



Universidad de Granada

**POSIBILIDADES DE EXPLOTACIÓN SOSTENIBLE DEL
ACUÍFERO DEL RÍO VÉLEZ EN EL MARCO DE LAS
ACTUACIONES DE CONSOLIDACIÓN DE LOS
REGADÍOS DEL PLAN GUARO
(PROVINCIA DE MÁLAGA):
FASE INICIAL**

Proyecto:

*Asistencia Técnica a la
Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A.*

Octubre de 2007

El presente Estudio de asesoramiento técnico a la **Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A. (AcuaMed)** ha sido elaborado por el **Instituto Geológico y Minero de España (IGME)** con la colaboración de la **Universidad de Granada (UGR)**. Ha participado el siguiente equipo de trabajo:

Instituto Geológico y Minero de España

Juan Antonio López Geta (*), Dr. Ingeniero de Minas
José Luis García Aróstegui, Dr. en Ciencias Geológicas
José Juárez García, Ingeniero Técnico de Minas

Universidad de Granada (Instituto del Agua)

José Benavente Herrera (*), Dr. en Ciencias Geológicas
Rebecca Bahls, Geóloga
Azzurra Lentini, Geóloga

(*: Responsables del estudio)

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 8 |
| 2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y SELECCIÓN DEL AREA DE TRABAJO | 9 |
| 3. LABORES REALIZADAS | 12 |
| 4. INFORMACIÓN HIDROGEOLOGICA PREVIA..... | 16 |
| 4.1. Antecedentes sobre el acuífero del río Vélez | 16 |
| 4.2. Evoluciones piezométricas locales | 18 |
| 4.3. Piezometría: morfología y gradientes | 20 |
| 4.4. Parámetros hidráulicos | 22 |
| 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PERFORACIONES Y DE LOS MATERIALES ATRAVESADOS | 24 |
| 6. OBSERVACIONES PREVIAS A LOS ENSAYOS | 29 |
| 7. SECUENCIA DE ENSAYOS HIDRÁULICOS..... | 33 |
| 8. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO DE 24 HORAS CON CAUDAL CONSTANTE | 35 |
| 9. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DEL ENSAYO DE BOMBEO Y DE RECUPERACIÓN | 36 |
| 10. ENSAYO DE INYECCIÓN DE TRAZADOR..... | 38 |
| 11. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS | 41 |
| 12. CURVAS CARACTERÍSTICAS Y EFICIENCIA DE LOS SONDEOS | 45 |
| 13. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DE LAS RECUPERACIONES TRAS LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS..... | 48 |
| 14. CONSIDERACIONES SOBRE LOS VALORES DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS (LABORATORIO Y CAMPO)..... | 49 |
| 15. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN ESTACIONARIO EN UN SONDEO-TIPO | 50 |
| 16. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN TRANSITORIO EN UN SONDEO-TIPO | 52 |
| 17. OBSERVACIONES HIDRODINÁMICAS POSTERIORES A LOS ENSAYOS . | 55 |
| 18. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS | 60 |

| | |
|--|-----|
| PUNTO..... | 62 |
| 19. ESTADO ACTUAL DE LA INTRUSIÓN EN EL ACUÍFERO..... | 66 |
| 20. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL DE EXPLOTACIÓN PLANTEADO . | 73 |
| 20.1. Balances generales del acuífero y datos experimentales previos | 73 |
| 20.2. Modelización del ámbito de explotación | 76 |
| 21. PROPUESTAS DE REDES DE CONTROL | 87 |
| 21.1. Piezometría..... | 87 |
| 21.2. Intrusión marina | 93 |
| 21.3. Red de control de la calidad de las aguas subterráneas | 94 |
| 21.4. Otras redes de control | 97 |
| 22. PROPUESTA DE GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS..... | 98 |
| 23. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 103 |

ANEXOS

Anexo 1. Interpretación de ensayos hidráulicos mediante Aqtesolv

Anexo 2. Reportaje fotográfico

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la confianza depositada por **AcuaMed** en el equipo responsable del estudio. Esta circunstancia cabe personalizarla en la excelente predisposición que siempre ha mostrado **D. Fernando Troyano Lobatón**. Se agradece especialmente la colaboración del Director de la oficina en Málaga de dicho organismo, **D. Juan Carlos Díaz Verdoy**, el cual ha sido además el organizador de varias reuniones de seguimiento con objeto de establecer las necesarias conexiones con el trabajo llevado a cabo por el estudio *Pereda 4* (responsable: **D. Carlos Miró**, cuya ayuda y la de sus colaboradores igualmente se agradece). Asimismo se agradece el interés de **D. Fermín López Unzu** (AcuaMed). En todas estas reuniones ha estado presente, por parte de la Delegación en Málaga de la **Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía**, **D. Álvaro López García**, el cual ha suministrado informes técnicos de gran interés para el estudio y ha organizado en Vélez-Málaga unas interesantes jornadas de divulgación sobre nuevas tendencias en la gestión de los recursos hídricos del área. Los autores de este trabajo no pueden dejar de reconocer su decidida actitud de apoyo a los estudios hidrogeológicos en el contexto de esos nuevos esquemas de gestión y le reiteran su agradecimiento.

Al organismo **Cuenca Mediterránea Andaluza** (CMA). En particular, al responsable del Servicio de Hidrología, **D. Alfonso Santos-Olmo**, por permitir y facilitar el acceso a puntos de la red de observación que mantiene dicho organismo, así como por suministrar información hidrogeológica diversa en relación con los controles que ese Servicio lleva a cabo en la mencionada red. Este agradecimiento se extiende también a **D. Alfonso Esteve**, por facilitar la consulta de informes hidrogeológicos previos. Por último, nuestro reconocimiento al Comisario de Aguas de la CMA, **D. Juan Manuel Calvo**, por las facilidades dadas en determinadas fases del trabajo, su apoyo y por las sugerencias respecto a cuestiones a tener en cuenta para la protección de los recursos hídricos subterráneos en el área de estudio.

En ciertas fases del trabajo de campo y determinaciones de laboratorio se ha contado con la amable y eficaz colaboración del **Dr. Iñaki Vadillo**, profesor del Dpto. de Geología y Ecología de la **Universidad de Málaga**, a quien agradecemos su dedicación.

Los profesores de la **Escuela Politécnica de Linares** (Universidad de Jaén), **Dres. María del Carmen Hidalgo, Javier Rey y Julián Martínez** han aportado colaboración material y personal para la realización de perfiles de prospección geofísica en el área y su posterior interpretación. Nuestro reconocimiento por ello.

Durante la realización de los ensayos de bombeo se trabajó en estrecha vinculación con los técnicos de la Empresa **CEMOSA**, responsable de la ejecución de las perforaciones. En particular queremos destacar la amable colaboración prestada por **D. Juan Manuel Rodríguez**.

Los propietarios o encargados de fincas o de comunidades de regantes en cuyas captaciones se han efectuado medidas y muestreos diversos han estado siempre dispuestos a facilitar estas labores, por lo que se les agradece su colaboración. En esta fase de los trabajos es de destacar la ayuda recibida por parte de **D. Juan Gámez Bermúdez** (Comunidad de Regantes del Río Vélez), y a los propietarios y encargado (**D. Francisco Badía**) de la Finca Los Álamos, donde se encuentra ubicado el sensor automático.

0. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sector del acuífero del río Vélez (provincia de Málaga), objeto de los trabajos en los que se centra este estudio, corresponde al tramo de aproximadamente 1 km de longitud situado aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, a una altitud aproximada entre 23 m y 28 m s.n.m.

Este sector incluye cuatro perforaciones realizadas por la Sociedad Estatal AcuaMed. El estudio analiza la información obtenida en la fase de realización de los cuatro sondeos (agosto a octubre de 2006) y, sobre todo, una serie de ensayos hidráulicos realizados a continuación. Esta labor se ha complementado con controles hidrogeológicos diversos (medidas piezométricas, muestreos físico-químicos, registros de conductividad y temperatura en perforaciones, aforos diferenciales en el río Vélez) y prospección geofísica de superficie (tomografía eléctrica) en buena parte de la extensión del acuífero, durante el periodo comprendido entre octubre de 2006 y octubre de 2007. Asimismo se aportan datos sustanciales para el conocimiento del acuífero de cara a plantear su explotación sostenible, si bien se indica la necesidad de otras tareas de detalle que son valoradas de forma aproximada.

Los registros históricos de la profundidad del nivel freático desde el año 1983, muestran que en el sector estudiado, éste oscila entre 3 m y 25 m, aproximadamente. Sin embargo, en los últimos diez años lo usual es que la profundidad esté entre 4 m y 11 m, apreciándose menores descensos en el periodo estival respecto a años precedentes.

En el periodo de cinco meses comprendido entre mediados de octubre de 2006 y mediados de marzo de 2007 se ha registrado un ascenso del nivel piezométrico en el sector estudiado que varía entre 2 y 4 m según los puntos. Desde esa última fecha hasta octubre de 2007 la profundidad se ha incrementado en unos 5 m, alcanzándose valores próximos a los 10 m, lo que está dentro de la tendencia observada en los últimos diez años.

Los mapas de isopiezas incluidos en estudios previos indican que en situaciones de sequía, además de una desaturación media de 13 m en el tramo considerado, parece manifestarse una circulación hacia el aluvial del río Vélez procedente de su margen izquierda. En la situación de niveles altos, el flujo es sensiblemente paralelo al eje fluvial, procedente de sectores del acuífero situados aguas arriba.

Los espesores de aluvial atravesados en cada perforación han sido 46,5 m (S-4), 41 m (S-3), 34 m (S-2) y 10,2 m (S-1). Según esto, los datos previos (CHSE, 1987) que apuntaban a valores cercanos a los 70 m, se han revelado como inexactos. Los valores de espesor saturado son del orden de 5 m (S-1), 30 m (S-2 y S-3) y 40 m (S-4). De acuerdo con ello, el punto S-1 se considera como negativo a efectos de su posible uso como captación.

La testificación litológica detallada de las muestras obtenidas en cada perforación indica que, aunque la heterogeneidad en el detalle es muy elevada, en el conjunto puede asimilarse simplificada a un sistema homogéneo, sin capas bien definidas, que conforma un acuífero de carácter libre.

En los sondeos 3 y 4 se han obtenido “muestras integradas”, cuyo tamaño corresponde a una grava fina en ambos casos. La permeametría ofrece valores de 17 m/d y 24 m/d, respectivamente, coherentes con materiales de tamaño entre arenas medias y gravas finas. Mediante la aplicación de la fórmula de Hazen se obtienen valores de permeabilidad de 3 m/d para el S-3 y de 54 m/d para el S-4.

Los ensayos hidráulicos se llevaron a cabo entre los días 18 y 25 de octubre de 2006. La conductividad del agua bombeada a lo largo de las pruebas no experimentó cambios apreciables respecto del valor de 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Del ensayo de trazador resulta un valor de velocidad horizontal de flujo entre 1 y 5 m/d.

Las curvas características obtenidas en los ensayos de bombeo escalonados indican que la relación entre caudal bombeado y descenso producido en el propio pozo se aleja de la linealidad sobre todo a partir de 40 L/s. También se advierte el mejor rendimiento (caudal específico) que presenta el S-4 respecto del S-3 para los

caudales más elevados ensayados. Para un caudal de 40 L/s, la eficiencia que resulta para el sondeo S-3 es del 23 % y la del S-4 es del 47 %.

En los ensayos de bombeo y de recuperación analizados se obtienen generalmente valores de Transmisividad entre aproximadamente 1700 m²/d y 5000 m²/d. La permeabilidad que resulta está entre 50 m/d y 170 m/d, con un valor promedio general aproximado de 100 m/d. Este valor es algo más del doble del estimado a partir del ensayo de trazador y unas cinco veces superior al promedio de las permeametrías. Dentro de que se trata de cifras del mismo orden de magnitud, las diferencias ponen de manifiesto el efecto de escala que resulta de considerar un volumen de terreno muy superior.

Se ha considerado un sondeo-tipo para la zona donde se han realizado las perforaciones, de acuerdo con las características siguientes:

- Permeabilidad: $K = 100 \text{ m/d}$
- Coeficiente de almacenamiento: $S = 0,2$
- Espesor saturado: $h_0 = 25 \text{ m}$
- Caudal constante de bombeo: $Q = 40 \text{ L/s}$
- Eficiencia del sondeo: $E_p = 30 \%$
- Diámetro del sondeo: $d = 500 \text{ mm}$

Se ha estimado, a partir de tales características, la evolución del descenso del nivel de agua al cabo de un mes de bombeo, tanto en el propio pozo de extracción (pasaría de 4 m a 6 m) como a una distancia de 25 m del mismo (pasaría de 0,2 a 0,8 m).

Si se hace la hipótesis de que en el transcurso del bombeo se alcanza el régimen estacionario con radio de influencia $R = 500 \text{ m}$, el descenso que se obtiene en el propio pozo de extracción es de casi 6 m, mientras que a 25 m del mismo pasa a ser de unos 70 cm.

Antes de acometer la perforación de nuevas captaciones, se considera muy aconsejable la realización de estimaciones de profundidad del sustrato. Tales estimaciones pueden basarse (deseablemente) en datos directos, como son los

ofrecidos por los sondeos de reconocimiento, aunque como alternativa más económica, pero menos resolutive, se puede tratar de utilizar técnicas geofísicas.

En relación con la idea anterior, AcuaMed encargo a la empresa CEMOSA la realización de un perfil sísmico longitudinal, prácticamente coincidente con el eje del cauce, paralelo a la línea que une los sondeos S-1 y S-4. De dicho perfil, y de los datos obtenidos en los sondeos, se desprende que: a) la profundidad del sustrato hacia aguas arriba no se incrementa; b) hay un mayor espesor local de aluviones entre los sondeos S-3 y S-4; c) el sustrato parece aumentar su profundidad hacia la margen izquierda del cauce. En función de ello, parece recomendable seleccionar un punto entre los sondeos S-3 y S-4 para ubicar una nueva captación.

Un perfil de tomografía eléctrica realizado en dirección paralela a la línea de sondeos, pero desplazado unos 50 m hacia la margen izquierda del cauce, confirma la existencia de variaciones espaciales significativas en el espesor del acuífero en el sector estudiado.

Si se piensa en realizar perforaciones adicionales en el entorno estudiado, se recomienda desplazarse hacia enclaves situados más al Este del perfil longitudinal de sondeos. En tal caso, se considera de interés contrastar la geometría del sustrato mediante sondeos de reconocimiento, dada la dificultad de realizar perfiles geofísicos eléctricos de longitud suficiente en dirección transversal al cauce.

Como alternativa a tener en cuenta frente a la construcción de nuevos sondeos, se considera de interés la utilización de captaciones existentes al Este del enclave estudiado, como las del sector del Molino de las Monjas, tras una fase previa de contraste de los caudales extraíbles en las mismas y de su rendimiento.

Un muestreo de las características físico-químicas del acuífero, entre el sector de confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa y el borde costero, realizado a mediados de marzo de 2007, ha puesto de manifiesto valores de conductividad eléctrica en las aguas bombeadas comprendidos aproximadamente entre 700 y 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores inferiores se han medido en el sector situado más aguas

arriba, próximo a las perforaciones de AcuaMed. El flujo en el acuífero implica un incremento natural de conductividad y así se alcanzan valores en el sector deltáico del orden de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los caudales que el río presentaba en las fechas del muestreo (entre 150 y 50 L/s, aproximadamente, llegando a descargar al mar) proceden del drenaje del acuífero a partir de las inmediaciones de Vélez-Málaga (aguas arriba el cauce estaba seco) y su conductividad es de alrededor de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de conductividad en el acuífero se han registrado en la vega cerca de Vélez-Málaga y obedecen seguramente a efectos locales de reciclaje de regadíos.

El drenaje del acuífero hacia el cauce del río se midió con detalle a finales de junio de 2007, obteniéndose valores de caudal entre 10 y 30 L/s, pero entonces el flujo en el tramo más próximo a la desembocadura se hacía inapreciable.

Se han efectuado también registros verticales de conductividad en piezómetros situados en el sector deltáico en ambas márgenes del cauce, los cuales, en otras ocasiones, habían indicado presencia de aguas salinas, como el punto IGME-2, de 42 m de profundidad, situado a unos 700 m del mar. El rango de conductividad registrado ha sido de 900 a 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cuando existen registros previos en este punto entre 4000 y 40000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Un perfil de tomografía eléctrica realizado en dirección paralela al cauce del río Vélez, por su margen izquierda, en las inmediaciones de la desembocadura, detecta una lengua de agua salina en el acuífero con espesor de unos 20 m y escasa penetración tierra adentro. En las condiciones actuales, pues, no parecen existir indicios de intrusión marina significativa.

Con los datos de recarga del acuífero en condiciones de año medio (33 $\text{hm}^3/\text{año}$, según JA-ITGE, 1988, un 85% de la cual procede de la infiltración de aguas superficiales) y de salidas por bombeo que se estiman para la situación actual (16 $\text{hm}^3/\text{año}$, pendiente de verificación), la explotación planteada de 6,5 $\text{hm}^3/\text{año}$ no modifica el carácter excedentario del acuífero en condiciones de año medio. Además, el escenario previsto para la mencionada explotación (riegos en la margen derecha) conlleva el que las captaciones reducirán sensiblemente, cuando

no de manera total, su régimen de extracciones. Ello conduciría a un balance hídrico netamente excedentario, en el que las salidas subterráneas hacia el cauce del río en su tramo final y las producidas directamente hacia el mar serían superiores a las actuales (estimadas, de forma tentativa, en 3-6 hm³/año y en 11-14 hm³/año, respectivamente).

En cuanto a datos experimentales previos que permitan valorar la respuesta del acuífero frente a bombeos de cierta intensidad, se puede destacar que de junio a septiembre de 1995, al final de un periodo de sequía en el que no existía suministro de recursos desde La Viñuela, se extrajeron del orden de 16 hm³ y en el sector objeto de estudio (piezómetro P6-2, muy próximo a las perforaciones de AcuaMed) el descenso producido fue de 8,2 m.

Se ha realizado un modelo de flujo subterráneo en régimen permanente de la parte de acuífero en que se ha centrado el estudio, correspondiente a una superficie de aluvial de 5 km². La recarga media estimada es de 10,5 hm³/año. Se ha simulado el efecto de bombear 6,5 hm³/año. En primer lugar, a partir de cinco captaciones situadas en el sector de las perforaciones de AcuaMed, y luego a partir de ocho captaciones distribuidas entre dicho sector y el final del aluvial del río Vélez, inmediatamente antes de su confluencia con el Benamargosa. En el primer caso se estiman descensos máximos de 7-8 m centrados en el enclave de los bombeos. El incremento en el número de captaciones y su distribución en diferentes enclaves de bombeo, circunstancia que se reproducía en la segunda simulación, trae como lógica consecuencia la disminución de los descensos máximos bajo los enclaves de extracción, aunque son más extensos los sectores del acuífero afectados por las depresiones piezométricas.

