreo

El estudio se basa en análisis químicos de aguas subterráneas, aguas de lluvia y algunas muestras de aguas superficiales (tres arroyos vertientes al Guadamar y el río Agrío en el embalse de Aznalcóllar). Las aguas subterráneas corresponden a 12 campañas de muestreo de unos 120 pozos y sondeos situados mayoritariamente en el acuífero aluvial de los ríos Agrío y Guadamar, el cual corresponde a los depósitos sedimentarios de las terrazas aluviales T0, T1 y T2 (ver Capítulo 3). 17 de los puntos están en la conexión con el acuífero Almonte-Marismas, uno está en la unidad hidrogeológica Aljarafe, otro en el Paleozoico al N de Aznalcóllar y tres en el Mioceno del entorno de la mina.

Los muestreos se realizaron entre la primera semana de mayo de 1998 y febrero de 2000, con una frecuencia no regular. El número de puntos muestreados por campaña es variable y oscila entre 20 y 70, y el número total de análisis disponible es de unos 550. Buena parte de los puntos corresponde a pozos agrícolas excavados, con diámetros entre 1,5 y 2,5 m y profundidades entre 7 y < 20 m (espesor del aluvial). Suelen tener un brocal entre 0,3 y 0,9 m y no tienen tapa, razón por la cual muchos de los situados en la trayectoria de la riada de lodo del 25 de abril de 1998 se inundaron. Unos pocos pozos situados entre el Vado del Quema y la marisma son perforaciones mecánicas entre 20 y 50 m de profundidad entubadas, con metal.

Los 44 pozos para reconocimiento geológico e hidrogeológico que la CHG construyó entre 1998 y 1999 se han ido incorporando progresivamente a las campañas de muestreo. La mayoría está en el acuífero aluvial, dispuestos en 10 perfiles transversales al río, con 2-5 sondeos por perfil. Son totalmente penetrantes, salvo los de la serie A que tienen una o dos rejillas cortas situadas en niveles de gravas y arenas aluviales intercalados con otros de arcillas y limos de marisma (ver Capítulo 3). Durante 1999 se incorporó a la red de muestreo 25 piezómetros de pequeño diámetro y totalmente penetrantes construidos en 1998 por EMGRISA y ubicados a lo largo del aluvial del Agrio y Guadamar.

Entre noviembre de 1998 y mayo de 2000 se han tomado 8 muestras de agua de lluvia en Aznalcázar. La variabilidad temporal de la composición es elevada y ha estado influenciada por la generación de polvo durante las tareas de retirada de los lodos, con la consiguiente incorporación de sulfatos a la precipitación. Por ello no se dispone aún de una composición media característica para la lluvia de la zona, aunque sí se sabe que son aguas mayoritariamente cloruradas sódicas.

La mayoría de los análisis se ha realizado en los laboratorios del IGME (Madrid) y del CSIC-UPC (Barcelona), tras contrastar los resultados de ambos laboratorios. Un pequeño número se ha analizado en el CIEMAT (Madrid y vehículo laboratorio). En la Fig. 4.9 se muestra la situación e

identificación de los puntos de la red de muestreo.

Método de muestreo y parámetros medidos

Las muestras se toman generalmente mediante bombeo a pequeño caudal (2-3 L/min) y siempre 1 m bajo la superficie del agua (los pozos y sondeos son totalmente filtrantes). Se bombea unos 5 minutos antes de proceder a tomar la muestra. En algunas ocasiones (pozos equipados) se utiliza la propia bomba del pozo y, cuando el bombeo no es posible por alguna causa, se utiliza un muestreador especial. La posible existencia de estratificación química se ha comprobado ocasionalmente mediante la medida de la conductividad eléctrica (CE) y el pH y algún análisis químico, no habiéndose observado cambios significativos. Durante el muestreo se mide, en condiciones de flujo continuo siempre que es posible, el pH, la alcalinidad, la CE, la temperatura (T) y el oxígeno disuelto (O₂).

En cada punto se toma una muestra sin filtrar ni acidular para determinar iones mayoritarios (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) y sílice, y otra muestra filtrada (0,45 mm) y acidulada hasta pH < 2 para determinar metales pesados (Al, Zn, Fe, Mn, Sr, Ba, V, Cr, Ni, Cu, As, Se, Cd, Sb, Tl, Pb y Br), la cual se conserva refrigerada hasta su análisis. La principal diferencia metodológica con los muestreos de la CHG es que este organismo no filtra las muestras para análisis de metales, pues su objetivo es conocer la concentración metálica total en relación con los valores máximos admisibles en función de los distintos usos del agua.

El seguimiento de la contaminación de las aguas subterráneas tras el accidente de Aznalcóllar ha generado un gran volumen de información cuya adecuada gestión requiere una base de datos versátil y de fácil acceso y manejo. Con este objetivo, el IGME ha elaborado la base de datos CALMA (Control del Accidente por Lodos Mineros en Aznalcóllar). La base está en entorno Acces y es compatible con la base de datos AGUAS que el IGME viene utilizando desde hace varias décadas, lo cuál facilita el intercambio de información con ésta.

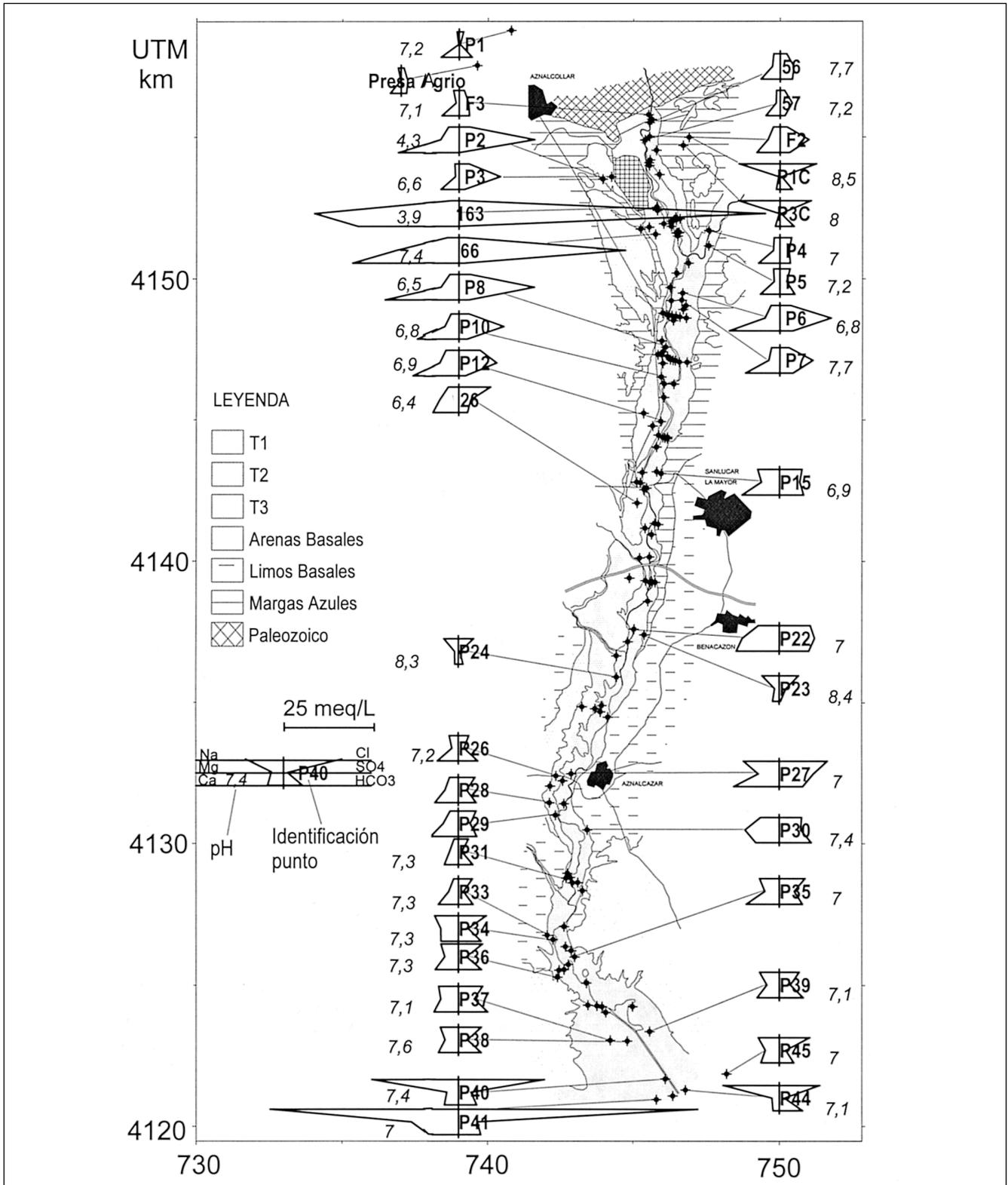


Fig. 4.9. Características químicas de las aguas no afectadas por el vertido de abril de 1998. El análisis representativo de cada punto corresponde a la mediana de entre 4 y 12 datos (según el punto).

4.3.3. Composición de las aguas subterráneas no afectadas por el vertido

En la campaña de mayo de 1998 los pozos inundados por lodo aún no habían sido limpiados, lo que permitió establecer los parámetros físico-químicos indicadores del impacto del vertido sobre el agua subterránea natural de la zona (básicamente, presencia de concentraciones elevadas de la asociación Zn + Fe + Ni + Co + Mn + Cd, observación visual en campo de partículas de lodo en el brocal del pozo y flotando en el agua, y valores de pH en general inferiores a 6,5, ver capítulo 6.2). El adjetivo "natural" se utiliza aquí como sinónimo de agua no afectada por este vertido.

Usando estos criterios de forma integrada, para estudiar la hidroquímica natural del agua subterránea de la zona se seleccionó un conjunto de pozos que no había sido afectado por el vertido de abril de 1998.