Ante un escenario de explotación controlada de los recursos subterráneos, se considera básico acometer un estudio hidrogeológico detallado del acuífero, deseablemente apoyado por un modelo de flujo y transporte de solutos en régimen transitorio. Esta herramienta permitiría, entre otros aspectos, cuantificar salidas subterráneas al río y al mar, evaluar descensos piezométricos y determinar variaciones espacio-temporales de la interfase agua dulce-agua marina producidos

por los bombeos en distintas condiciones hidrometeorológicas, particularmente las adversas (periodos de sequía).

En cualquier caso, resulta obligado mantener controles sobre el buen estado cuantitativo y cualitativo de la masa de agua subterránea del río Vélez, particularmente frente a un esquema de explotación controlada de sus recursos. Aunque esto ya se viene realizando por el Organismo de Cuenca, en el presente estudio se revisa el estado de las redes de control (de piezometría, de calidad de las aguas subterráneas y de intrusión marina) y se proponen actuaciones para restituir puntos desaparecidos o mejorar el estado de los existentes que hayan experimentado algún deterioro que pueda afectar a su representatividad. El diseño de redes propuesto para el acuífero se complementa con recomendaciones de afloros en cursos superficiales naturales y artificiales para completar la evaluación del funcionamiento del acuífero (recarga y descarga) así como para establecer cuantitativamente las relaciones río-acuífero.

Por último, se considera necesario para la correcta gestión de la masa de agua subterránea disponer de estimaciones fiables sobre los volúmenes bombeados actualmente del acuífero en las diferentes captaciones, conocer la naturaleza y el estado administrativo de éstas así como la distribución temporal de los caudales extraídos y el uso a que se destinan estos recursos.

1. INTRODUCCIÓN

La Sociedad Estatal Aguas de las Cuencas Mediterráneas S.A. (AcuaMed), tras un acuerdo alcanzado a finales de 2005 con la Delegación de la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía y representantes de las Comunidades de Regantes del Plan Guaro-Axarquía (Málaga), ha instado la realización de un Proyecto Informativo de las actuaciones necesarias para la reutilización de aguas residuales en la Costa del Sol oriental y consolidación de los regadíos del citado plan. De este Proyecto se ha ocupado el Gabinete Técnico Estudio Pereda 4.

Entre las actuaciones que se contemplan en el mencionado proyecto se incluye el bombeo en el acuífero del río Vélez, además del uso de recursos regulados en el embalse de La Viñuela y de aguas residuales tratadas de la EDAR de Vélez-Málaga.

Dado que existe un convenio general establecido entre el IGME y AcuaMed en materias relacionadas con la evaluación y gestión de recursos hídricos subterráneos, y con objeto de asesorar a AcuaMed en materia hidrogeológica en este caso concreto, se ha constituido un equipo con personal del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Universidad de Granada (UGR), debido a la experiencia acreditada de personal de ambos organismos en investigaciones previas en el área. Se genera así el Proyecto denominado “Apoyo al asesoramiento a AcuaMed sobre las posibilidades de bombeo en el acuífero del río Vélez (provincia de Málaga)”. Se trata de una Asistencia Técnica al IGME por parte de la UGR- concretamente de personal adscrito al Instituto del Agua de dicha universidad- mediante contrato suscrito entre el IGME y la Fundación Empresa-Universidad de Granada.

El presente informe constituye la materialización de la mencionada Asistencia Técnica y se centra en el estudio detallado de una serie de ensayos hidrogeológicos llevados a cabo en octubre de 2006 y en los resultados de campañas de campo posteriores, realizadas a finales de marzo, principios de mayo, finales de junio y a lo largo de julio de 2007.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y SELECCIÓN DEL AREA DE TRABAJO

El objetivo principal es obtener el máximo de información hidrogeológica sobre el acuífero del río Vélez en el sector seleccionado, correspondiente al tramo de aluvial de aproximadamente 1 km de longitud situado aguas abajo de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa, los principales de la cuenca. También se desea obtener criterios preliminares acerca de la factibilidad del bombeo de 6,5 hm³/año en el acuífero, que es la cifra que se ha planteado en el Proyecto Informativo mencionado en el apartado anterior.

Complementariamente, en el presente estudio se hace una valoración sobre el estado actual de la salinidad de las aguas subterráneas en el sector deltáico del acuífero, dado que en esta zona se han producido en ocasiones previas evidencias de salinización de captaciones por intrusión marina. Por último, se incluye una propuesta de redes de control del acuífero, de piezometría y de calidad de las aguas subterráneas, para verificar el mantenimiento de su buen estado cuantitativo y cualitativo frente a eventuales actuaciones que modifiquen su estado hidrodinámico actual.

El acceso más inmediato al área de trabajo es a partir del puente de la carretera de Vélez-Málaga a Benamocarra, situado inmediatamente aguas debajo de dicha confluencia (figura 1.1).

Este sector incluye cuatro perforaciones realizadas por la empresa CEMOSA a instancias de AcuaMed. El estudio se centra, precisamente, en la información obtenida en la fase de realización de los cuatro sondeos (agosto a octubre de 2006) y, sobre todo, en una serie de pruebas de bombeo y recuperación realizadas a continuación, complementado con otros trabajos realizados entre octubre de 2006 y octubre de 2007.

Desde un principio, fue voluntad de la Dirección Técnica de AcuaMed no realizar sondeos con diámetro de investigación, sino plantear directamente un diseño de los mismos (filtros comerciales con diámetros de 400 mm alternantes con tramos ciegos, centradores, empaques de grava, etc.) adaptado a su eventual puesta en

explotación si las circunstancias así lo aconsejasen. Esta es la razón de que en la mayor parte de las perforaciones se seleccionase el diámetro de 550 mm.



Figura 2.1. Vista aérea del sector estudiado, al sur de de la carretera de Vélez-Málaga (hacia la derecha de la foto) a Benamocarra (hacia el extremo superior izquierdo de la foto). Destaca, entre la carretera y el cauce del río Vélez, la plantación de aguacates de la finca de Los Alamos, surcada por caminos que se cruzan perpendicularmente.

Además de lo anterior también se optó, debido a imperativos de tiempo que obligaban a reducir al máximo los trámites administrativos, por seleccionar un emplazamiento para los sondeos dentro de la zona de Dominio Público Hidráulico (DPH) y aguas arriba de la EDAR de Vélez Málaga. Se buscó dentro de la zona de DPH un sector con acceso a maquinaria lo más fácil posible y cierta elevación respecto del cauce, en el que, además, existiera cerca algún piezómetro en buenas condiciones de la red de la Cuenca Mediterránea Andaluza. Se consideró asimismo la información previa sobre los espesores atravesados cuando tales piezómetros

fueron perforados, en el sentido de seleccionar aquellos enclaves en que se habían localizado los valores más elevados.

Las anteriores condiciones condujeron a seleccionar para los sondeos 1, 2 y 3 un sector a lo largo de la margen izquierda del río, en el paraje de la Acequia del Jueves, junto al denominado "perfil 6" (P6) del estudio de CHSE (1987), donde los datos previos indicaban espesores de aluvial de hasta 70 m. El sondeo 4 se hizo en la misma margen pero algo más distante hacia aguas abajo (figura 2.2).



Figura 2.2. Detalle de la foto de la figura 2.1 que incluye la situación de las perforaciones (S1 a S4) y otros puntos cercanos. La flecha señala la dirección del río.

El sector seleccionado se encuentra a una altitud aproximada entre 23 m (sondeo 4) y 28 m (sondeo 1). En su extremo inferior se produce la confluencia, por la margen izquierda del río Vélez, del Arroyo del Mineral, cauce de régimen esporádico cuya cuenca vertiente ocupa una extensión de unos 10 km², actualmente ocupada en parte por terrenos urbanos de Vélez-Málaga.

3. LABORES REALIZADAS

Además de la explicación sobre el terreno a la Dirección Técnica de AcuaMed y otros técnicos implicados en el mencionado Plan Guaro acerca de las características generales del acuífero, incluyendo la selección del emplazamiento de los sondeos, se ha llevado a cabo la recopilación de datos previos orientada a los objetivos del presente estudio, así como la participación en varias reuniones de seguimiento.

Aparte de lo anterior, se han efectuado reconocimientos de campo tendentes a la medida de los niveles de agua en una serie de puntos situados alrededor de los sondeos de manera previa y con posteridad a las pruebas de bombeo, así como la instalación de un equipo registrador (“data-logger”) de profundidad del nivel y de temperatura del agua en uno de ellos, concretamente el piezómetro P6-S2 de la CMA, protegido por una caseta, y posterior extracción de los datos registrados. En la figura 3.1 se indica la situación de estos puntos de control.

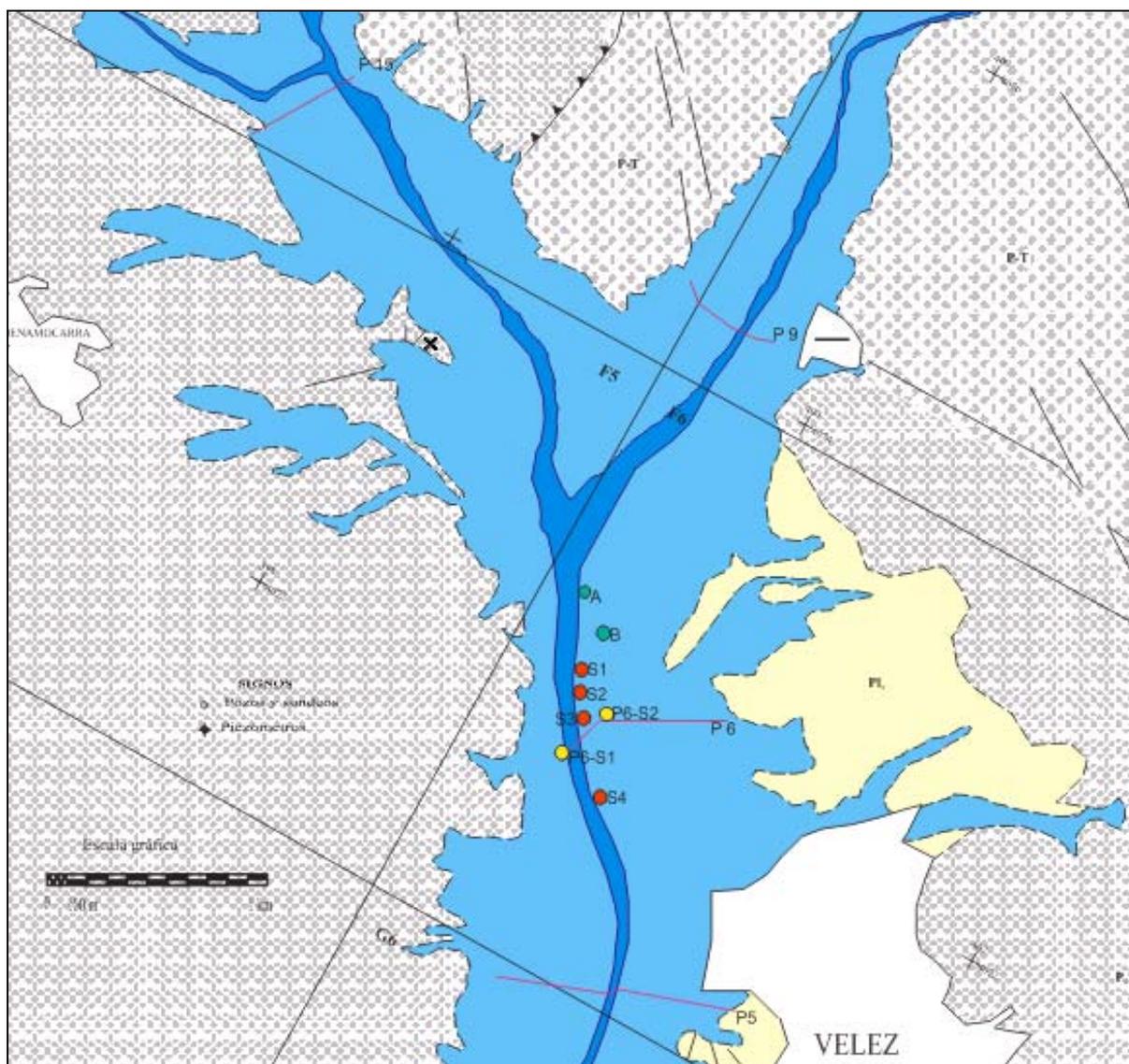


Figura 3.1. Mapa hidrogeológico, situación de puntos y localización aproximada de los perfiles de piezómetros de la CMA (CHSE, 1987). En azul: materiales aluviales (permeabilidad alta). En amarillo: materiales arenoso-arcillosos pliocenos (permeabilidad media-baja). En gris: materiales esquistosos (permeabilidad baja). En blanco: zonas urbanas.

También se ha colaborado con los técnicos de CEMOSA en la medida de niveles piezométricos durante los bombeos y recuperaciones, realizándose en coordinación con tales pruebas un ensayo de inyección de salmuera en el punto S-2 y control de su dispersión en la columna del propio sondeo mientras se bombeaba en el S-3.

Se ha medido en varias ocasiones la conductividad y temperatura del agua bombeada.

Se han interpretado los datos de las pruebas de bombeo y recuperación por procedimientos gráficos manuales y, en una segunda fase, mediante la utilización del código AQTESOLV (www.aqtesolv.com) en diferentes versiones, con objeto de estimar los parámetros hidráulicos del acuífero y de contrastar modelos geométricos (carácter del sustrato, límites, etc.) y de naturaleza del mismo (condiciones de confinamiento o freáticas, con o sin efecto de drenaje diferido). Se han cotejado los resultados de estas pruebas con las permeametrías realizadas por CEMOSA en muestras integradas de los sondeos 3 y 4.

Se han obtenido valores de conductividad hidráulica a partir de la granulometría efectuada por CEMOSA de muestras integradas en los sondeos 3 y 4.

Se ha analizado el funcionamiento del acuífero, tanto a partir de antecedentes como de observaciones en las circunstancias actuales. En particular, se ha modelizado el balance y el flujo en el sector del acuífero que incluye las perforaciones realizadas y su entorno, lo que representa casi el 30 % de su extensión total. Para ello se ha utilizado el código PMWIN ("Processing Modflow", versión 5.3.0 desarrollada por Chiang and Kinzelbach en 1991-2001).

A finales de marzo de 2007 se han efectuado medidas "in situ" de profundidad del nivel, concentración de O₂ disuelto, conductividad y temperatura del agua bombeada en una serie de captaciones. También se ha procedido a la toma de una serie de muestras de agua para la caracterización de su calidad química y su posterior análisis en los laboratorios del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. En algunos piezómetros del sector deltaico del acuífero se han efectuado perfiles de conductividad y temperatura, con el objetivo principal de ilustrar sobre eventuales variaciones en la vertical de la salinidad del agua subterránea. Este tipo de datos y otras medidas "in situ" (aforos seriados en el río, por ejemplo) se han obtenido en otras campañas de campo realizadas entre principios de mayo y primeros de octubre de 2007.

Se han efectuado mapas y gráficos variados para facilitar la interpretación de los resultados y su visualización. Finalmente, se ha confeccionado el presente avance del informe.

Las tareas anteriores quedaron definidas en el correspondiente acuerdo de asesoramiento específico entre AcuaMed y el IGME de la siguiente manera:

- Supervisión técnica de la ejecución de sondeos y ensayos de bombeo (escalonados y a caudal constante), e interpretación hidrogeológica de resultados
- Estudio y análisis de antecedentes
- Campaña de medidas del nivel piezométrico y adquisición e instalación de data logger para el control piezométrico del acuífero
- Campaña de registros de conductividad y temperatura en piezómetros y captaciones del delta
- Campaña de toma de muestras y analítica de parámetros de calidad fisicoquímica de las aguas superficiales y subterráneas
- Campañas de medidas del flujos subterráneos y ensayos de trazadores
- Campañas de prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para la mejora del conocimiento de la geometría del sustrato en el sector de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa
- Divulgación de las características hidrogeológicas del acuífero de Vélez y participación en jornadas de concienciación sobre el uso sostenible de los recursos hídricos
- Desarrollo de un modelo de flujo sencillo en el entorno de las captaciones.
- Redacción de Memoria final, Anexos y planos.

4. INFORMACIÓN HIDROGEOLÓGICA PREVIA

4.1. Antecedentes sobre el acuífero del río Vélez

Las primeras investigaciones hidrogeológicas sistemáticas del acuífero de Vélez fueron realizadas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), a mediados de los años setenta, en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). De forma paralela, el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) llevó a cabo numerosos sondeos de investigación en el delta del río Vélez que pusieron de manifiesto, entre otros aspectos, la existencia de dos tramos acuíferos.

En los estiajes de los primeros años de la década de los ochenta se produjeron descensos importantes de los niveles de agua en la zona del delta, y se incrementó la salinidad en las captaciones para el abastecimiento a Torre del Mar y a la costa occidental de Vélez Málaga. Estos efectos de la intrusión marina y el análisis de la afección a los recursos hídricos que pudiera provocar la construcción del embalse de la Viñuela promovieron la realización del “Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa” (CHSE, 1987), que llevó a cabo la Confederación Hidrográfica del Sur de España entre los años 1984 y 1986.

Durante el año 1987, el Instituto Geológico y Minero llevó a cabo el “Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión marina mediante la utilización de barreras artificiales en el acuífero de Vélez” (ITGE, 1988), donde se analizó la posibilidad de ejecución de una pantalla semi-impermeable, perpendicular al cauce y situada unos 1.100 m de la desembocadura. En este proyecto se efectuó, además, un ensayo puntual de inyección de lechada de cemento-bentonita y se obtuvo una reducción de la permeabilidad media de tan sólo el 37% respecto a valor inicial.

Entre los años 1990 y 1992, la colaboración científica mantenida entre el Instituto del Agua de la Universidad de Granada, el Departamento de Geología de la Universidad de Málaga y el Instituto de Geología, Geofísica y Geoinformática de la Universidad Libre de Berlín, permitió que se realizaran nuevos trabajos de investigación sobre el acuífero del río Vélez (Winchenbach, 1993).

Entre los años 1995 y 1997 se llevó a cabo el proyecto de "Seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad" (CHSE, 1997).

Entre 1993 y 1997, la Universidad de Granada, desarrolló los trabajos de investigación que dieron lugar a la tesis doctoral "Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga)" (García-Aróstegui, 1998). Algunos resultados han sido objeto de publicación en revistas especializadas (García-Aróstegui et al., 1998 y 2000).

Entre los años 2003 y 2005 se han llevado a cabo diferentes trabajos y recopilaciones de datos previos en el marco del Proyecto Europeo "Sustainable Water Management in Mediterranean Coastal Aquifers, SWIMED", coordinado por uno de los autores de este trabajo (J. B. H.), en el que este acuífero costero ha sido seleccionado junto a otros de Italia, Marruecos, Túnez y Palestina debido a sus características favorables, particularmente el nivel de información hidrogeológica sobre el mismo que se ha ido generando en los últimos treinta años mediante los estudios que se han descrito.

A finales de 2005 se han reactivado las actuaciones para la consolidación de los regadíos del Plan Guaro, mediante el acuerdo entre la Sociedad Estatal AcuaMed, la Consejería de Agricultura de la Junta de Andalucía y representantes de los usuarios.