Tras las 12 campañas de muestreo realizadas, de la mayor parte de los pozos se dispone entre 4 y 10 análisis. Con ellos se ha realizado un estudio estadístico para caracterizar el agua propia de cada pozo. Dada la pequeña variabilidad temporal observada en la mayoría de las aguas, la composición característica de cada punto se ha definido usando la mediana de las concentraciones disponibles de cada especie química.

Sólo en cinco de los pozos no afectados (P6, P10, P12, P28 y P33) se ha observado una variación temporal significativa de la composición química del agua, la cual se comenta en el subcapítulo 6.2. En el resto de los pozos la composición característica propuesta se utiliza en lo que sigue para describir la hidroquímica del agua subterránea no contaminada en abril de 1998.

Características y origen de las aguas subterráneas no afectadas

La composición química de las aguas subterráneas del aluvial viene definida por la de las fuentes de recarga y su interacción con los minerales del terreno. Las fuentes de recarga al aluvial son: la lluvia (de tipo clorurado sódico), el agua superficial aportada por el río Agrío (ligeramente sulfa-

tada cálcica en el embalse de Aznalcóllar) y el Guadamar (bicarbonatada cálcica) y los aportes laterales (escorrentía superficial y flujo subterráneo; ver funcionamiento hidráulico en los apartados 4.2 y 4.4) procedentes de las formaciones que limitan con el aluvial por ambos márgenes (margas miocenas y arenas y limos plio-cuaternarios).

Atendiendo a los iones mayoritarios, la composición de las aguas subterráneas de la zona estudiada varía de norte a sur, pasando a grandes rasgos de sulfatadas-cálcicas entre la mina y aproximadamente Benacazón, a bicarbonatadas-cálcicas entre Benacazón y Vado del Quema y finalmente a cloruradas-sódicas entre Vado del Quema y la marisma (Fig. 4.9). Más detalladamente, las características y probable origen de las aguas son:

- El agua del Paleozoico (P1) es poco mineralizada y bicarbonatada cálcica, quizá por disolución de carbonatos o por incorporación de CO₂ atmosférico y disolución de silicatos de calcio. El agua del embalse del Agrío es poco mineralizada y ligeramente sulfatada-cálcica, probablemente por oxidación de sulfuros de la faja pirítica. El agua de las margas miocenas parece ser bicarbonatada-sódica-cálcica (J4), con un notable déficit de Ca respecto a HCO₃. El agua del Mioceno frente a la mina (P1Cc y P3Cc, probablemente procedente de niveles de arenas intercaladas o infrayacentes a las margas) es marcadamente clorurada sódica, con una relación $r_{Na/rCl} \geq 1$ ($r = \text{meq/L}$) que indican un ligero exceso de Na sobre Cl.

- Las aguas del aluvial del Agrío en el entorno de la mina son sulfatadas-cálcicas, si bien el total de sales disueltas es muy variable: aguas arriba de la balsa la CE es $< 1 \text{ mS/cm}$, el pH está entre 6 y 7, los contenidos en Zn son $< 1 \text{ mg/L}$ y las aguas son muy parecidas a las de la presa del Agrío (puntos F3, 56CHG y 57CHG), indicando que ésta es la principal fuente de recarga en la zona. En cambio, aguas abajo de la balsa y hasta la confluencia Agrío-Guadamar la CE oscila entre 1 y 5 mS/cm, el pH entre 3 y 6 y la mayoría de los pozos tiene aguas marcadamente sulfatadas-cálcicas, con escasos contenidos de HCO₃, Cl y Na. Además tienen concentraciones de metales pesados (y singularmente de Zn) del orden de decenas a centenares de mg/L. Son aguas muy pare-

cidas a las observadas en los pozos inundados por lodo en mayo de 1998 (ver apartados 6.2 y 10.2), pero ninguno de estos puntos está en la zona afectada por el vertido. Los puntos J3, J2, 163CHG y 66CHG están en la terraza T2 y situados aguas arriba en el sentido del gradiente hidráulico respecto a la zona que sí resultó inundada. Por tanto el origen de esta contaminación no es el vertido de 1998. Aún está en fase de comprobación si es posible que se trate de contaminación histórica ocasionada bien por anteriores episodios de inundación (durante avenidas) bien por flujo subterráneo desde la balsa de lodos o desde las escombreras situadas al NW de ésta antes de la construcción de la barrera hidráulica en torno a la misma. Una muestra del arroyo de la Dehesa (a espaldas de la balsa), tomada tras una lluvia, tenía carácter sulfatado-clorurado-cálcico. El arroyo recoge algunos lixiviados de escombreras situadas al NW de la balsa.

- Las aguas subterráneas del aluvial del Guadiamar antes de su confluencia con el Agrío (P4 y P5, Fig. 4.9) son bicarbonatadas-cálcicas y poco mineralizadas, tienen $\text{pH} \approx 7$ y concentraciones de Zn ligeramente superiores al límite de detección (20 $\mu\text{g/L}$).

- Al sur de la confluencia Agrío-Guadiamar y hasta aproximadamente la autopista Sevilla-Huelva, las aguas del aluvial y también las de la terraza T2 en posiciones lejanas y elevadas respecto al cauce son sulfatadas cálcicas, tienen pH entre 6,5 y 7 y concentraciones de Zn variables entre varias decenas de $\mu\text{g/L}$ y algunos mg/L . Los sondeos perforados por la CHG durante 1999 en perfiles transversales al río tienen las mismas características, incluso los más alejados del cauce y de la zona inundada por el vertido. Tal es el caso de los puntos B2, C1, D3 y D2, algunos incluso al W de la carretera de Aznalcóllar (Fig. 4.10). Esto sugiere como origen del SO_4 en las aguas de esta zona la oxidación de sulfuros, probablemente presentes en los sedimentos, incluso de las terrazas más elevadas del Guadiamar. El emplazamiento de estas partículas ha podido ocurrir mediante transporte y deposición por el río (en el pasado), y también mediante transporte aéreo y deposición sobre la superficie del terreno de las partículas de polvo generadas por la actividad minera. El Ca procede de la disolución de

los carbonatos sólidos del terreno, que generan también HCO_3^- . Este tampona el pH del agua, generando las condiciones para la precipitación de los metales pesados liberados durante la oxidación de los sulfuros. La presencia de aguas con la marca pirítica apoya los resultados del balance del Modelo de Flujo del Guadiamar, que indican cierta predominancia de la recarga superficial respecto a la entrada lateral de agua desde las formaciones adyacentes (ver Tabla 4.10). De otro modo cabría esperar una mayor influencia de las aguas bicarbonatadas cálcicas procedentes de esas formaciones. De hecho, esto es lo que podría ocurrir en las aguas de la margen izquierda desde Sanlúcar la Mayor hacia el sur (P15, P22, Fig. 4.9), probablemente por el aumento del gradiente topográfico e hidráulico hacia el aluvial a partir de dicha población.