Frente a estos importantes estudios se pueden citar los trabajos de recopilación que, a manera de fichas sintéticas para los principales acuíferos, entre los que se incluye el del río Vélez, se exponen en los documentos denominados "Atlas Hidrogeológicos" de Málaga y de Andalucía (DPM-IGME, 1988 y JA-ITGE, 1998, respectivamente). Recientemente, se ha realizado la segunda versión del Atlas Hidrogeológico de Málaga.

En todos estos estudios se presentan diferentes datos y resultados que permiten establecer algunas de las características hidrogeológicas del acuífero, tanto en general como en el sector objeto del presente trabajo.

4.2. Evoluciones piezométricas locales

En la figura 4.1 se representan datos de la evolución temporal de la profundidad del agua en el piezómetro P6-2 desde 1984 hasta 2006. Se advierte un descenso importante en los veranos de 1989 y 1995, de unos 20 m y 25 m, respectivamente. Corresponde al final de periodos secos que fueron interrumpidos por precipitaciones muy abundantes, por lo que se aprecia en los dos casos una recuperación hasta valores mínimos de profundidad: entre 3 y 4 m. También ha habido descensos apreciables en los veranos de 1985, 1992 y 1993.

Según lo anterior, el rango máximo de variación de nivel de agua medido en el sector objeto de estudio es de unos 22 m (entre 3m y 25 m, aproximadamente).

También se advierte en la figura 4.1 que desde el año 1996 hasta el 2006 las oscilaciones son de menor amplitud que en situaciones previas, sin que sean patentes los importantes descensos veraniegos a que antes se ha hecho alusión. Esto podría indicar que la magnitud de los bombeos estivales se ha reducido.

En estos últimos diez años la amplitud usual de las oscilaciones piezométricas en el sector de estudio es, pues, de unos 7 m (entre 4 m y 11 m, aproximadamente).

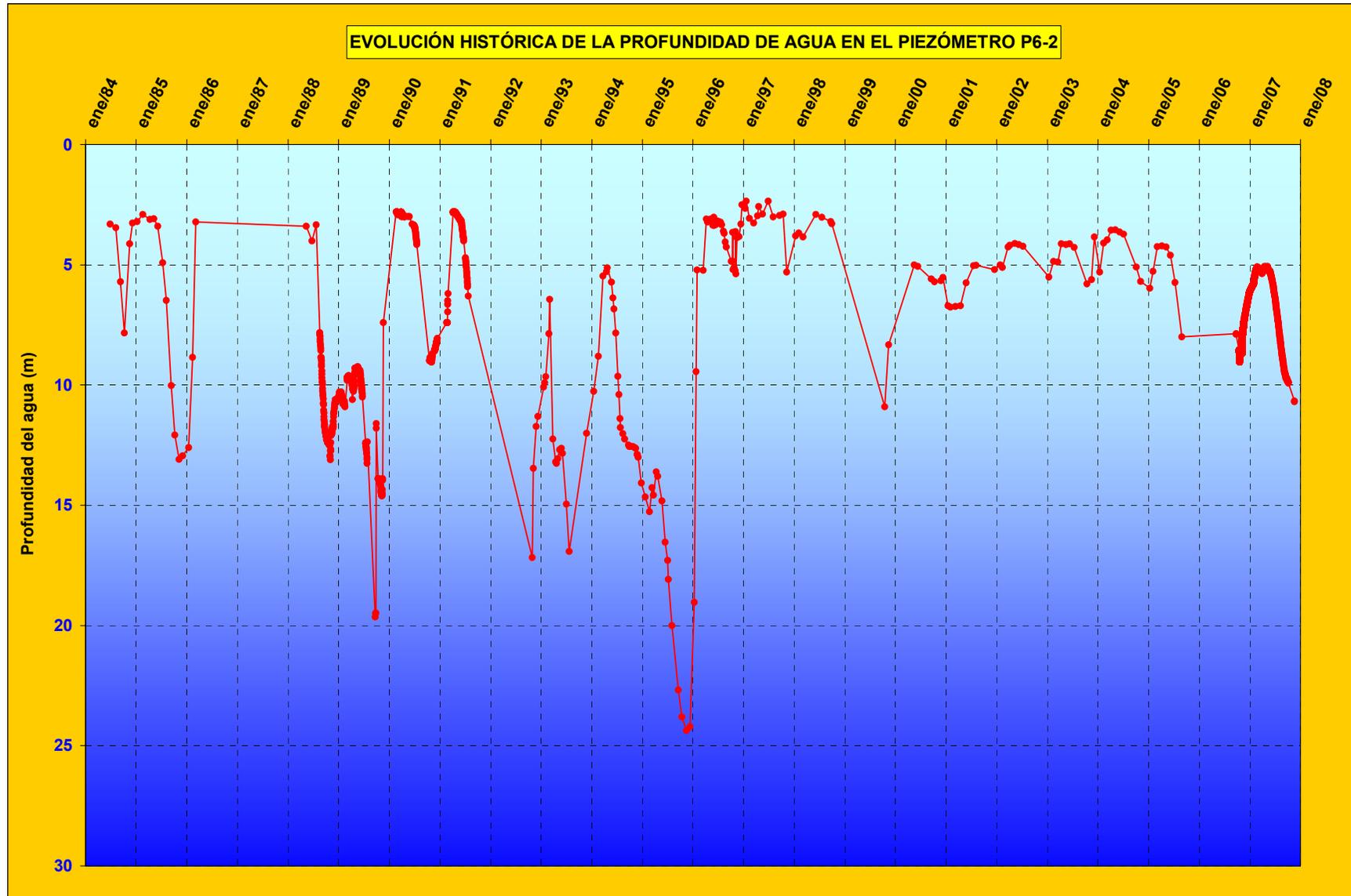


Figura 4.1. Evolución de la profundidad del nivel de agua en el piezómetro P6-2.

4.3. Piezometría: morfología y gradientes

En la figura 4.2 se presentan dos mapas de líneas isopiezas del acuífero correspondientes a dos situaciones con características hidrológicas antagónicas: julio de 1995 y enero de 1997. La primera traduce el estado hidrodinámico del acuífero en un mes de verano en un periodo de importante sequía. La segunda corresponde a un mes de invierno en un periodo de pluviosidad anormalmente alta. Se incluyen asimismo algunos puntos de control que permiten identificar los perfiles transversales de sondeos a que antes se ha hecho alusión.

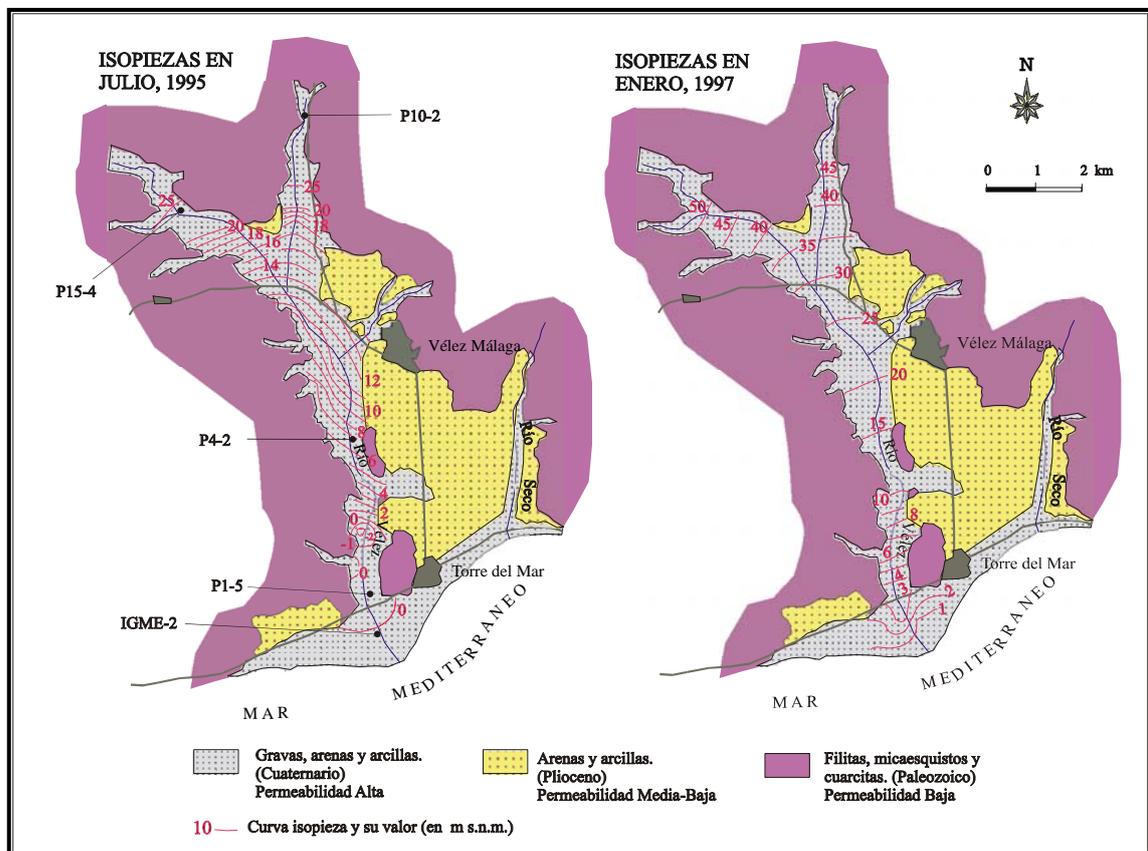


Figura 4.2. Mapas de isopiezas en julio de 1995 y enero de 1997 (García Aróstegui, 1998).

Si se considera el tramo de acuífero comprendido entre la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa y el perfil 4 (prácticamente a mitad de distancia entre Vélez-Málaga y Torre del Mar), cuya longitud es de unos 3,3 km a lo largo del cauce, se aprecia que la morfología de las isopiezas es bastante diferente en ambas situaciones, pues en la que representa niveles excepcionalmente altos (enero de

1997, cota media del nivel en el tramo: 23 m) se manifiesta un flujo sensiblemente paralelo al cauce principal, caracterizado por un gradiente hidráulico del 0,45 %, mientras que en la de niveles muy bajos (julio de 1995, cota media del nivel en el tramo: 10 m) la componente general de flujo en el valle aluvial es lateral, indicando una circulación de Noreste a Suroeste, con un gradiente hidráulico del 0,4 % (del 0,15 % según la dirección del cauce principal).

Por lo tanto, en la situación de sequía, además de una desaturación media de 13 m en el tramo considerado, parece manifestarse una circulación hacia el aluvial del río Vélez procedente del conjunto de la margen izquierda del río Vélez formado por los afloramientos pliocenos, el arroyo del Mineral y el área urbana de Vélez-Málaga. Esta circulación no se identifica en la situación de niveles altos, al ser verosímilmente su magnitud muy reducida respecto a la del flujo paralelo al eje fluvial, procedente de sectores del acuífero aluvial situados aguas arriba, que existe en esa situación.

Para el perfil 6, junto a las perforaciones realizadas, en la situación de niveles altos el gradiente según el cauce es del 0,54 %. En niveles bajos la dirección del cauce coincide aproximadamente con la de las líneas isopiezas, indicando un flujo del NE al SO, según se ha dicho, con un gradiente del 0.45 %.

Para el perfil 5, junto a Vélez-Málaga, en la situación de niveles altos el gradiente según el cauce es del 0,4 %. En niveles bajos ocurre lo mismo descrito para el P6, con un gradiente del 0.48 %.

Aunque entre el P6 y el P5 en niveles bajos la dirección del cauce no es la del flujo principal en el acuífero, según se ha citado repetidamente, se ha estimado un gradiente en esa dirección de 0,087 %, es decir, unas cinco veces inferior a la situación de niveles altos.

En el sector costero del acuífero también se advierten diferencias. En la situación de niveles altos se aprecia con claridad un gradiente piezométrico hacia el mar, indicando la descarga del acuífero a través de ese límite. En la situación de niveles bajos se advierte, por el contrario, que la cota cero está a unos 3 km tierra adentro

del borde costero y que existen depresiones locales que traducen la existencia de conoides de bombeo.

Si se considera la piezometría de los aluviales de los ríos Vélez y Benamargosa inmediatamente antes de su confluencia, se deducen flujos que discurren, en general, en la dirección de los cauces. Se miden valores del gradiente en la situación de niveles bajos del 1,2 % (río Vélez) y 0,8 % (río Benamargosa), mientras que en la de niveles altos los valores son 0,93 % (río Vélez) y 0,6 % (río Benamargosa).

En el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (JA-ITGE, 1998), al describirse el acuífero del río Vélez, se incluyen dos mapas de isopiezas que corresponden a situaciones hidrológicas antagónicas, localizadas en octubre de 1985 (niveles bajos) y octubre de 1996 (niveles altos). Existe una gran semejanza general con lo representado en la figura 4.2. En la primera situación es patente un gran conoide de bombeo al Oeste de Torre del Mar, con cotas negativas en su ápice. En la segunda situación, el flujo natural al mar es fácilmente apreciable. En ambas situaciones se advierte la inflexión de las isopiezas al Suroeste de Vélez-Málaga, y no solamente en la de niveles bajos como en la figura 4.2.

La figura 4.3 permite apreciar la situación piezométrica actual en el contexto histórico.

4.4. Parámetros hidráulicos

Los datos previos de que se dispone proceden de 41 ensayos de bombeo realizados entre 1984 y 1985. La transmisividad varía entre valores de 500 m²/día y 6500 m²/día, con un promedio de 2800 m²/día. Se obtienen permeabilidades comprendidas entre 30 y 300 m/día, con una media de 70 m/día. Para el coeficiente de almacenamiento los valores obtenidos son del 1% al 11%, con una media de 5%. En general, los parámetros presentan valores menores hacia la desembocadura.

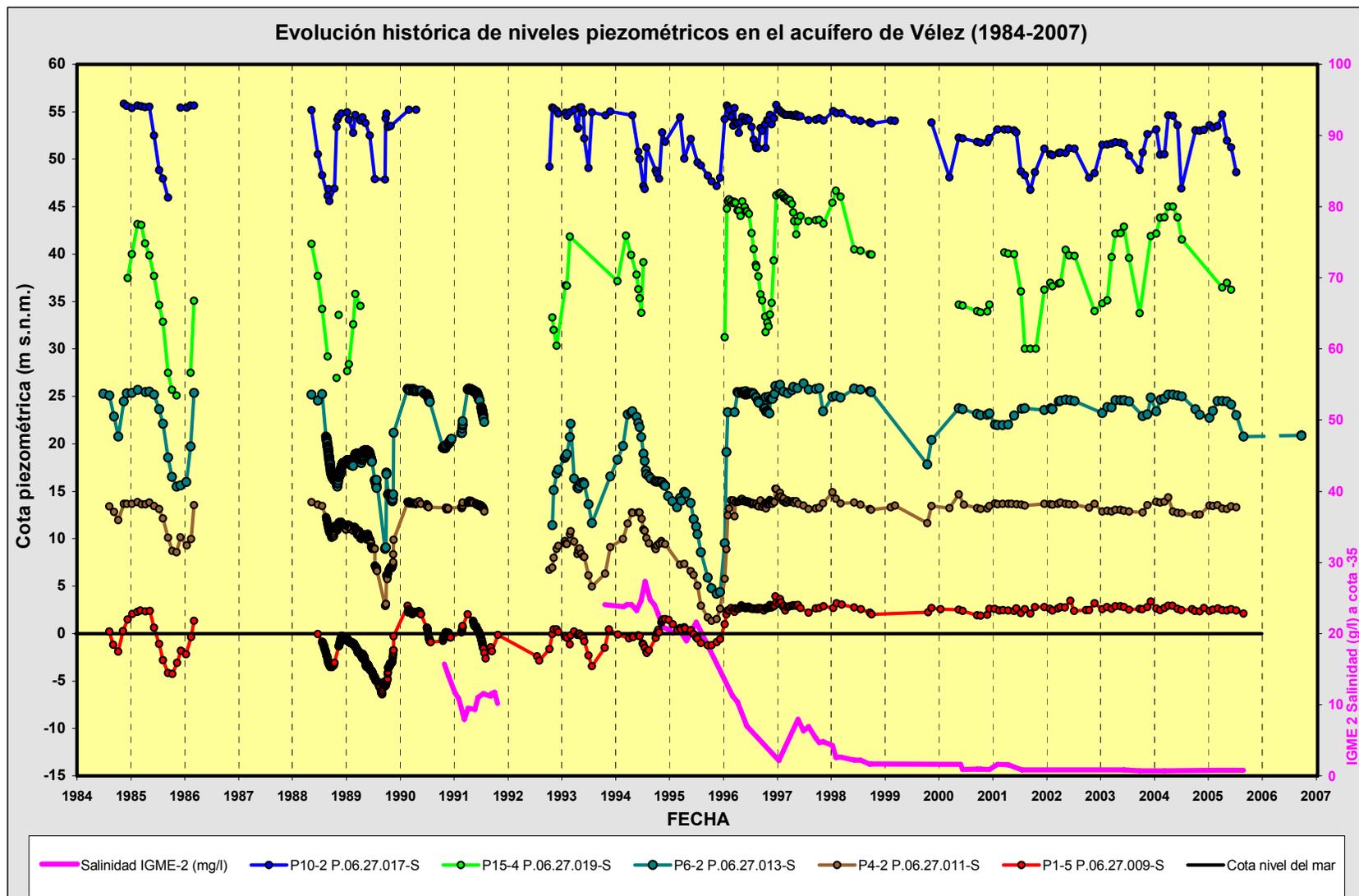


Figura 4.3. Evolución de niveles piezométricos en el acuífero de Vélez.

5. CARACTERÍSTICAS DE LAS PERFORACIONES Y DE LOS MATERIALES ATRAVESADOS

Estos aspectos se describen detenidamente en el informe de la empresa CEMOSA para AcuaMed, por lo que nos remitimos a dicho documento para información detallada al respecto. A continuación se destacan algunos aspectos de interés para este Estudio.

Las perforaciones han atravesado en sus metros finales, en mayor o menor medida, el sustrato impermeable: 4,5 m en el S-4, 9 m en el S-3, 10,3 m en el S-1 y 16 m en el S-2. Estos materiales esquistosos se encontraban muy alterados en el sector de contacto con el aluvial. Esta zona de mayor alteración presentaba espesores de 2 m (S-4), 4 m (S-3), 8 m (S-2) y 2 m (S-1).

Los espesores de aluvial atravesados en cada perforación han sido 46,5 m (S-4), 41 m (S-3), 34 m (S-2) y 10,2 m (S-1). Según esto, los datos previos que se manejaban sobre esta característica del acuífero, que apuntaban a valores cercanos a los 70 m a escasa distancia hacia el Este (punto P6-2), se han revelado como inexactos. A este respecto, al ser materiales que rellenan paleorelieves erosivos, no es raro que en aluviones se detecten cambios importantes de espesor entre puntos cercanos. Esto también puede responder al efecto de algún accidente tectónico que afecte al sustrato. Estos factores pueden explicar las importantes diferencias en el espesor de aluviones encontradas entre los puntos S-1 y S-2, distantes unos 50 m.