- Entre la autopista y la marisma las aguas del aluvial son bicarbonatadas-cloruradas-cálcicas-sódicas, con un progresivo aumento de la componente clorurada-sódica hacia el S, hasta hacerse dominante ya en la marisma (Fig. 4.9). Las aguas tienen pH entre 7 y 7,5 y concentraciones de Zn inferiores a 80 $\mu\text{g/L}$. Se tiene una muestra de los arroyos de San Cristóbal y Alcarayón (afuentes del Guadiamar por la margen derecha) y ambas son aguas bicarbonatadas-cloruradas-cálcicas-sódica. El pozo P45, que capta agua de las Arenas Basales y Limos Basales plio-cuaternarios de la unidad hidrogeológica Aljarafe, tiene menos de 20 $\mu\text{g/L}$ de Zn. En cuanto al agua de los sondeos totalmente penetrantes de los perfiles E, F, G, H e I, aquellos sondeos perforados en la zona que estuvo cubierta de lodo tienen aguas sulfatadas-cálcicas, mientras que los perforados fuera de la zona inundada tienen aguas cloruradas-bicarbonatadas-sódicas-cálcicas (Fig. 4.10). En unos y otros los pH están entre 7 y 7,8 y las concentraciones de Zn son inferiores a 50 $\mu\text{g/L}$. Esto sugiere una relativamente rápida oxidación y transporte de los sulfuros remanentes en el terreno tras la retirada del lodo. Aunque el año 1998-99 fue más bien seco, la recarga ocurrida entre 1999 y febrero de 2000 puede justificar la incorporación del SO_4 a la zona saturada, pero sin movilización de los metales pesados acompañantes. Como fuentes de Ca están los carbonatos sólidos del terreno (arcillas y gravas) y la caliza profusamente adicionada al suelo como corrector en el último año y medio.

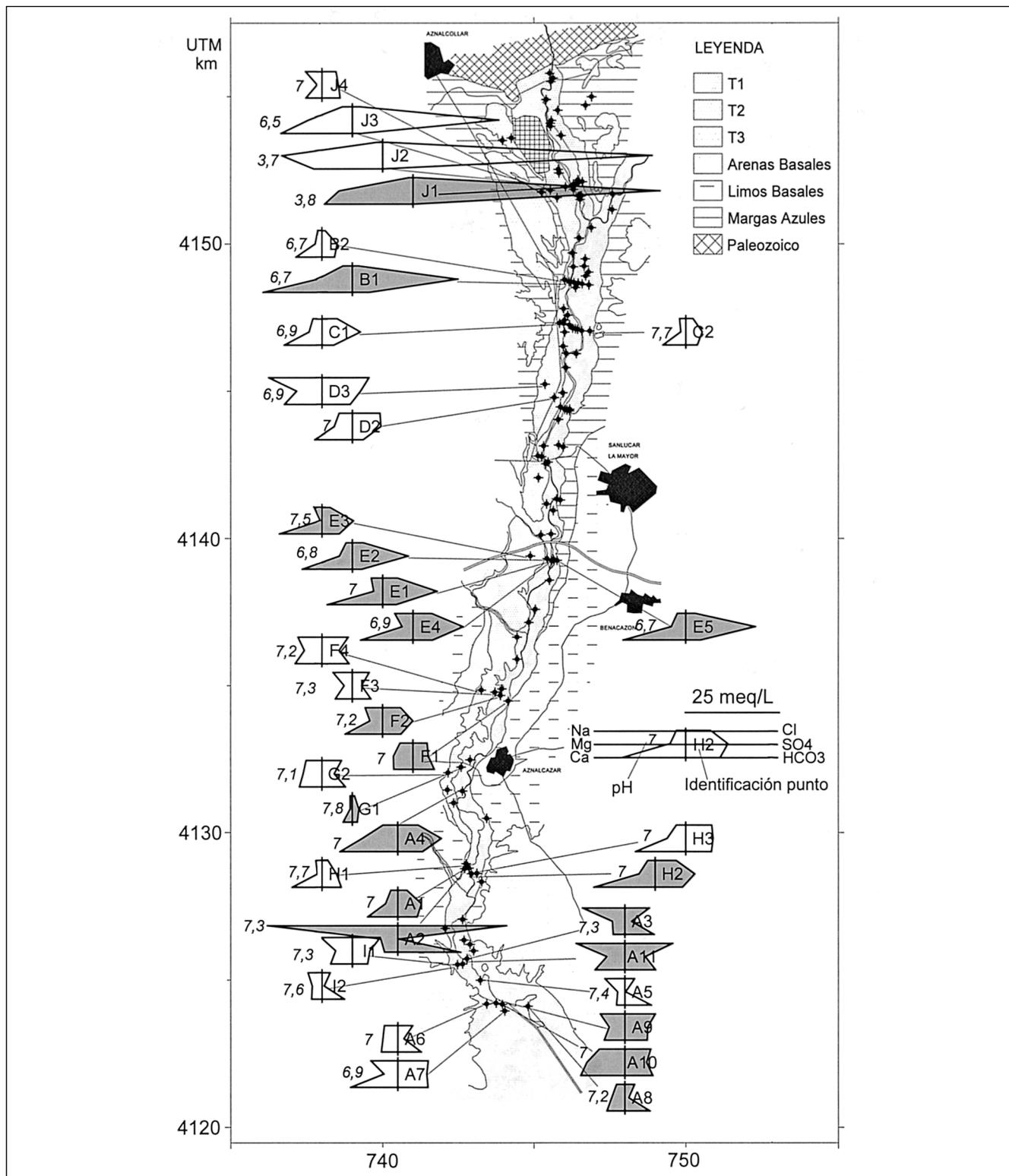


Fig. 4.10. Características químicas de los sondeos perforados tras el vertido. Gris: sondeos perforados dentro del perímetro inundado por lodo del vertido, blanco: sondeos perforados fuera del perímetro inundado. Los datos corresponden a los últimos análisis disponibles de cada punto (entre junio y noviembre de 1999).

- En la parte central del aluvial los sondeos A2 y A11 de la serie A penetran en las arenas y limos plio-cuaternarios infrayacentes a los depósitos aluviales. Estos dos sondeos tienen aguas cloruradas-sódicas que proceden de la rejilla más profunda por flujo ascendente en el interior del sondeo. El resto de los sondeos de la serie, con una o dos rejillas en el aluvial, tiene también tendencia clorurada-sódica. Varios de ellos tienen un exceso de Na sobre Cl que indica un proceso activo de intercambio iónico de ablandamiento, lo cual es coherente con el origen marino de la salinidad de los sedimentos y el actual lavado de los mismos con agua dulce. En estos puntos no se ha observado un cambio de tendencia hacia aguas sulfatadas-cálcicas, probablemente debido al mayor espesor de la zona no saturada aquí, a la existencia de materiales arcillosos que retrasan el flujo de agua y el transporte de solutos y a la mayor capacidad de adsorción de este terreno.

En conjunto las aguas subterráneas muestreadas entre la mina y la marisma muestran dos tendencias de salinización, una vinculada al Cl y presente desde el Vado del Quema (donde comienzan los depósitos de marisma) hacia el sur y otra vinculada al SO_4 y presente en casi todo el aluvial al norte de Benacazón, tanto en muestras procedentes de pozos que resultaron inundados como en las procedentes de pozos fuera del perímetro inundado (Fig. 4.11).

4.3.4. Conclusiones

La composición química del agua subterránea del aluvial del Agrío y Guadiamar se ha establecido con base en 12 campañas de muestreo realizadas durante dos años y medio en pozos no afectados por el vertido de abril de 1998:

- entre la mina y la autopista las aguas son sulfatadas cálcicas. La composición parece estar controlada principalmente por la interacción del agua de lluvia y del agua subterránea procedente del aluvial aguas arriba con los sedimentos que forman las terrazas y, en menor medida, por la composición de los aportes laterales procedentes de los acuíferos adyacentes. La oxidación de partículas de piritita presentes en los sedimentos y la disolución de CaCO_3 parecen ser los procesos determinantes. Aguas abajo de la balsa, un