Las circunstancias expuestas en el párrafo anterior hacen muy aconsejable la realización de estimaciones de profundidad del sustrato antes de acometer la perforación de captaciones, para garantizar el éxito de éstas, y no confiar en la información al respecto que puedan ofrecer puntos próximos. Tales estimaciones pueden basarse (deseablemente) en datos directos, como son los ofrecidos por los sondeos de reconocimiento, o, lo que es más económico aunque menos resolutivo, utilizar técnicas geofísicas.

En relación con la idea anterior, la empresa CEMOSA ha realizado un perfil sísmico en el que ha definido la profundidad del sustrato. Lamentablemente, las características del método han hecho imposible la realización de perfiles transversales al cauce del río Vélez, lo que habría permitido comprobar las secciones a través de las que mayoritariamente se produce el flujo subterráneo. El perfil realizado ha sido longitudinal, prácticamente coincidente con el cauce, paralelo, pues, a la línea que une los sondeos S-1 y S-4. De dicho perfil, y de los propios datos obtenidos en los sondeos, se desprende que: a) la profundidad del sustrato hacia aguas arriba no se incrementa; b) hay un mayor espesor local de aluviones entre los sondeos S-3 y S-4; c) el sustrato aumenta su profundidad hacia la margen izquierda del cauce, es decir, en dirección Este.

En el marco del presente proyecto se ha realizado, el 17 de julio de 2007, un perfil geoelectrico (tomografía eléctrica) de unos 600 m de longitud, paralelo a la línea de perforaciones de AcuaMed, aunque desplazado de ella una veintena de metros hacia la margen izquierda, aprovechando las buenas condiciones de la red de caminos existente en la finca Los Alamos (figura 5.1). Es de destacar las importantes variaciones en el espesor de acuífero que refleja dicho perfil, verosímilmente inducidas por fracturas de dirección más o menos ortogonal respecto del mismo.

Si se considera que la profundidad del nivel estático en el sector de los sondeos está comprendida entre 4 y 7 m, resultan valores aproximados de espesor saturado del orden de 5 m (S-1), 30 m (S-2 y S-3) y 40 m (S-4). De acuerdo con ello, el punto S-1 se ha considerado como negativo a efectos de su posible uso como captación.

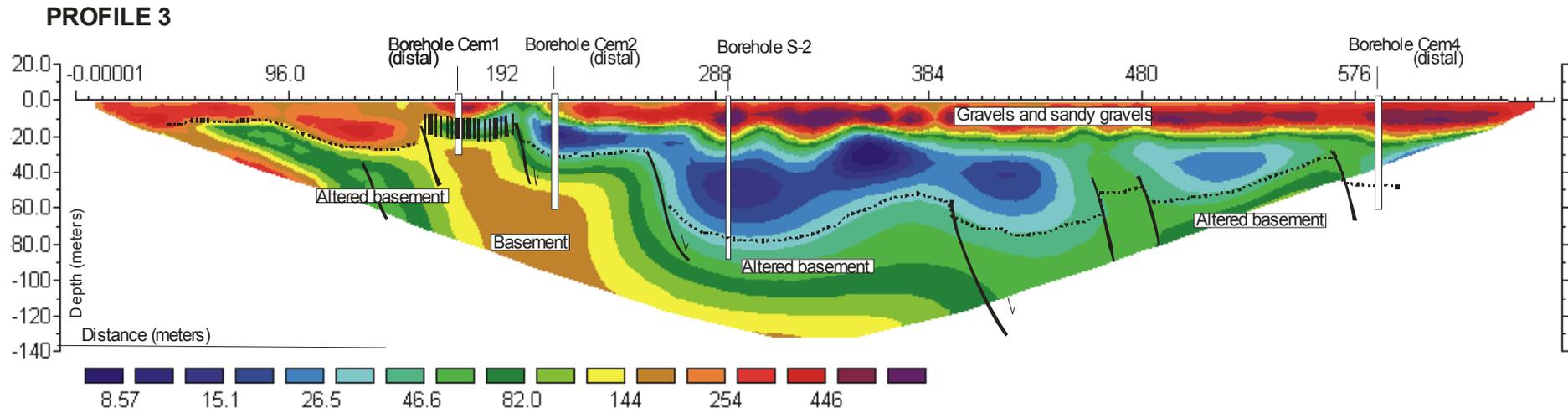


Figura 5.1. Perfil geoelectrico paralelo a los sondeos de AcuaMed (julio de 2007).

La testificación litológica detallada de las muestras obtenidas en cada perforación no aporta información relativa al predominio, en determinados tramos de profundidad, de granulometrías predominantes. Antes bien, el rasgo general parece ser la notable variabilidad de tamaños en la vertical, dentro de un contexto de granulometrías medias y gruesas con niveles de finos de poco espesor intercalados. Es decir, aunque la heterogeneidad en el detalle es muy elevada, en el conjunto puede asimilarse simplícidamente a un sistema homogéneo, sin capas bien definidas. En particular, tampoco se ha identificado dentro de los 10 primeros metros una capa de naturaleza limosa o arcillosa, por lo que, en principio, todo parece indicar que el acuífero es libre.

Basándose los resultados de las testificaciones litológicas, los técnicos de CEMOSA encargados de la realización de los sondeos han optado por no incluir tramos ciegos en la entubación bajo el nivel freático, sino una sucesión de tramos filtrantes desde la situación del nivel freático hasta una determinada profundidad. Esto, complementado con la instalación de un empaque de grava, parece una aproximación correcta al diseño de las captaciones cuando en el detalle existe gran heterogeneidad granulométrica, como pasa aquí.

La longitud del filtro en los tres sondeos potencialmente productivos ha sido de 33 m, según los datos suministrados por CEMOSA. En el S-2 el filtro penetra 3 m en los esquistos más alterados. En el S-3 se queda 3 m por encima de esta formación. En el S-4 se queda 10 m por encima del techo de los esquistos más alterados. El criterio, pues, ha variado de unos sondeos a otros y desconocemos las razones de ello. En el S-4, según lo expuesto, el espesor saturado “efectivo” resulta, por efecto de la longitud del filtro, algo inferior al real: 33 m frente a 40 m.

Para precisar la información hidrogeológica, en los sondeos 3 y 4 se han obtenido sendas “muestras integradas”, entendiéndose por tales las generadas a partir de retirar una misma cantidad de cada bolsa del registro litológico y luego proceder a su mezcla de manera previa a sus análisis granulométrico y permeamétrico. Según el informe de CEMOSA, la proporción de finos (tamiz 0,063 mm) es algo superior en la muestra del S-3 que en la del S-4: 10,6 % frente al 6,7 %. El diámetro

mediano que resulta de las curvas granulométricas (d_{50}) es de 7 mm en la muestra de S-3 y de 10 mm en la de S-4. En ambos casos, este tamaño corresponde a una grava fina. La uniformidad de tamaño de grano es también mayor en esta última: valores aproximados de d_{60}/d_{10} entre 170 (S-3) y 60 (S-4).

En cuanto a la permeametría, se han medido valores bastante similares en ambas muestras: $2 \cdot 10^{-2}$ cm/s (S-3) y $2,8 \cdot 10^{-2}$ cm/s (S-4). Estos valores (equivalentes, respectivamente, a 17 m/d y 24 m/d) son coherentes con materiales granulares de tamaño entre arenas medias y gravas finas.

Es posible, a partir de los datos granulométricos, estimar valores de permeabilidad mediante fórmulas empíricas. En este caso se han empleado la de Hazen, bien adaptada a materiales de tamaño como los que aquí se consideran. Esta fórmula estima la permeabilidad (K) en función del diámetro efectivo (d_{10}) de la curva granulométrica: $K = C \cdot (d_{10})^2$, donde C es un coeficiente cuyo valor es 100 para el caso de arenas gruesas heterométricas, (d_{10}) está expresado en cm y K viene dada en cm/s.

Los resultados de la aplicación de la fórmula de Hazen indican valores de K de $3,6 \cdot 10^{-3}$ cm/s (3 m/d) para el S-3 (d_{10} de 0,06 mm) y de $6,2 \cdot 10^{-2}$ cm/s (54 m/d) para el S-4 (d_{10} de 0,25 mm). Aunque el valor del d_{10} en el caso de S-3 está algo por debajo del límite de aplicabilidad de la fórmula (0,1 mm), los resultados ponen de manifiesto una diferencia de un orden de magnitud entre los dos valores de K obtenidos, siendo mayor para el caso del S-4.

Respecto a la representatividad de las muestras ensayadas, debe tenerse en cuenta que en la técnica de perforación a percusión, la utilizada en los sondeos estudiados, suelen darse condiciones que favorecen el muestreo de las fracciones más gruesas en detrimento de las finas.

6. OBSERVACIONES PREVIAS A LOS ENSAYOS

El 13 de octubre de 2006 se realizó una visita al sector de las perforaciones para identificar puntos de control y medir el nivel estático antes de los ensayos. Los sondeos 1, 2 y 3 estaban ya terminados. Se midió la profundidad del nivel en todos ellos desde el borde de la entubación: 5,68 m (S-3), 6,22 m (S-1) y 6,56 m (S-2). Aún no se les había instalado el tubo superior de 80 cm de longitud provisto de tapa y sistema de apertura con llave Allen con el que quedaron definitivamente equipados antes de los ensayos. En el S-4 no se midió por encontrarse con un problema de atranque en la instalación de la tubería.

De los piezómetros de la red de la CMA que integraban el perfil P6 se localizaron dos: el P6-2, con caseta, dentro de la finca “Los Alamos”, en la margen izquierda, y el P6-1, sin caseta, en la margen derecha. En el primero se había instalado previamente un “data-logger”, según se ha dicho. El nivel estaba a 8,51 m de profundidad en el P6-2 y a 8,57 m en el P6-1.

Además se consideraron dos pozos abiertos (A y B, figura 2.1). El primero de ellos está junto a la carretera de Vélez a Benamocarra, a mano izquierda en dirección a Benamocarra, justo antes de cruzar el puente. Tiene instalación de bombeo. La profundidad de los niveles fue de 8,03 m (desde suelo) y 9,30 m (desde brocal). El segundo pozo está en la mencionada finca Los Alamos, dentro de una caseta, junto a un sondeo que bombea normalmente para el riego de la finca. Según el encargado, se bombea prácticamente a diario, salvo que llueva

El encargado de la finca Los Alamos, en la que se mantiene un control aproximado de la precipitación, apuntó que desde mayo pasado no llovía en el área, si se exceptúa un episodio muy localizado a mediados de septiembre, donde la precipitación fue de unos 70 mm en un día, aunque luego hizo viento fuerte varios días con la consecuencia del secado del suelo, por lo que hubo que proseguir con los riegos.

También cabe señalar el hecho de que, en el momento de esta visita así como a lo largo de los ensayos posteriores, no había flujo en el cauce del río Vélez junto a los

sondeos. Existe, sin embargo, un pequeño caudal, prácticamente inapreciable por cuanto se encuentra remansado, en forma de charcas, enfrente de los sondeos. Este caudal corresponde verosímilmente a las aguas residuales de Benamocarra, que son vertidas directamente al cauce.

Con los datos de altimetría de las diferentes referencias piezométricas que nos han sido suministrados por CEMOSA, se ha obtenido la cota del nivel estático en el sector el 13-10-2006. Varía entre 22,22 m (A) y 19,60 m (S-3). En la figura 6.1 se representa la piezometría en planta.

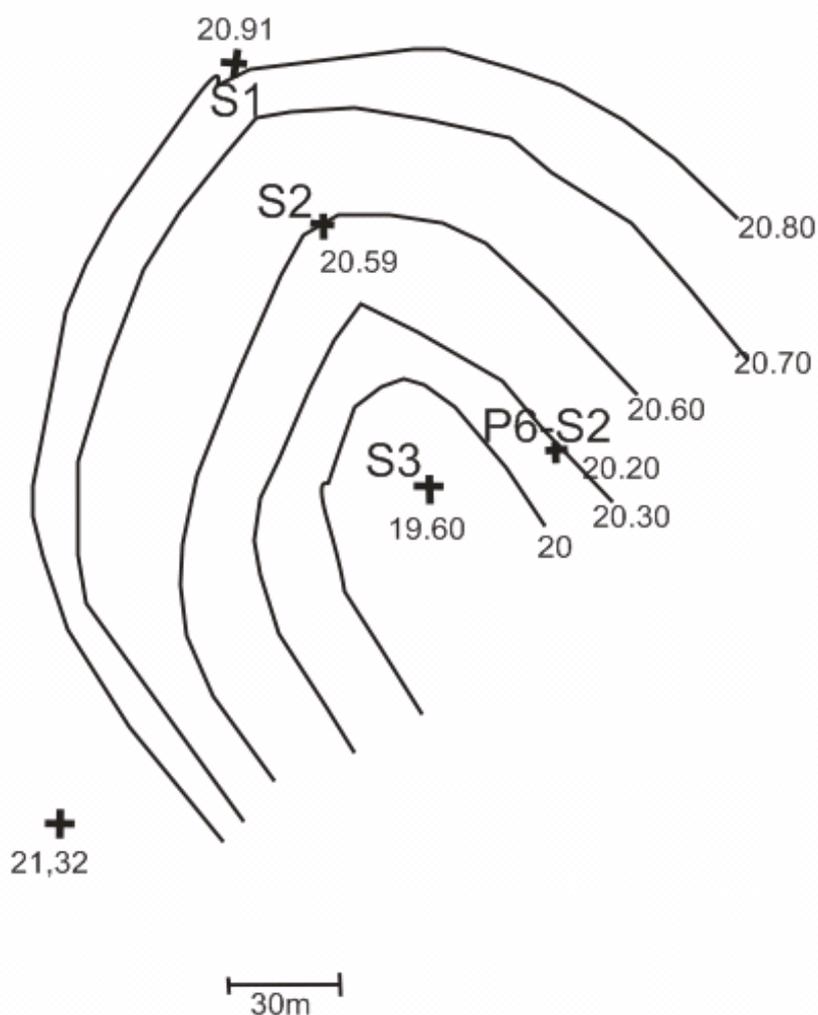


Figura 6.1. Piezometría del 13-10-2006 en el sector estudiado (valores en m s.n.m.), correspondiente al nivel estático previo a los ensayos (trazado suavizado).

En la figura 6.2 se representa la geometría de la superficie freática con fecha 19-10-2006, antes de comenzar los ensayos.

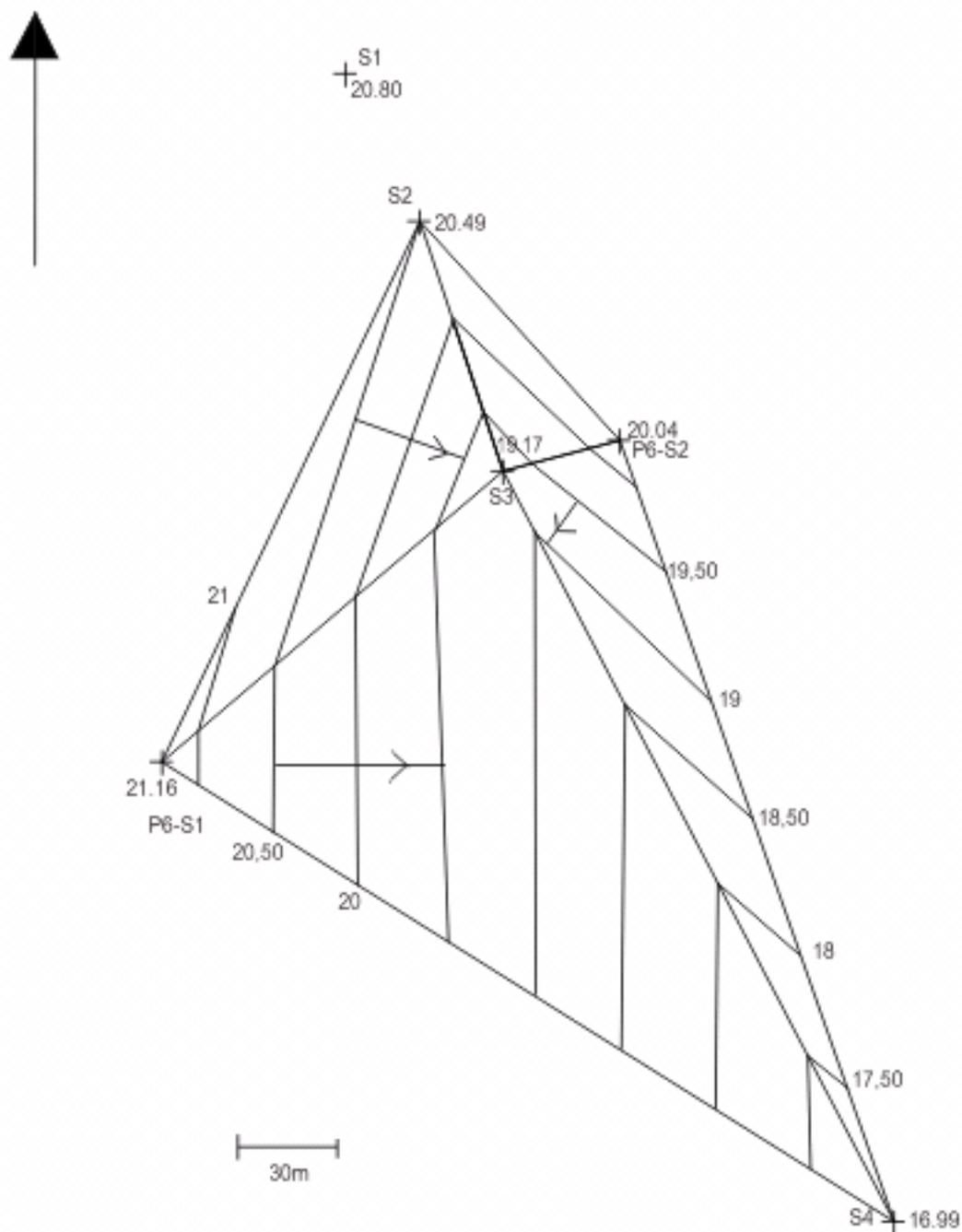


Figura 6.2. Piezometría del 19-10-2006 en el sector estudiado (valores en m s.n.m.), correspondiente al nivel estático inmediatamente anterior a los ensayos (trazado geométrico).

En ambas figuras se aprecia una ligera depresión piezométrica cuyo eje coincide aproximadamente con la línea imaginaria que uniría los sondeos. El origen de esta morfología particular –en caso de que no sea consecuencia de algún error en la nivelación de las referencias suministrada por CEMOSA- podría corresponder a la existencia de una depresión en el sustrato que coincidiese aproximadamente con la alineación de los sondeos, aspecto sobre el que no hay pruebas concluyentes por el momento.

7. SECUENCIA DE ENSAYOS HIDRÁULICOS

Los ensayos se llevaron a cabo entre los días 18 y 25 de octubre de 2006. El ensayo de bombeo de 24 h comenzó a las 9.45 h del día 20. Los dos días previos se realizaron sendos ensayos escalonados, con diferentes incidencias, en el sondeo S-3. El ensayo de trazador se efectuó coincidiendo con el bombeo de 24 h. El día 25 se realizó el ensayo escalonado en el S-4. Esta última prueba fue efectuada bajo el único control de los técnicos de CEMOSA. El resto de las pruebas fueron controladas conjuntamente por personal de CEMOSA y de la UGR.