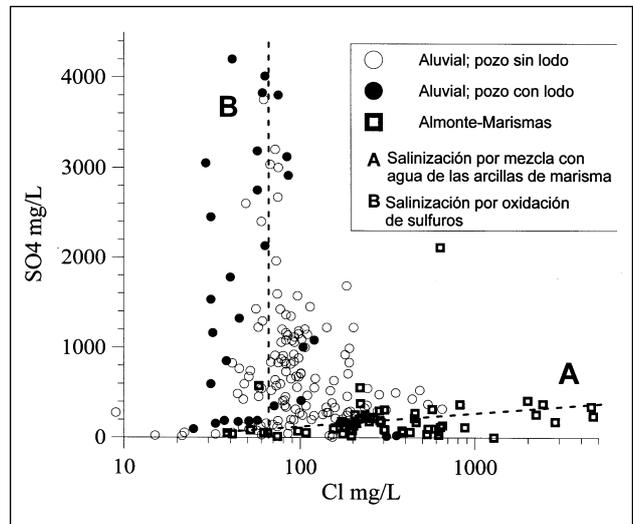


Fig. 4.11. Tendencias y causa de la salinización en el conjunto de las aguas subterráneas estudiadas.

pequeño sector de la terraza T2 tiene aguas contaminadas no ocasionadas por el vertido de 1998;

- entre la autopista y el Vado del Quema (en la margen izquierda, desde Sanlúcar la Mayor) las aguas son bicarbonatadas cálcicas, indicando quizá una mayor contribución de los aportes laterales a la química del agua del aluvial, a pesar de la dominancia de la recarga superficial (ver apartado 4.2.4). La hipótesis es coherente con el aumento de la pendiente topográfica y del gradiente hidráulico en la margen izquierda al sur de Sanlúcar. La desaparición del carácter sulfatado cálcico también podría deberse a una menor presencia de sulfuros en los sedimentos aluviales. No obstante, de entre los sondeos perforados durante 1999 en esta zona aquellos situados dentro del perímetro que resultó inundado tienen aguas características de la oxidación de sulfuros y la disolución de calcita, lo que indica un relativamente rápido transporte desde el suelo hasta la zona saturada;

- entre el Vado del Quema y la marisma las aguas del aluvial son cloruradas-sódicas por mezcla con las sales de origen marino congénitas de las arcillas de marisma. Ninguno de los puntos de control de esta zona muestra indicios de oxidación de sulfuros.

En conjunto se observa que las aguas aumentan de salinidad debido a dos procesos: 1) aumento del contenido en sulfato por oxidación de sulfuros, especialmente patente en la mitad norte del aluvial, 2) aumento progresivo del contenido en cloruro en la mitad sur del aluvial por incorporación de la salinidad de los sedimentos de marisma.

4.4. Funcionamiento del sistema

J. Carrera, J. Bolzicco, M. Manzano, M. Jaen, O. Bernet, C. Mediavilla, M. Martín Machuca

En ausencia de bombeos significativos, entre la mina de Aznalcóllar y el comienzo de la marisma el acuífero aluvial de los ríos Agrío y Guadamar drena las formaciones adyacentes. En las condiciones existentes antes del accidente de 1998, entre la primavera y el verano el río dejaba de ser efluente para pasar a ser influente debido a los bombeos para regadío en casi todo el aluvial. En la situación actual, con el proyecto Corredor Verde del Guadamar en marcha, es probable que esta situación no se vuelva a producir de manera habitual en el futuro.

El aluvial se recarga principalmente por la infiltración de la lluvia y por las entradas superficiales y subterráneas laterales. En el aluvial el agua se mueve según dos direcciones: en la parte inferior del aluvial (paleocauce) el flujo es paralelo al valle y de sentido N a S; en la parte superior el flujo es oblicuo al cauce y hacia el mismo. Por tanto, la descarga del acuífero ocurre principalmente mediante salida al río y mediante transferencia subterránea hacia el sur.

Las entradas laterales tienen lugar tanto a lo largo del sustrato (Margas Azules, Arenas Basales y Limos Basales) como a favor de los pequeños aluviales de los afluentes del Guadamar. Dado que la permeabilidad de las arenas y limos es significativamente más alta que la de las margas, cabe esperar que las entradas laterales subterráneas sean mayores en la parte intermedia y baja del valle que en la parte alta. Globalmente, las entradas laterales suponen unos 10 hm³/año.

La segunda gran componente del balance es la

recarga superficial, del orden de 100 a 150 mm/año, muy variable tanto en el espacio como en el tiempo. En la zona del Agrío, donde los materiales son granulares con muy pocos finos, se puede llegar a duplicar dicha cifra, mientras que la recarga debe ser muy baja en la zona de conexión con la marisma. Globalmente, y para un año medio, la recarga superficial supone unos 8-12 hm³/año.

En condiciones naturales, las salidas totales sumando la descarga al río más la evapotranspiración (no se han separado ya que cabe pensar que la segunda componente es mucho menor que la primera) son de unos 20 hm³/año.

En presencia de bombeos, las extracciones medias anuales en todo el valle son muy variables, pero en el período estudiado han alcanzado unos 13 hm³/año (ver Capítulo 9). En su mayor parte se encuentran concentradas en la zona de conexión con la marisma. El déficit generado por las extracciones se cubre con aportes laterales, pero también mediante la posible inversión del flujo subterráneo en las capas de arcillas de la zona de marismas (ver Capítulo 9).

El flujo subterráneo principal es el de dirección N-S a través del paleocauce, de mayor conductividad hidráulica que la parte superior del aluvial. El paleocauce parece presentar una configuración meandriforme que no necesariamente es coincidente con el trazado del cauce actual (ver Capítulo 3). Ello daría lugar a una posible desconexión entre río y acuífero en verano en la parte alta del aluvial. Bajo condiciones de explotación, también se produce una desconexión entre el río y el acuífero en la zona de contacto aluvial del río Guadamar/Almonte-Marismas. Esta desconexión se refiere a la aparición de medio no saturado entre los dos, pero no significa el cese de la recarga.

Este flujo subterráneo longitudinal es el único que podría transportar cantidades apreciables de masa de contaminantes desde el aluvial del río Agrío hacia las zonas bajas del aluvial del Guadamar y sector NE del acuífero Almonte-Marismas. Sin embargo, la probabilidad de que un contaminante procedente del aluvial alcance las captaciones de Almonte-Marismas es muy

reducida (ver Capítulo 9), y en todo caso llegaría de forma muy diluida.

4.5. Trabajos actuales y previsión de futuro

M. Manzano

En la actualidad los estudios encaminados al conocimiento del funcionamiento del acuífero aluvial se concentran en el aluvial del río Agrío entre la balsa y la confluencia con el Guadiamar, donde el acuífero está contaminado y se está construyendo la barrera geoquímica experimental que se describe en el Capítulo 10. En el resto del acuífero se mantienen, de forma sistemática, las campañas piezométricas y de control hidrogeoquímico. Estas últimas son fundamentales para continuar conociendo la evolución de la calidad del agua.

Aunque a priori no se prevé realizar otros trabajos en el aluvial fuera de la zona antes mencio-

nada, en función de los resultados de la evolución hidrogeoquímica no se descarta la necesidad de realizar más estudios (sondeos, geofísica, modelación) en el resto del aluvial a corto plazo.

REFERENCIAS

FAO, 1970. Estudio hidrogeológico del Guadalquivir. Proyecto PNUD SF/SPA 9. Informe Técnico 1. Roma, 2-115.

FAO, 1972. Proyecto piloto de utilización de las aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. Anteproyecto de transformación en regadío de la zona Almonte-Marismas (margen derecha). Proyecto PNUD SF/SPA 16, Informe Técnico 1. Roma, 1-263.

IRYDA, 1976. Informe final de sondeos de la zona regable de Almonte-Marismas (Huelva-Sevilla). Memoria, anejos y planos. Sevilla, 1-110.

Salvany, J.M., Carrera, J.; Mediavilla, C.; Jaén, M.; Vázquez-Suñé, E.; Castro, A.; Manzano, M. 2000. Litoestratigrafía y paleogeografía de los depósitos pliocuaternarios del margen NO de las marismas del Guadalquivir (Huelva-Sevilla). Geotemas 1 (4): 291-297