En la figura 7.1 se representa la evolución de la profundidad del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-2 a lo largo del periodo en que se realizaron los ensayos. Se advierte en la misma como las fases de descenso de nivel van acompañadas de ligeros ascensos de temperatura (pocas décimas de grado).

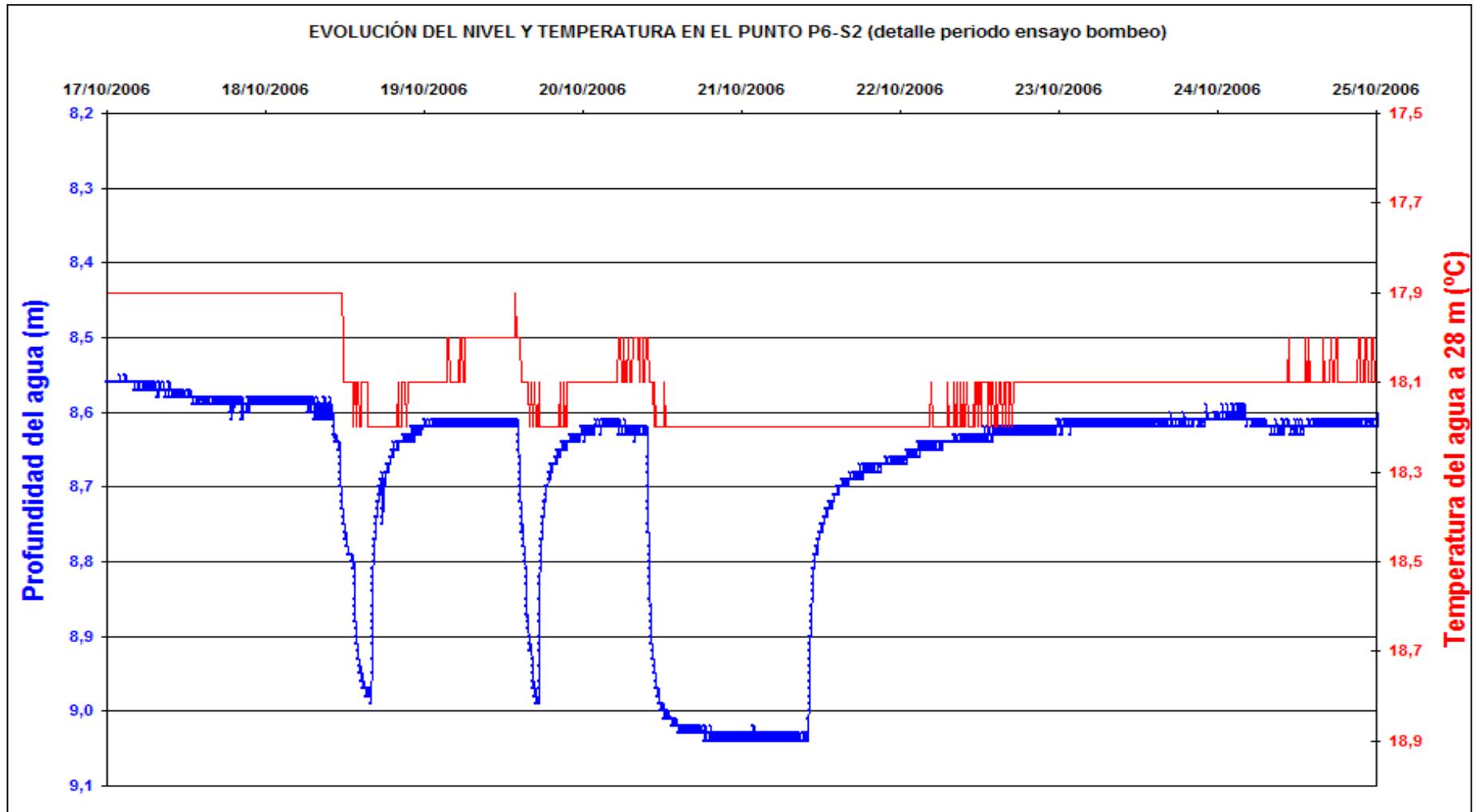


Figura 7.1. Evolución de la profundidad del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-2 a lo largo del periodo en que se realizaron los ensayos

8. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO DE 24 HORAS CON CAUDAL CONSTANTE

Se realizó en el sondeo S-3 el 20 de octubre de 2006. La bomba estaba colocada a 41 m de profundidad. El nivel estático estaba a 6,93 m. Para evitar la recirculación del agua bombeada, se excavó una zanja de unos 50 m de longitud, recubierta luego de plástico, que conducía el agua bombeada hacia el cauce del río (seco por entonces), por debajo del sondeo S-4.

El caudal con el que se comenzó el bombeo, a las 9.45 h, fue de 50 L/s, saliendo agua bastante turbia durante los primeros quince minutos. Pronto se apreció la producción de burbujas de aire, debido seguramente a no conseguirse la columna mínima -de 11 m de agua sobre la bomba- requerida para el correcto funcionamiento de la misma. Ello obligó a hacer ajustes de caudal a la baja. A las 12.30 h se midió una descarga de 40 L/s que se mantuvo hasta el final del ensayo.

La conductividad eléctrica del agua se controlaba periódicamente durante el ensayo, sin mostrar apenas variación alrededor del valor de 840 $\mu\text{S}/\text{cm}..$

La profundidad del nivel de agua se controló en los puntos de observación con diferente frecuencia. Los registros más detallados corresponden a los sondeos S-2 (distancia: 75 m) y S-1 (distancia: 129 m), donde se utilizó un hidronivel eléctrico, y al piezómetro P6-2 (distancia: 36 m), cuyo control se llevó a cabo a partir del “data-logger” allí instalado con anterioridad. Estos datos existen para el piezómetro P6-1, distante 135 m.

También se controló detalladamente la recuperación del nivel a lo largo de tres horas tras la interrupción del bombeo en dos puntos, uno con medida directa (S-2) y otro con registro programado (P6-2).

9. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DEL ENSAYO DE BOMBEO Y DE RECUPERACIÓN

El programa AQTESOLV (www.aqtesolv.com) permite estimar parámetros del acuífero a partir de las medidas de descensos, el caudal de bombeo y la distancia del punto de observación. El modelo de referencia (curva logarítmica descensos-tiempos) puede ser el general, o de Theis, o el de Neuman. El modelo de Theis está establecido teóricamente para acuíferos confinados, aunque es aplicable en acuíferos libres si el descenso es pequeño respecto al espesor saturado, circunstancia que cabe admitir aquí. El modelo de Neuman está concebido para acuíferos libres en tanto que tiene en cuenta el efecto denominado “drenaje diferido”, característico de éstos. Sucede, no obstante, que, si no transcurre un determinado lapso de tiempo, el citado efecto no se manifiesta en su totalidad, y los dos modelos en esa fase de tiempos iniciales coinciden sensiblemente. Esta circunstancia es la que seguramente se ha producido en el presente ensayo en relación con alguno de los puntos de control.

El programa permite visualizar el ajuste automático de los puntos experimentales a los dos modelos teóricos seleccionados y estimar los parámetros hidráulicos del acuífero: transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y (exclusivamente para el modelo de Neuman) porosidad efectiva (S_y). Los resultados se presentan en Anexos. La permeabilidad puede estimarse como: $K = T/h_0$, donde h_0 corresponde al espesor saturado que, en el caso de los sondeos 2 y 3, es de aproximadamente 30 m. En cuanto a S_y , dadas las características del acuífero resulta lógico pensar en valores entre el 10 % y el 30 %, o incluso mayores.

Para el punto S-1 resultan por ambos modelos valores de T de alrededor de 3500 m^2/d y de S entre el 2 % y el 3 % ($S_y = 2\%$). La permeabilidad que resulta, para un espesor saturado medio de aproximadamente 30 m, es de unos 100 m/d.

Para el punto S-2, alineado aproximadamente entre el S-1 y el pozo de bombeo en dirección paralela al cauce, resultan por ambos modelos valores de transmisividad entre 2100 m^2/d (Neuman) y 2800 m^2/d (Theis). El valor de S es de $2,7 \cdot 10^{-4}$ (Theis)

y el de S_y (Neuman) del 50 %. La permeabilidad media que resulta, para un espesor saturado de aproximadamente 30 m, es próxima a los 80 m/d.

Los puntos P6-1 y P6-2 están aproximadamente alineados con el pozo de bombeo, pero en una dirección transversal a la del cauce. Para el primero, que es del que menos puntos experimentales se dispone, se obtiene un buen ajuste a la curva de Neuman. Es factible también que en este punto, más próximo al borde del acuífero, el espesor saturado sea menor (≈ 20 m?). El valor de T es de unos 170 m^2/d . La permeabilidad que se obtiene para el citado valor de h_0 es de aproximadamente 10 m/d. S_y es del 23 %. Para el P6-2 (“data-logger”) el ajuste al modelo de Neuman permite estimar un valor de $T = 2270 \text{ m}^2/\text{d}$. La permeabilidad que resulta es de 75 m/d. Para S_y resulta un valor del 50 %.

Para los descensos residuales registrados durante la fase de recuperación, el modelo de interpretación es el de Theis para esta circunstancia particular de la hidráulica subterránea. El programa ofrece los ajustes automáticos a la recta teórica y cuantifica T .

La transmisividad obtenida en el punto S-2 es de 1750 m^2/d ($K = 60$ m/d), lo que resulta algo inferior a lo calculado a partir de los datos de descenso durante el bombeo. Para el punto P6-2, el valor de T es de aproximadamente 5000 m^2/d ($K = 160$ m/d), es decir, algo más del doble del resultado del ensayo de bombeo.

10. ENSAYO DE INYECCIÓN DE TRAZADOR

Se preparó una disolución de 400 kg de sal común comercial en una cuba de aproximadamente 10 m³ de agua, dando como resultado una salmuera cuya conductividad era de 72 mS/cm, casi cien veces más que el agua subterránea. Este volumen de disolución se introdujo en el sondeo S-2, el cual contenía un volumen de unos 5 m³ con conductividad de 0,8 mS/cm. La conductividad de la mezcla teórica con el agua del sondeo era de casi 50 mS/cm.

Tras la introducción del trazador, lo que coincidió prácticamente con el comienzo del bombeo en el sondeo S-3 del día 20-10-2006, se hicieron numerosos perfiles seriados de conductividad en el S-2 para identificar el proceso de dilución del trazador. Estos perfiles ponían de manifiesto, además, el flujo vertical del trazador dentro del sondeo debido a su densidad considerablemente superior.

Aunque las condiciones de aplicación del ensayo (método del pozo único) no son las más favorables, se optó por considerar el valor medio de la conductividad a lo largo de la zona filtrante del sondeo y representar su variación con el tiempo. El modelo teórico justifica un decrecimiento exponencial de la concentración de trazador, influenciado, entre otras variables, por la velocidad de flujo del agua subterránea.

En la figura 10.1 se representa el resultado. Las condiciones teóricas se encuentran entre aproximadamente los minutos 35 y 135 del ensayo. En este tramo resulta un valor de velocidad horizontal entre 1 y 5 m/d, lo cual es congruente con los resultados que aparecen en CHSE (1987) para el perfil 6, donde se estiman valores a diferentes profundidades en los cinco sondeos de dicho perfil que están en el rango entre 0,6 m/d (P6-S5 entre 20 y 33 m) y 18 m/d (P6-S2, hasta los 46 m), con un valor medio de 5 m/d.

EVOLUCION DE LA CONDUCTIVIDAD MEDIA EN EL SONDEO S2 (ensayo de trazador)

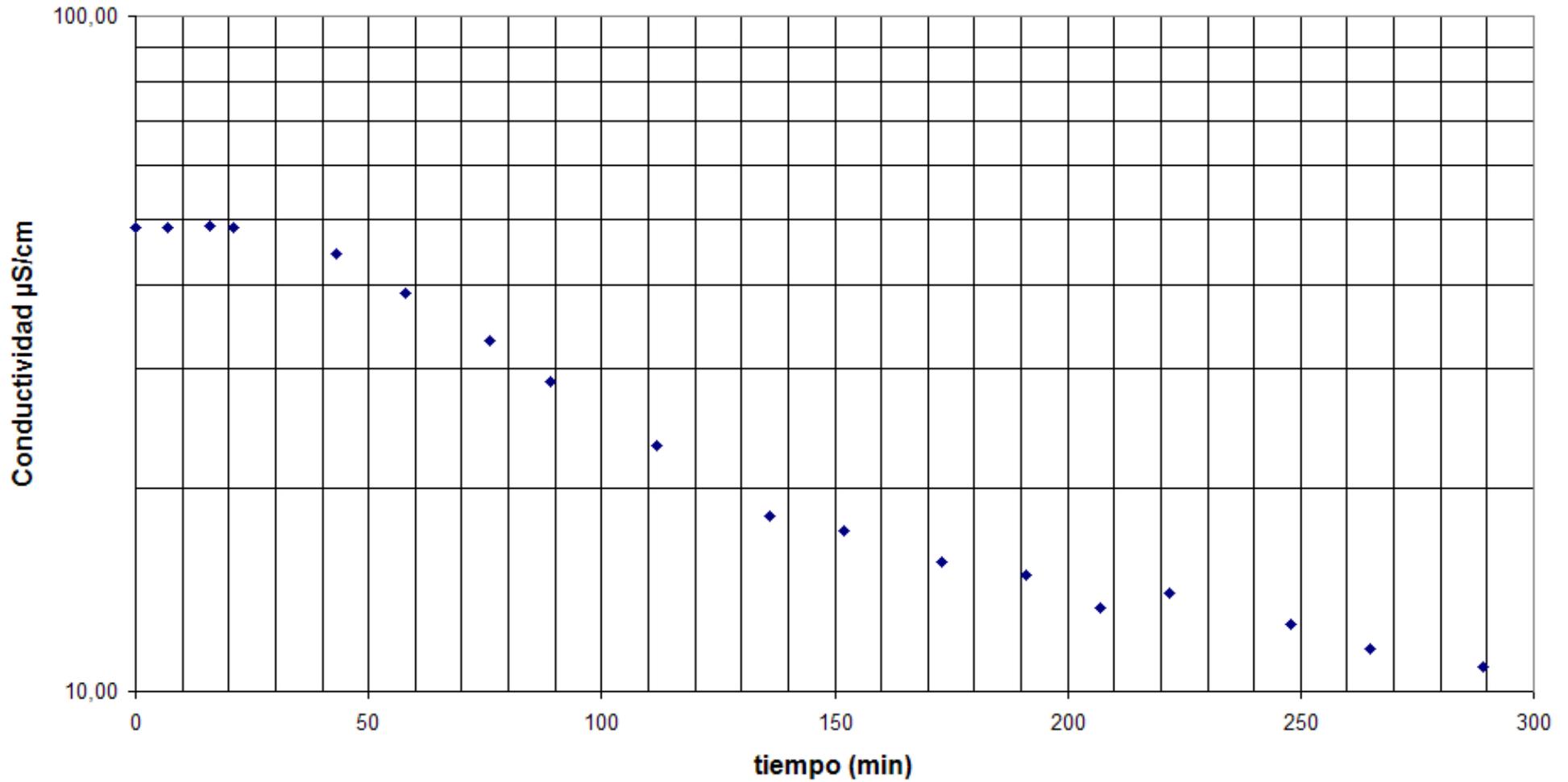


Figura 10.1. Representación gráfica de los resultados del ensayo de trazador.

A partir de los valores de la velocidad horizontal (v) puede estimarse la “velocidad de Darcy” ($q = v \cdot n_e$), admitiendo una porosidad efectiva (n_e) de 0,2: entre 0,2 m/d y 1 m/d.

Si se tiene en cuenta el gradiente hidráulico para la línea de flujo que une el sondeo S-1 con el sondeo en que se bombea (S-3) pasando por el sondeo ensayado (S-2), que es de 0,02, entonces se obtienen valores de permeabilidad entre 10 m/d y 80 m/d.

11. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS

Los ensayos se planificaron con escalones de caudal constante de una hora de duración, comenzando a 15 L/s y aumentando de forma progresiva, sin recuperación entre cada escalón, hasta tratar de llegar a 60 -65 L/s en al menos cuatro escalones (por ejemplo: 15, 30, 45, 60 l/s). El objetivo de no forzar demasiado los incrementos de caudal tenía por fin contribuir al desarrollo natural del sondeo. También se especificó que en los escalones no se buscaría necesariamente la estabilización del nivel. Estas condiciones, sin embargo, no se siguieron estrictamente por parte de los operarios, y prevaleció el criterio de prolongar la duración de los escalones hasta conseguir la estabilización.

El día 18-10-2006 la bomba estaba instalada en el sondeo S-3 a 43 m de profundidad. El sondeo tiene 33 m de filtro y llega a los 38 m de profundidad, El nivel estático estaba a 6,90 m. El ensayo comenzó a las 10:00 con un caudal de 15 L/s. Al cabo de una hora el nivel estaba estabilizado a 7,60 m. Luego se incrementó el caudal a 30 L/s. Como no se estabilizaba el nivel, se prosiguió otra hora, igualmente sin estabilización. Después de 190 min se llegó a un nivel de 10,54 m y el caudal se cambió a 45 L/sec. El caudal entonces comenzó a mostrar irregularidades, con descarga importante de aire. Se concluyó que la bomba no funcionaba adecuadamente y el ensayo se detuvo a la 15:40 con el nivel a 24,77 m. Al cabo de 20 minutos de recuperación el nivel era de 7,56 m. La conductividad del agua bombeada era de 840 μ S/cm.

El 19-10-2006 se instaló una nueva bomba a la misma profundidad. El nivel estático era de 6,91 m. A las 14:10 comienza a bombearse un caudal de 30 L/s. Al cabo de una hora el nivel era de 10,20 m. El caudal se incrementó a 45 L/sec y después de una hora el nivel alcanzó 17,38 m. Se subió a continuación el caudal a 65 L/s. Con este valor se producían irregularidades en la descarga, con frecuente salida de aire, que obligaban a rectificar algo a la baja el caudal. Después de tres horas de bombeo el nivel estaba a 40,85 m. Al cabo de 90 minutos de recuperación el nivel estaba a 7,03 m. La conductividad a lo largo del bombeo no experimentó cambios respecto al valor del día anterior (840 μ S/cm).

El 25-10-2006 se ensayó el sondeo S-4. El filtro tiene 33 m y llega a una profundidad de 35,50 m. El nivel estático estaba a 7,36 m. A las 10:45 comenzó el bombeo con un caudal de 15 L/s. Después de 75 minutos de bombeo se medía un descenso 0,87 m. Luego se dobló el caudal, y al cabo de otros 75 minutos el descenso era de 2,64 m. El caudal se incrementó hasta 50 L/s y el descenso alcanzó 10,92 m. A las 14:05 se incrementó el caudal a 70 L/s, lo que produjo una caída en el nivel de unos 20 m y la descarga de mucho aire, por lo que se decidió reducir el caudal. Durante 25 minutos el caudal fue de 40 L/s, pero a las 17:05 se mantuvo en 50 L/s. Una hora más tarde el caudal alcanzó 55 L/s, seguido de turbulencias en la descarga. 10 minutos más tarde se interrumpió el bombeo con el nivel a una profundidad de 35,0 m. Tras 90 minutos de recuperación, el nivel se encontraba 5 cm más profundo que el nivel estático al comienzo de la prueba.

Como es usual en este tipo de ensayos, en todos los comienzos de escalones de bombeo se advertía la descarga de agua muy turbia, la cual, progresivamente, iba aclarándose a medida que el bombeo avanzaba.

En las figuras 11.1 y 11.2 se incluyen las gráficas de descensos-tiempos (log). Esto último se hace para facilitar la visualización y comprobar ajustes/desviaciones respecto del modelo teórico (recta de Jacob-Cooper).

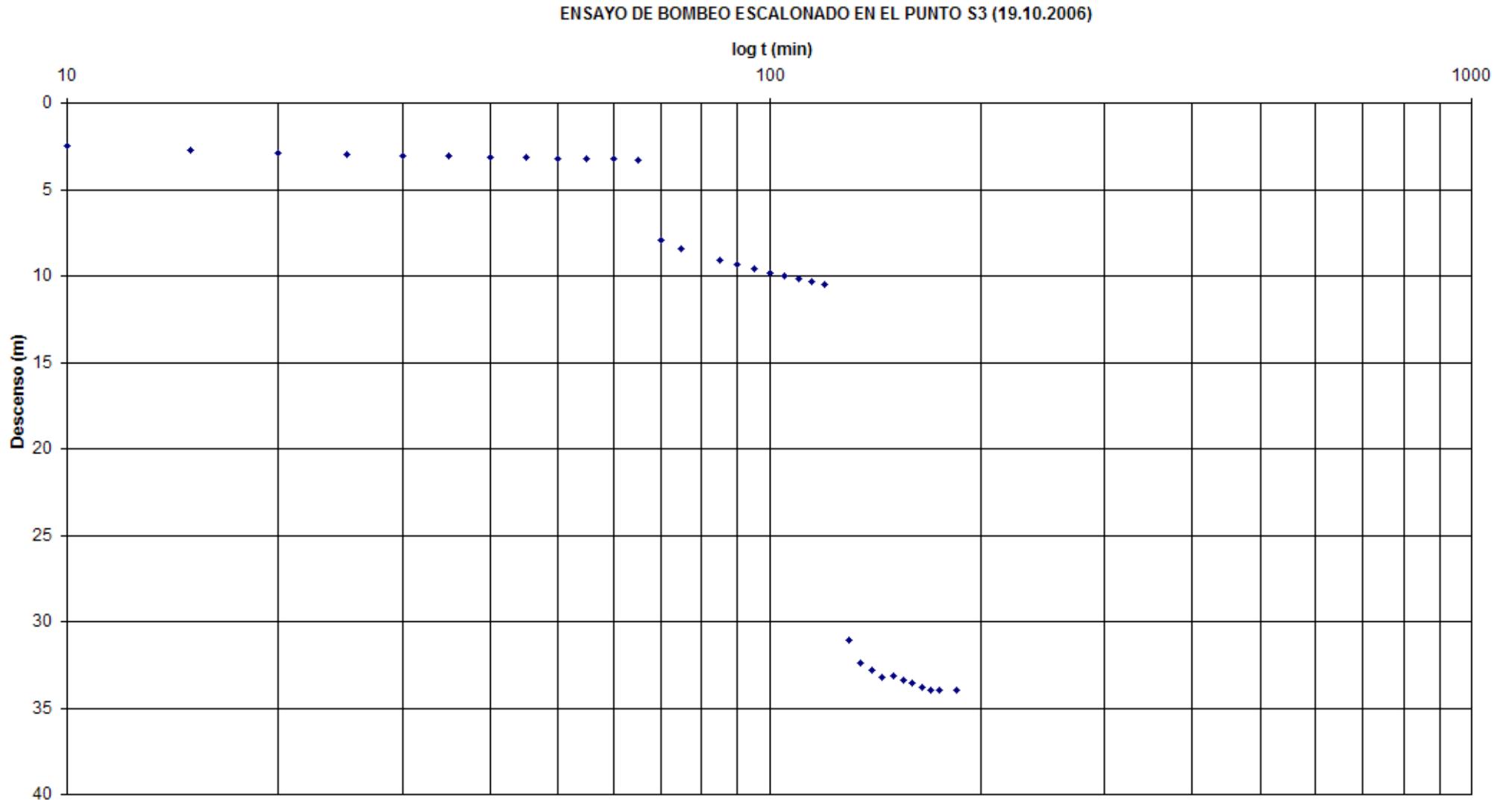


Figura 11.1. Evolución de descensos en el sondeo 3 durante el ensayo de caudales escalonados.

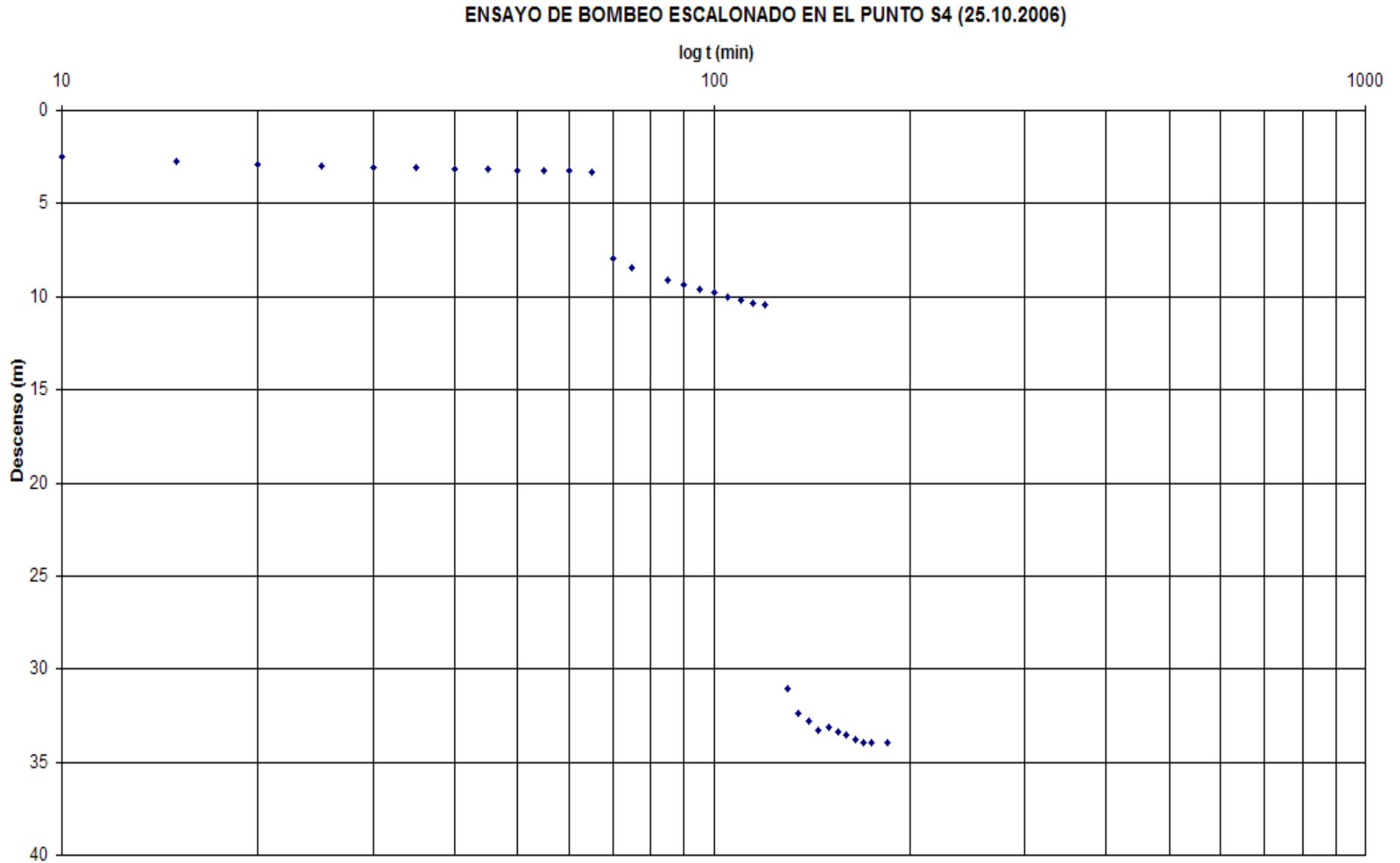


Figura 11.2. Evolución de descensos en el sondeo 4 durante el ensayo de caudales escalonados.

12. CURVAS CARACTERÍSTICAS Y EFICIENCIA DE LOS SONDEOS

En la figura 12.1 se representa gráficamente el descenso asociado a los diferentes escalones de caudal para cada uno de los sondeos ensayados. Para el S-3 no se han considerado los resultados de los dos últimos escalones del ensayo del 18-10 debido a los problemas encontrados que ya se han descrito.

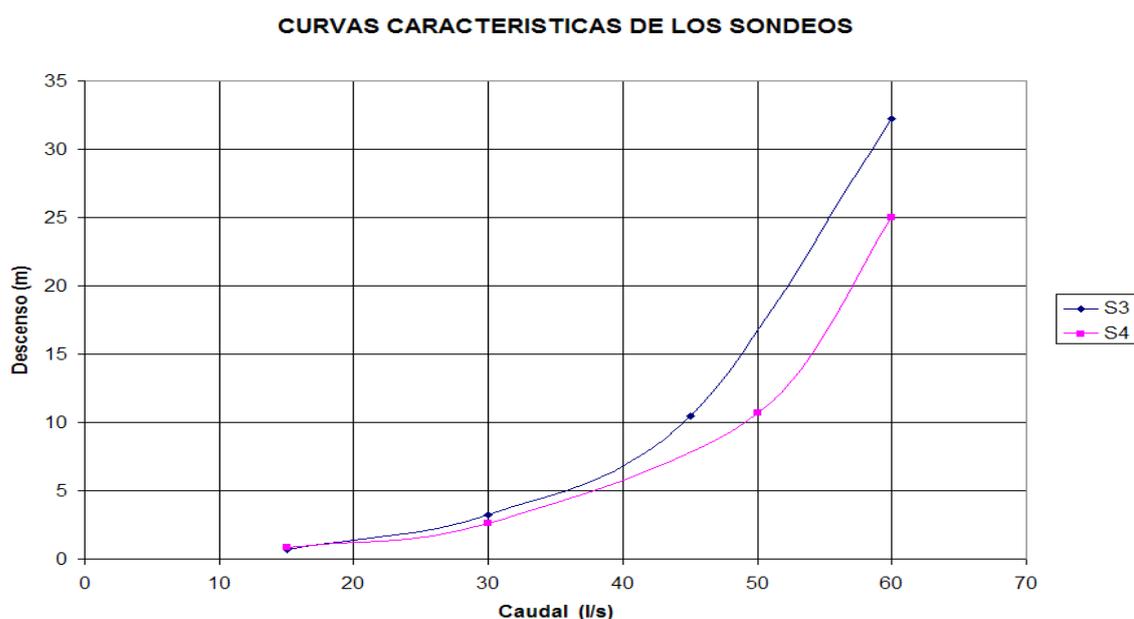


Figura 12.1. Curvas características obtenidas a partir de los ensayos de caudales escalonados.

Las curvas características representadas son orientativas, porque las condiciones de realización de los ensayos no han sido las correctas que se planificaron. Se comprueba, no obstante, que la relación entre caudal bombeado y descenso producido en el propio pozo se aleja de la linealidad sobre todo a partir de 40 L/s. También se advierte el mejor rendimiento (caudal específico) que presenta el S-4 respecto del S-3 para los caudales más elevados ensayados. Así, para un bombeo de 30 L/s, el caudal específico que se obtiene (muy similar en ambos sondeos) es de aproximadamente 10 L/s·m. Al doblar el caudal de bombeo, el caudal específico del S-4 es 2,4 L/s·m y el del S-3 es 1,9 L/s·m.

Se ha tratado de encontrar la expresión analítica para las curvas características de los dos sondeos en el tramo de caudales ensayado. La ecuación que da el descenso en el propio pozo (s_p , en m) en función del caudal de bombeo (Q , en m^3/min) es la de Rorabaugh:

$$s_p = B \cdot Q + C \cdot Q^n$$

donde B es el coeficiente de pérdidas de carga en el acuífero y C es el coeficiente de pérdidas de carga en el pozo. El término $B \cdot Q$ representa el descenso debido al flujo en el acuífero (descenso “teórico”) y el término $C \cdot Q^n$ representa el descenso por las pérdidas de carga en el pozo.

Tras emplear el método gráfico de tanteos en el valor de B , se ha llegado a los siguientes resultados:

$$\text{Para el S-3: } s_p = 0,60 \cdot Q + 0,43 \cdot Q^{2,75}$$

$$\text{Para el S-4: } s_p = 0,875 \cdot Q + 0,36 \cdot Q^{2,82}$$

La eficiencia del pozo E_p se calcula por el cociente entre el descenso real y el descenso teórico expresado como porcentaje. Es función del caudal y se refiere a un tiempo de bombeo dado, en nuestro caso el de duración de cada escalón (aproximadamente una hora). En la figura 12.2 se representa el valor de E_p para tres caudales en cada sondeo. Para un caudal de 40 L/s la eficiencia del sondeo S-3 es del 23 % y la del S-4 es del 47 %.

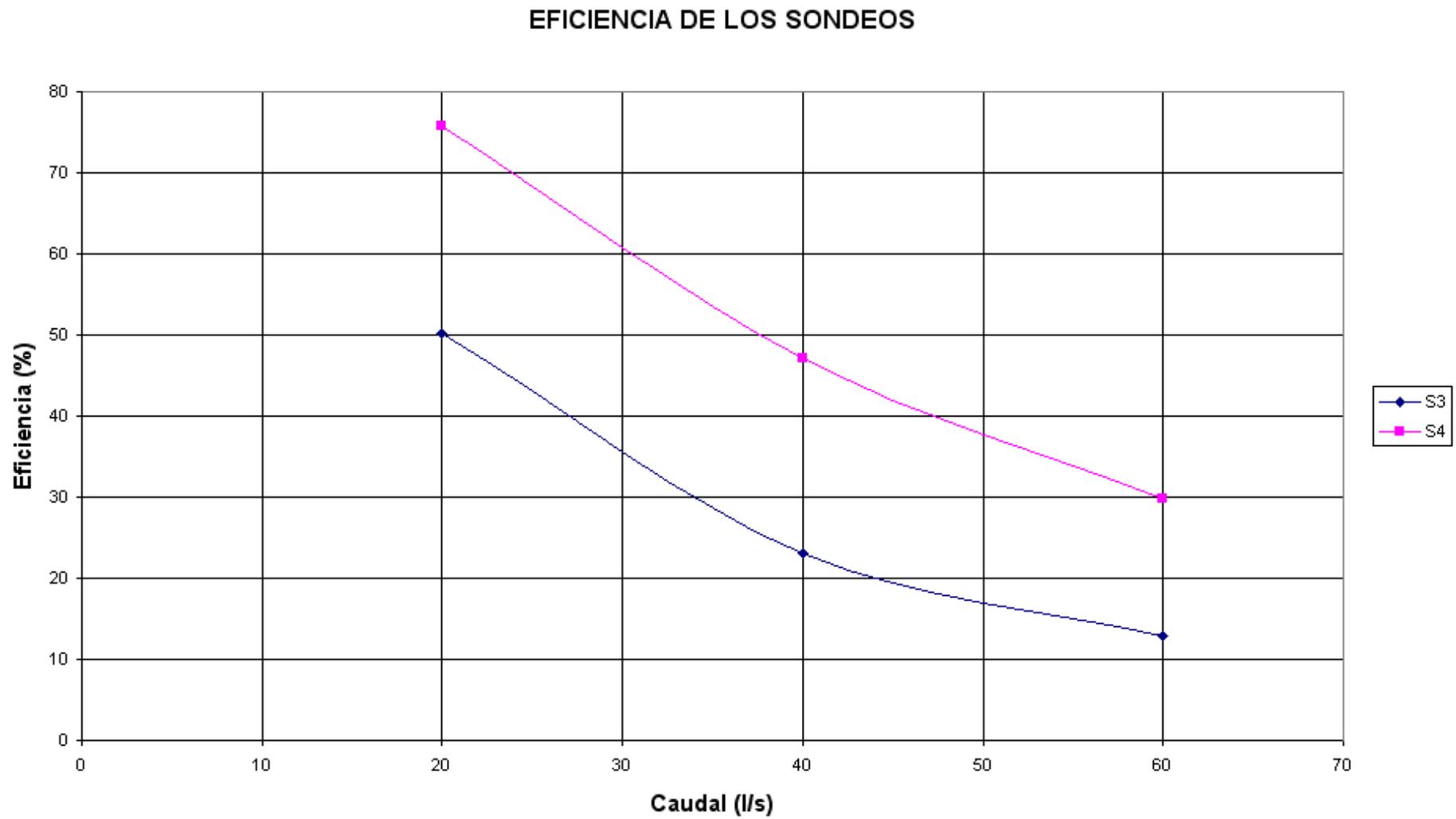


Figura 12.2. Eficiencia de los sondeos 3 y 4 a partir de los resultados de los ensayos de caudales escalonados.

13. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS A PARTIR DE LAS RECUPERACIONES TRAS LOS ENSAYOS DE BOMBEO ESCALONADOS

Los ensayos de bombeo escalonados no son los más idóneos para estimar parámetros hidráulicos de los acuíferos a partir de los descensos medidos en piezómetros próximos, pues la condición de caudal constante de bombeo no se cumple. Los realizados en este estudio, además, tienen el inconveniente de su duración escasa. No obstante, las medidas de recuperación (considerando el caudal medio del bombeo como valor de caudal “constante”) presentan mayor fiabilidad de cara a la estimación de los parámetros, al menos con fines de contrastar los valores obtenidos en otros ensayos más representativos. Así, tras el bombeo escalonado del sondeo S-3 el 19-10-2006, las medidas de recuperación en el sondeo S-2 conducen a un valor de T de 2310 m²/d, lo que implica una K de aproximadamente 80 m/d. En el punto P6-2 el valor de T es de algo más de 5100 m²/d, a lo que corresponde una K de 170 m/d. Los ajustes se pueden ver en los gráficos correspondientes del Anexo.

14. CONSIDERACIONES SOBRE LOS VALORES DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS OBTENIDOS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS (LABORATORIO Y CAMPO)

Con la excepción del punto P6-1, en los ensayos de bombeo y de recuperación analizados se obtienen valores de T entre aproximadamente 1700 m²/d (S-2) y 5000 m²/d (P6-2, recuperación del ensayo escalonado del 19-10, que es un valor menos fiable que los obtenidos en el ensayo de 24 h). La permeabilidad que resulta está entre 50 m/d y 170 m/d, con un valor promedio general aproximado de 100 m/d.

Si se tiene en cuenta que en el punto en que se han obtenido los valores más elevados de T es bastante factible que el espesor saturado sea superior al valor de referencia de 30 m, tal vez del orden de los 50 m o incluso más, según los datos de CHSE (1987), entonces resultaría un valor de K de 100 m/d.

El valor inferior de T de los obtenidos, de unos 170 m²/d, lo ha sido en el P6-1, donde es factible que, de acuerdo con la información disponible, el espesor saturado sea inferior a 30 m, según ha sido apuntado. En cualquier caso, este resultado sugiere un valor de K menor que en el resto de los puntos (unos 10 m/d).

El valor medio general de K de 100 m/d es algo más del doble del valor medio estimado a partir del ensayo de trazador realizado (45 m/d) y unas cinco veces superior al promedio de los dos valores obtenidos en las pruebas de laboratorio (permeametrías). Dentro de que se trata de cifras del mismo orden de magnitud, las diferencias ponen de manifiesto el efecto de escala que resulta de considerar un volumen de terreno muy superior.

15. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN ESTACIONARIO EN UN SONDEO-TIPO

Se ha considerado un sondeo-tipo para la zona donde se han realizado las perforaciones, de acuerdo con las características siguientes:

Permeabilidad: $K = 100 \text{ m/d}$

Espesor saturado: $h_0 = 25 \text{ m}$

Caudal constante de bombeo: $Q = 40 \text{ L/s}$

Eficiencia del sondeo: $E_p = 30 \%$

Si se hace la hipótesis de que en el transcurso del bombeo se alcanza el régimen estacionario con radio de influencia $R = 500 \text{ m}$, pueden estimarse los descensos a diferentes distancias (r) del pozo de bombeo, partiendo de la propia pared de éste ($r_p = 0,25 \text{ m}$), a partir de la fórmula de Dupuit.

La solución se representa gráficamente en la figura 15.1. Se advierte en la figura que en el propio pozo el descenso es de casi 6 m, mientras que a 25 m del mismo pasa a ser de unos 70 cm.

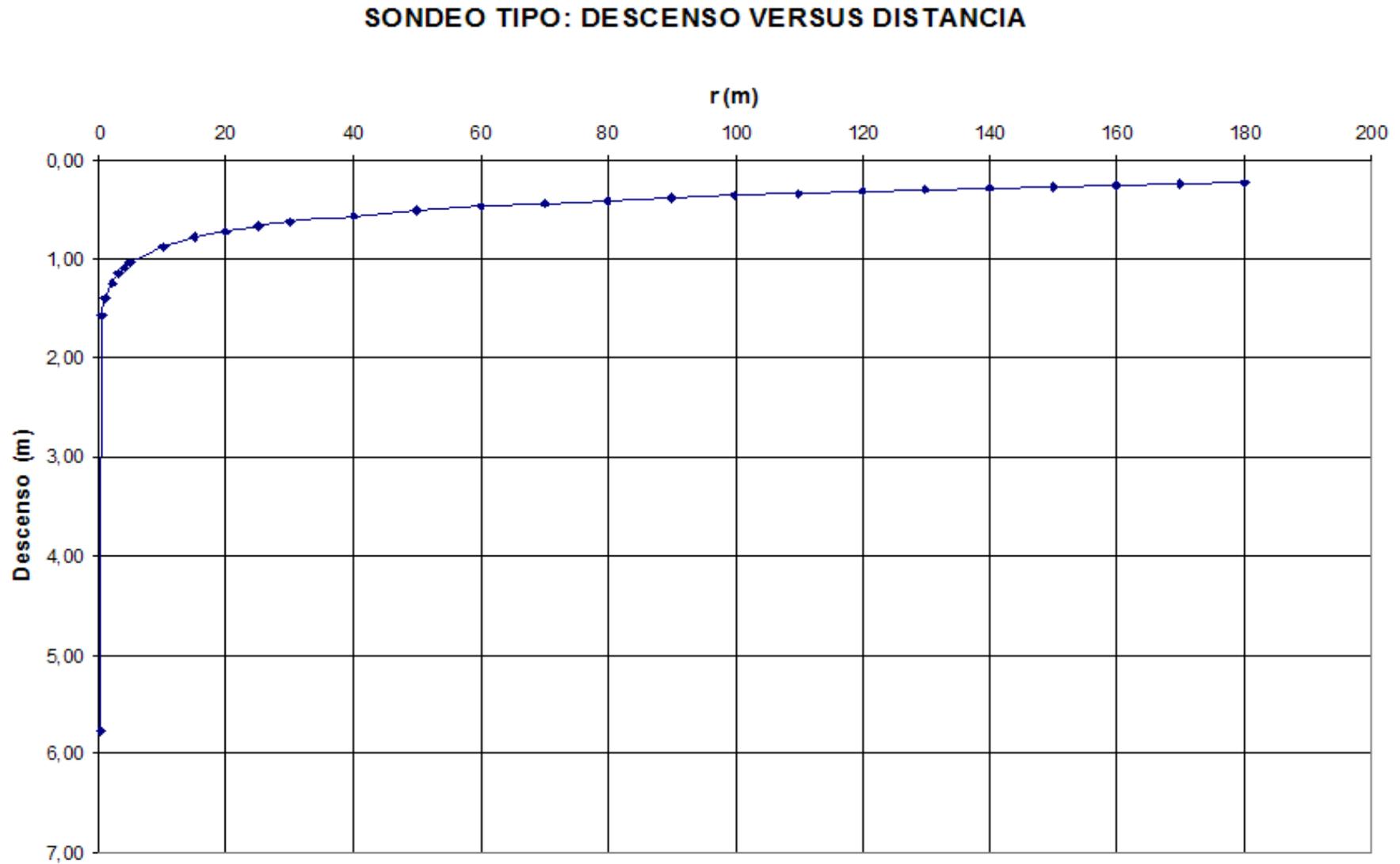


Figura 15.1. Estimación de descensos respecto a la distancia del pozo de bombeo (sondeo-tipo) en régimen estacionario

16. PREVISIÓN DE DESCENSOS EN RÉGIMEN TRANSITORIO EN UN SONDEO-TIPO

Con las mismas condiciones expuestas en el apartado anterior, salvo la de la existencia del régimen estacionario, y considerando ahora un valor de coeficiente de almacenamiento de $S = 0,2$, y a partir de la aplicación de la fórmula de Jacob, se ha estimado, en primer lugar, la evolución en el tiempo –a lo largo de un mes de bombeo- del descenso a una distancia de 25 m del punto de bombeo. El resultado se representa en la figura 16.1, donde se advierte un incremento del descenso entre 20 cm y casi 80 cm a lo largo de ese intervalo.

Un cálculo similar, pero ahora para el pozo de bombeo, pone de manifiesto descensos entre 4 m y casi 6 m en ese mismo intervalo (figura 16.2).

SONDEO TIPO:DESCENSO VERSUS TIEMPO (r = 25m)

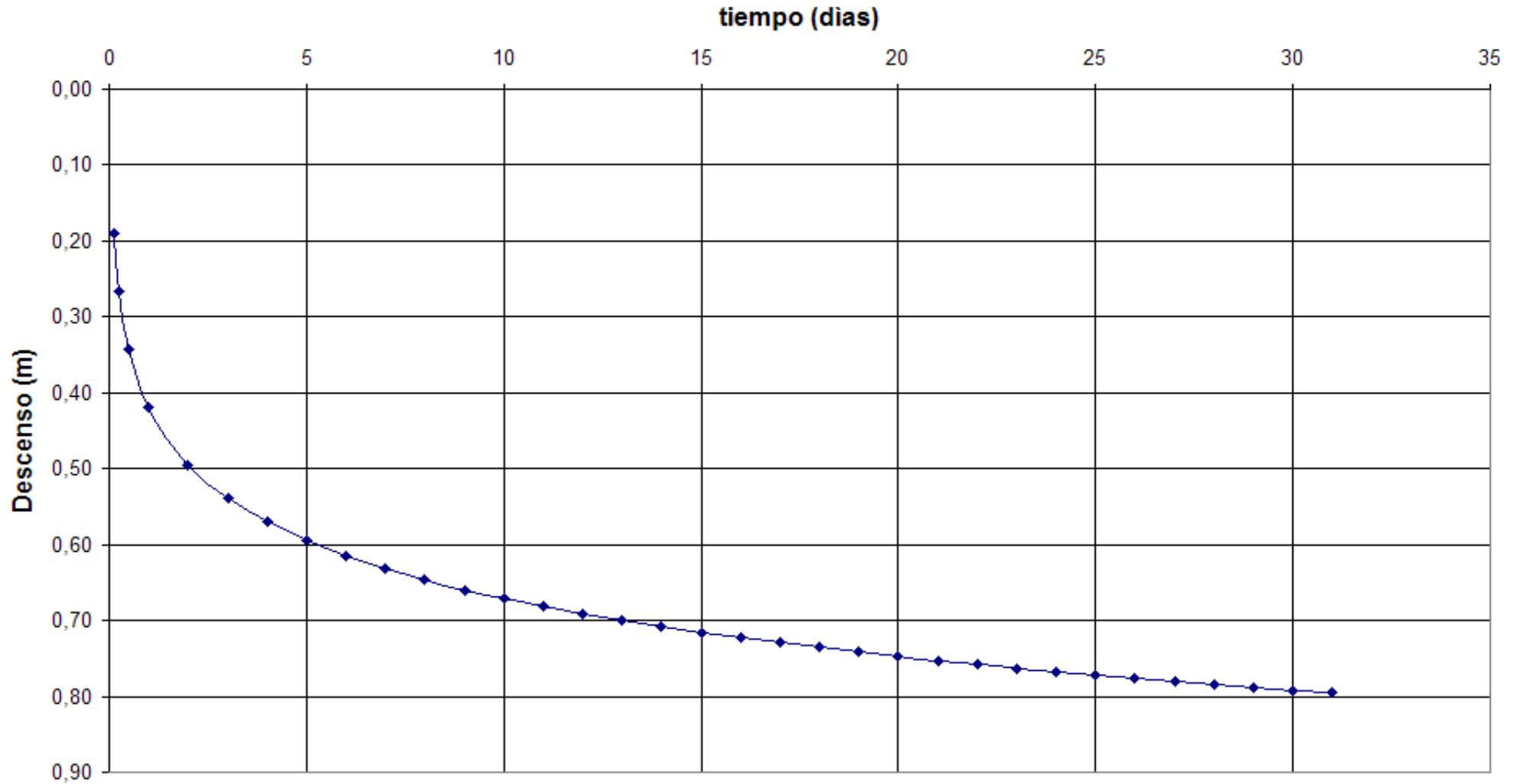


Figura 16.1. Estimación de la evolución del descenso con el tiempo de bombeo en un punto de observación situado a 25 m del sondeo-tipo.

SONDEO TIPO: DESCENSO VERSUS TIEMPO ($r = 0.25 \text{ m}$)

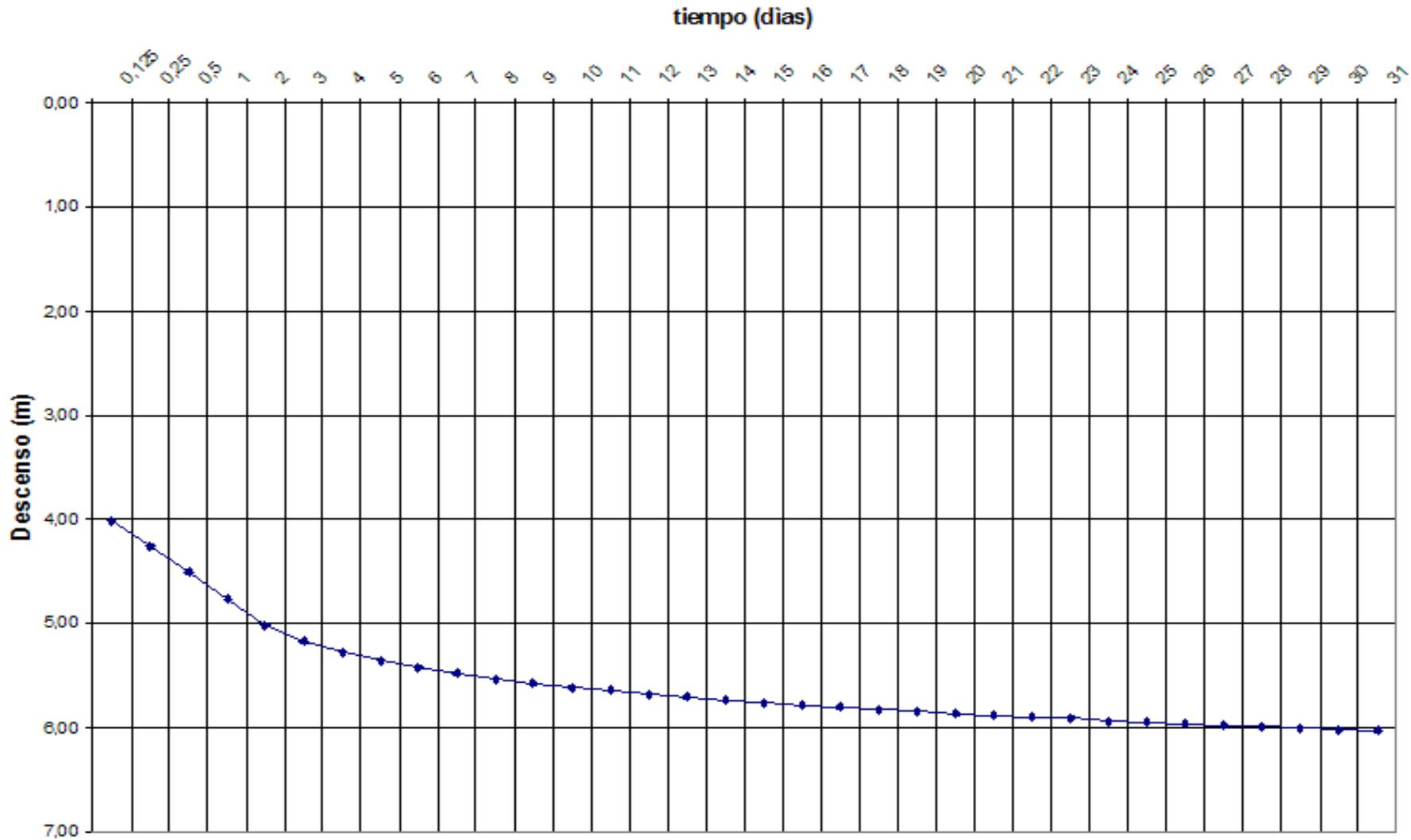


Figura 16.2. Estimación de la evolución del descenso con el tiempo de bombeo en el sondeo-tipo.

17. OBSERVACIONES HIDRODINÁMICAS POSTERIORES A LOS ENSAYOS

En la figura 17.1 se representa la evolución del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-S2, durante los ensayos y hasta octubre de 2007.

Se advierte, en primer lugar, que el descenso en el nivel por efecto de los bombeos va acompañado de un incremento en la temperatura del agua de hasta 0,3 °C.

El efecto del bombeo escalonado del 25-10-2006 en el sondeo S-4, distante 171 m del punto de observación, apenas es perceptible.

Los días 7 y 8 de noviembre de 2006 hubo en el área precipitaciones importantes, del orden de 100 mm según el control que se lleva a cabo en la finca Los Alamos, que han producido una subida de nivel de más de un metro, ya sea por infiltración directa o por causa del cese de los bombeos para riego en esos días y otros posteriores.

El mencionado episodio de precipitaciones intensas tuvo como consecuencia, según los testimonios recogidos, la generación de flujo superficial abundante en el cauce principal. Aunque no duró mucho la generación de escorrentía, el agua alcanzó los sondeos, aparentemente sin dañarlos.

Durante los meses de diciembre de 2006 a enero de 2007 se ha observado flujo a lo largo del cauce, aunque de escasa magnitud (del orden de la decena de litros por segundo), en el entorno de las perforaciones. Esta situación ya no aparecía a mediados de marzo, en donde el único flujo correspondía al vertido de las aguas residuales de Benamocarra, el cual desaparece a poca distancia aguas abajo tras formar unos remansos.

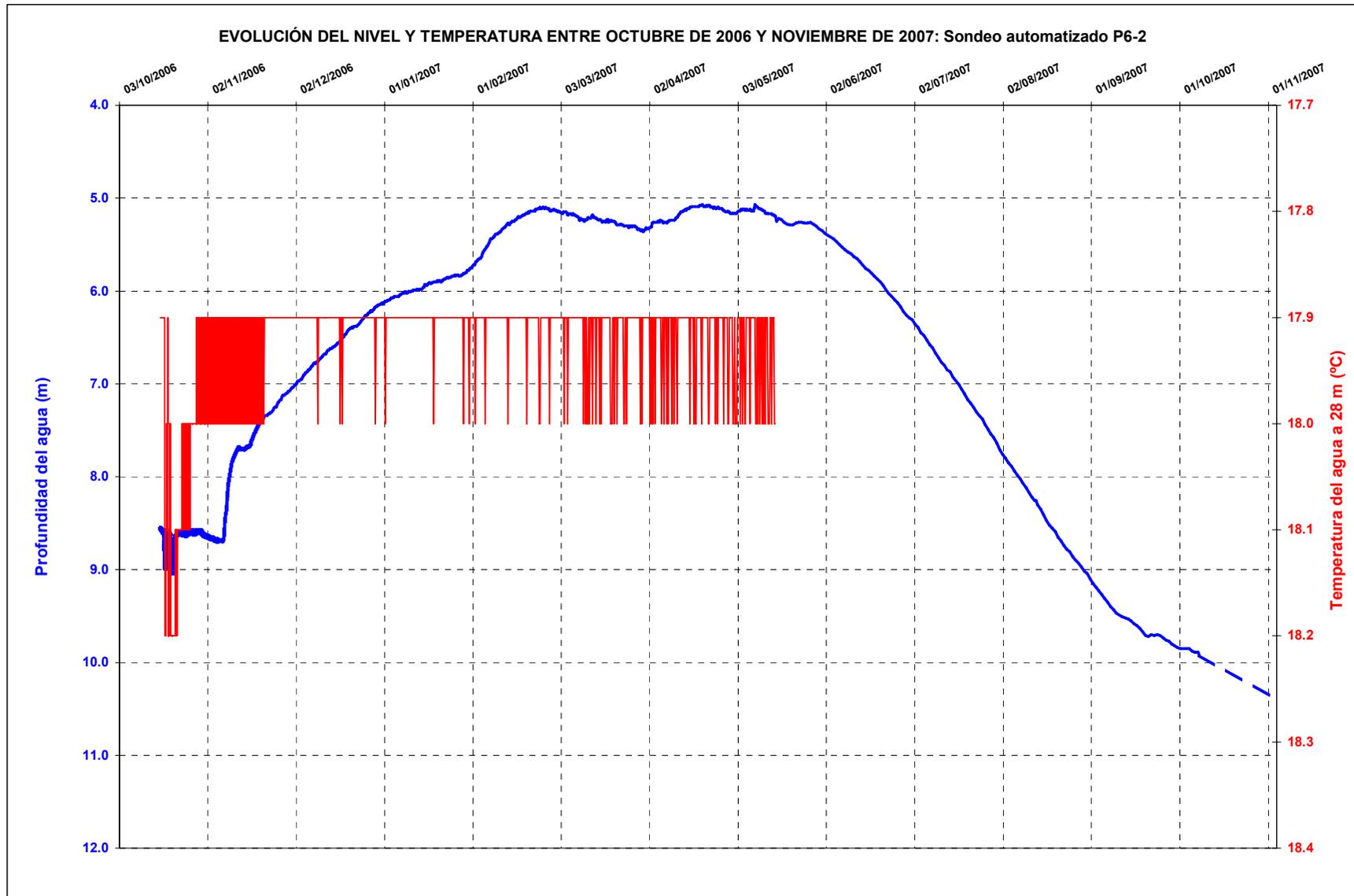


Figura 17.1. Evolución del nivel y de la temperatura del agua en el piezómetro P6-2.

El 22 de marzo de 2007 se midió el nivel en las perforaciones. Respecto a la situación inmediatamente antes de los ensayos (principios de octubre de 2006) se detectaba un ascenso generalizado del nivel freático: 2,2 m (S-3), 2,6 m (S-1 y S-2), 3,4 m (punto A), 3,6 m (S-4) y 3,9 m (punto P6-S1). La conductividad era de aproximadamente 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la temperatura de 18 °C a 19°C.

Otra serie de medidas de nivel se llevaron a cabo en diferentes puntos de acuífero el 30 de junio de 2007. En la tabla 17.1 se incluyen los datos obtenidos y se comparan con los registrados tres meses antes. Se comprueba que, en el entorno de las perforaciones, los niveles han descendido entre 0,9 m (S-4) y casi 2 m (P6-S1). En sectores a menor altitud del acuífero el descenso es menor: entre 0,2 y 0,3 m en la mayoría de los puntos controlados. La situación de estos puntos se incluye en la figura 17.2. Durante julio y agosto los niveles han continuado experimentando descensos; en el entorno de las perforaciones ha sido de unos 3 m. A principios de octubre de 2007, el nivel en el punto P6-S2 se encontraba a casi 10 m de profundidad (9,92 m el 8-10-2007), lo que representa un descenso del orden de 5 m respecto a la situación de niveles altos y una bajada general de algo más de un metro a lo largo del año hidrológico 2006-2007 en el sector considerado.

Tabla 17.1. Medidas de nivel en marzo y junio de 2007 y diferencias.

| PUNTO | SECTOR | PROF NIVEL (m) 23/03/2007 | PROF NIVEL (m) 30/06/2007 | DIFERENCIAS NIVELES (23/03-30/06) |
|---------|--------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| G6-22 | B | 5.12* | 5.02* | 0.10 |
| H6-1-1 | B | 5.47* | 5.42* | 0.05 |
| S 1 | B | 3.62 | 4.66 | -1.04 |
| S 2 | B | 3.99 | 5.03 | -1.04 |
| S 3 | B | 3.47 | 4.47 | -1.00 |
| S 4 | B | 4.58 | 5.47 | -0.89 |
| P6-S1 | B | 4.58 | 6.44 | -1.86 |
| POZO A | B | 5.6* | 7.62* | -2.02 |
| S-152 | C | 0.97 | 1.23 | -0.26 |
| IGME-2 | C(I) | 1.49 | 1.73 | -0.24 |
| IGME-3 | C(I) | 0.17 | 0.44 | -0.27 |
| Pz-Di | C(I) | 2.55 | 2.84 | -0.29 |
| Pz-B | C(S) | 1.98 | 2.26 | -0.28 |
| H6-17-1 | C(S) | 3.01* | 3.28* | -0.27 |

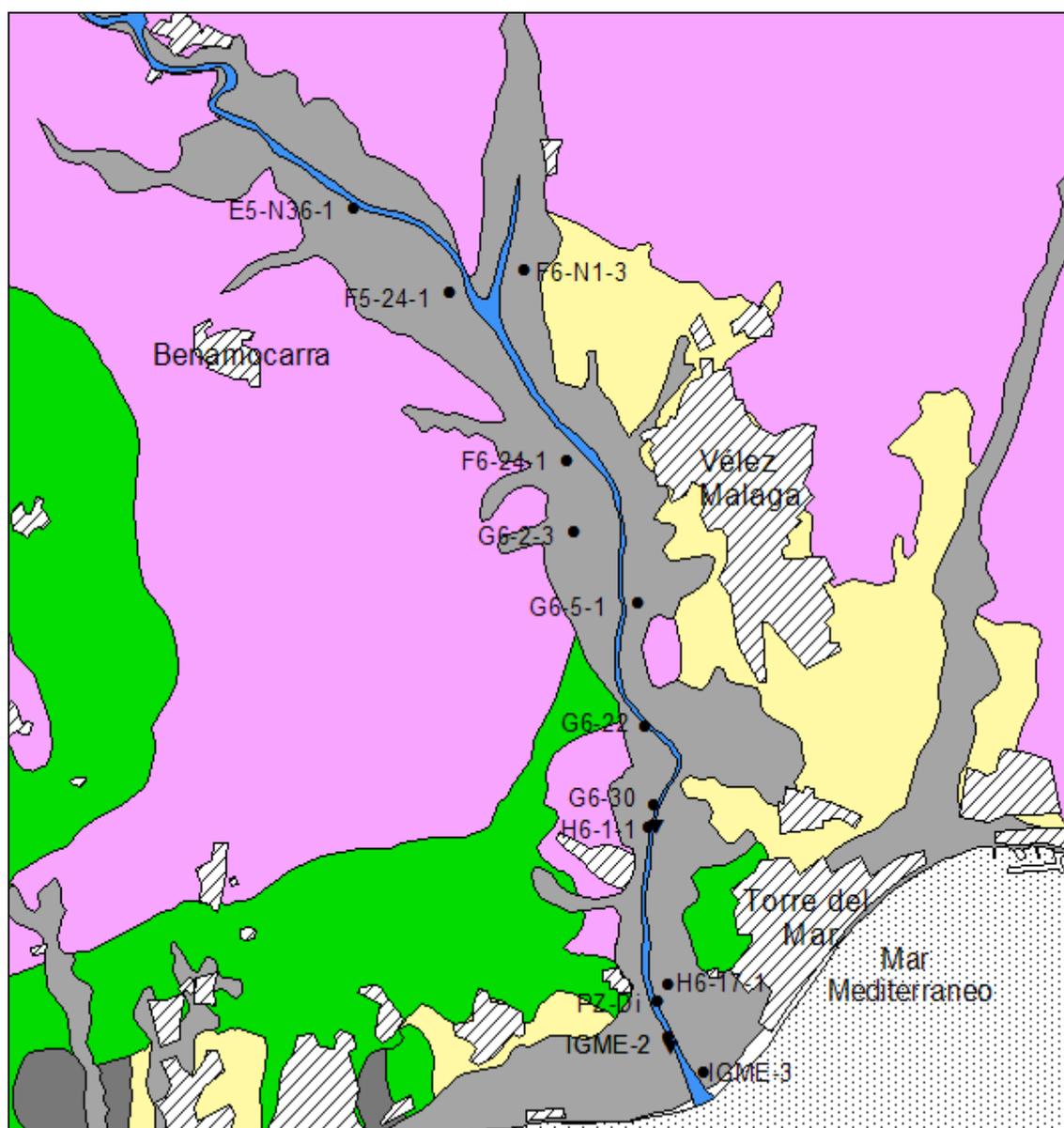


Figura 17.2. Localización de puntos de control piezométrico y de calidad.

Aguas abajo de Vélez Málaga el nivel freático del acuífero interseca con la topografía a nivel del cauce del río Vélez. Esto produce una descarga difusa, fácilmente apreciable en tanto que el río suele discurrir sin flujo por ese sector. Así, salvo en periodos de avenidas o de desembalses importantes, el caudal del río entre Vélez Málaga y el mar es prácticamente en su totalidad de procedencia subterránea, como se desprende, entre otros aspectos, de la muy escasa turbidez del agua que circula. Esta descarga es particularmente destacable en el tramo denominado “sotos del río”, donde el flujo de agua da sustento a una densa vegetación de ribera. Aguas abajo de este tramo debe existir percolación, pues la

tendencia general es a disminuir el caudal fluyente a medida que nos acercamos al mar.

La descarga de agua hacia el mar se ha podido comprobar, en el marco de nuestros controles de 2007, hasta mediados de junio. A finales de marzo el caudal en ese tramo podía superar los 100 L/s; más abajo, en el paraje de Vega de Mena, el caudal estaba entre 50 y 100 L/s; un kilómetro aproximadamente antes de la desembocadura, bajo el puente de la antigua N-340, el caudal estaba entre 10 y 30 L/s. Todas estas cifras corresponden a estimaciones. El día 30 de junio se hizo una campaña de aforos seriados en el río, utilizando para ello un medidor adaptado al sistema de integración, por lo que no se requería medir ni secciones ni velocidades sino añadir al agua del río una pequeña cantidad de sal comercial. Así se pudo medir con fiabilidad el caudal en el tramo de Los Sotos (25 L/s) y en el paraje de Vega de Mena (12,5 L/s). Más abajo, junto al puente de la antigua N-340, el flujo era imperceptible.

En el anexo fotográfico pueden observarse los caudales circulantes en distintas del río. Asimismo se presentan fotografías de julio de 2004 y mayo de 2007, ésta última fecha correspondiente a un año más seco.

18. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

Los días 22 y 23 de marzo de 2007 se realizó un muestreo en diferentes puntos del acuífero, complementado con dos muestras de agua del río y otra tomada en una conducción para riego procedente del embalse de La Viñuela. Además de la toma de muestras, se procedió a medir “in situ” la temperatura, el pH, el Eh, la conductividad eléctrica y el oxígeno disuelto (contenido y porcentaje de saturación). En laboratorio (equipos del Grupo de Hidrogeología de la Universidad de Málaga) y con escasa demora se determinaron los constituyentes mayoritarios disueltos, así como los minoritarios K^+ , F^- y especies nitrogenadas (nitratos, nitritos y amonio) y el TOC.

En la tabla 18.1 se presentan los resultados obtenidos, junto con los valores máximo, mínimo y medio para cada variable, distinguiéndose las aguas superficiales de las subterráneas (aunque el agua fluyente por el río, según se ha citado anteriormente, corresponde al drenaje del acuífero).

Los diagramas hidroquímicos de las figuras 18.1 y 18.2 ponen de manifiesto que, con la excepción del agua contenida en el piezómetro Pz-Di, todas las muestras presentan una gran homogeneidad en su composición, de tipo bicarbonatado cálcico aunque con contenidos relativamente altos en sulfatos y magnesio. Este tipo de agua es el mismo que caracteriza a la del embalse de La Viñuela, utilizada para riego, aunque con mayor mineralización debido al efecto del flujo subterráneo.

La composición anómala en el piezómetro Pz-Di responde a un efecto de carácter muy localizado, que se interpreta como consecuencia de un ambiente reductor que afecta a los contenidos de ciertas especies abundantes (sulfatos y nitratos), lo que se corrobora por valores mínimos de oxígeno disuelto y del Eh. Puede haber también precipitación asociada de $CaCO_3$. Los valores bajos de conductividad apuntan asimismo a una posible mezcla con aguas procedentes de La Viñuela (¿aguas residuales urbanas?).

En lo relativo a constituyentes minoritarios, hay que destacar los elevados contenidos de nitratos que se desprenden del muestreo. Esta circunstancia era ya conocida a partir de estudios previos y tiene su origen en las actividades agrícolas (fertilización) y en la eventual infiltración de aguas residuales urbanas.

En el agua de La Viñuela la concentración de nitratos es inferior a 5 ppm, pero en el acuífero la media es de 50 ppm aproximadamente, con un valor máximo de 100 ppm. Los contenidos en nitratos del agua del río en los dos puntos en que se ha muestreado (entre 40 y 40 ppm) denotan su procedencia subterránea.

En general, los contenidos de nitratos resultan algo inferiores a los obtenidos en muestreos precedentes. El valor mínimo, de menos de 1 ppm, se ha registrado en un punto (piezómetro Pz-Di) donde, según ha sido ya comentado, se sospecha que existen procesos redox locales tendentes a eliminar del agua subterránea especies de azufre y nitrógeno en estado oxidado.

En la figura 18.3 se presenta la variación espacial del contenido en nitratos del acuífero. Los valores más altos se localizan en la vega de Vélez Málaga y seguramente reflejan procesos de recirculación de aguas bombadas para riego. En la zona del delta se advierte una tendencia a valores decrecientes, que puede ir asociada a procesos naturales de desnitrificación.

Tabla 18.1. Resultados de la campaña de muestreo de marzo de 2007 en aguas subterráneas y superficiales.

| PUNTO | Sector | Prof. (m) | CE (µS/cm) | T (°C) | pH | Eh (mV) | O ₂ mg/l | %O ₂ sat. | TOC (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Ca ²⁺ (mg/l) | Mg ²⁺ (mg/l) | NH ₄ ⁺ (mg/l) | NO ₃ ⁻ (mg/l) | NO ₂ ⁻ (mg/l) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | F ⁻ (mg/l) |
|--------------|--------|-----------|-------------|-------------|------------|--------------|---------------------|----------------------|------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| E5-N36-1 | A | B | 873 | 20.0 | 7.3 | 86.5 | 6.8 | 76.6 | 1,40 | 43.2 | 1.8 | 114.5 | 37.2 | | 47.4 | | 336.7 | 118.2 | 48.4 | 0.4 |
| F5-24-1 | A | B | 870 | 19.9 | 7.8 | 122.8 | 8.5 | 91.5 | 1,84 | 40.8 | 2.2 | 118.6 | 35.3 | | 48.7 | | 319.0 | 121.5 | 50.4 | 0.3 |
| F6-N1-3 | A | B | 707 | 18.6 | 7.5 | 82.2 | 7.0 | 74.8 | 0,37 | 39.2 | 2.3 | 84.7 | 27.9 | | 15.9 | | 294.2 | 80.5 | 36.7 | 0.3 |
| F6-24-1 | B | B | 1021 | 19.3 | 7.3 | 77.6 | 7.2 | 79.4 | 0,33 | 47.4 | 1.1 | 131.7 | 41.6 | | 60.5 | | 378.9 | 145.3 | 55.2 | 0.4 |
| G6-22 | B | B | 912 | 18.8 | 7.4 | 95.0 | 6.9 | 75.3 | 0,29 | 45.2 | 2.1 | 116.6 | 36.3 | | 42.8 | | 339.0 | 127.0 | 50.9 | 0.3 |
| G6-2-3 | B | B | 1158 | 20.0 | 7.2 | 90.0 | 5.4 | 59.9 | 2,19 | 50.4 | 2.4 | 148.5 | 51.0 | | 100.3 | | 385.7 | 170.2 | 67.6 | 0.4 |
| G6-30 | B | B | 1015 | 19.0 | 7.2 | 82.7 | 3.7 | 40.0 | 0,45 | 49.3 | 2.4 | 129.9 | 39.9 | | 51.4 | | 364.9 | 145.7 | 55.7 | 0.3 |
| G6-5-1 | B | B | 1391 | 19.8 | 7.1 | 103.4 | 3.9 | 43.3 | 0,59 | 86.6 | 5.7 | 168.7 | 55.0 | | 79.1 | | 483.2 | 269.1 | 81.7 | 0.3 |
| H6-1-1 | B | B | 1025 | 18.5 | 7.3 | 94.6 | 5.1 | 54.6 | 1,40 | 51.2 | 3.1 | 130.0 | 40.4 | | 51.2 | | 377.4 | 152.3 | 59.8 | 0.3 |
| H6-17-1 | C(S) | B | 1011 | 17.8 | 7.6 | 99.3 | 9.4 | 98.4 | 0,37 | 50.7 | 2.1 | 128.7 | 40.3 | 0.2 | 50.2 | | 347.3 | 150.7 | 57.9 | 0.3 |
| IGME-2 | C(l) | 25 | 1161 | 18.1 | 7.4 | 116.8 | 2.2 | 22.3 | 5,35 | 62.5 | 7.4 | 128.1 | 54.8 | | 49.8 | 0.1 | 382.2 | 194.8 | 84.7 | 0.3 |
| IGME-3 | C(l) | 25 | 1190 | 19.4 | 7.7 | 145.1 | 1.6 | 17.7 | 3,40 | 86.5 | 8.4 | 107.8 | 57.0 | | 10.9 | 0.1 | 373.7 | 203.0 | 101.1 | 0.3 |
| Pz-Di | C(l) | 15 | 650 | 18.0 | 8.7 | -70.8 | 2.0 | 21.4 | 8,57 | 60.8 | 7.3 | 8.0 | 50.2 | 1.9 | 0.7 | | 243.8 | 35.7 | 72.4 | 0.1 |
| Pz-Di | C(l) | 30 | 1080 | 18.0 | 7.3 | 35.5 | 3.1 | 32.3 | 5,34 | 52.8 | 4.6 | 133.3 | 45.6 | | 58.4 | | 377.4 | 166.7 | 67.3 | 0.3 |
| MEDIA | | | 1005 | 18.9 | 7.5 | 82.9 | 5.2 | 56.3 | 0.0 | 54.8 | 3.8 | 117.8 | 43.7 | 1.0 | 47.7 | 0.1 | 357.4 | 148.6 | 63.6 | 0.3 |
| MAX | | | 1391 | 20.0 | 8.7 | 145.1 | 9.4 | 98.4 | 0.0 | 86.6 | 8.4 | 168.7 | 57.0 | 1.9 | 100.3 | 0.1 | 483.2 | 269.1 | 101.1 | 0.4 |
| MIN | | | 650 | 17.8 | 7.1 | -70.8 | 1.6 | 17.7 | 0.0 | 39.2 | 1.1 | 8.0 | 27.9 | 0.2 | 0.7 | 0.1 | 243.8 | 35.7 | 36.7 | 0.1 |

| PUNTO | Sector | CE (µS/cm) | T (°C) | pH | Eh (mV) | O ₂ mg/l | %O ₂ sat. | TOC (mg/l) | Na ⁺ (mg/l) | K ⁺ (mg/l) | Ca ²⁺ (mg/l) | Mg ²⁺ (mg/l) | NH ₄ ⁺ (mg/l) | NO ₃ ⁻ (mg/l) | NO ₂ ⁻ (mg/l) | HCO ₃ ⁻ (mg/l) | SO ₄ ²⁻ (mg/l) | Cl ⁻ (mg/l) | F ⁻ (mg/l) |
|--------------|--------|------------|--------|-----|---------|---------------------|----------------------|------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| VIÑUELA | A | 465 | 14.9 | 8.4 | 113.9 | 9.1 | 90.8 | 2.9 | 26.6 | 3.3 | 56.7 | 19.4 | | 4.3 | | 192.0 | 58.5 | 26.4 | 0.4 |
| RIO (H6-1-1) | B | 985 | 13.9 | 8.3 | 64.8 | 15.0 | 150.0 | 0,66 | 52.8 | 1.5 | 118.6 | 40.6 | | 49.2 | 0.2 | 316.4 | 149.0 | 57.6 | 0.3 |
| RIO (IGME-2) | C | 1010 | 13.4 | 7.8 | 133.2 | 11.6 | 125.0 | 1,61 | 60.7 | 2.6 | 111.8 | 43.1 | | 43.4 | 0.3 | 307.0 | 174.5 | 68.1 | 0.3 |

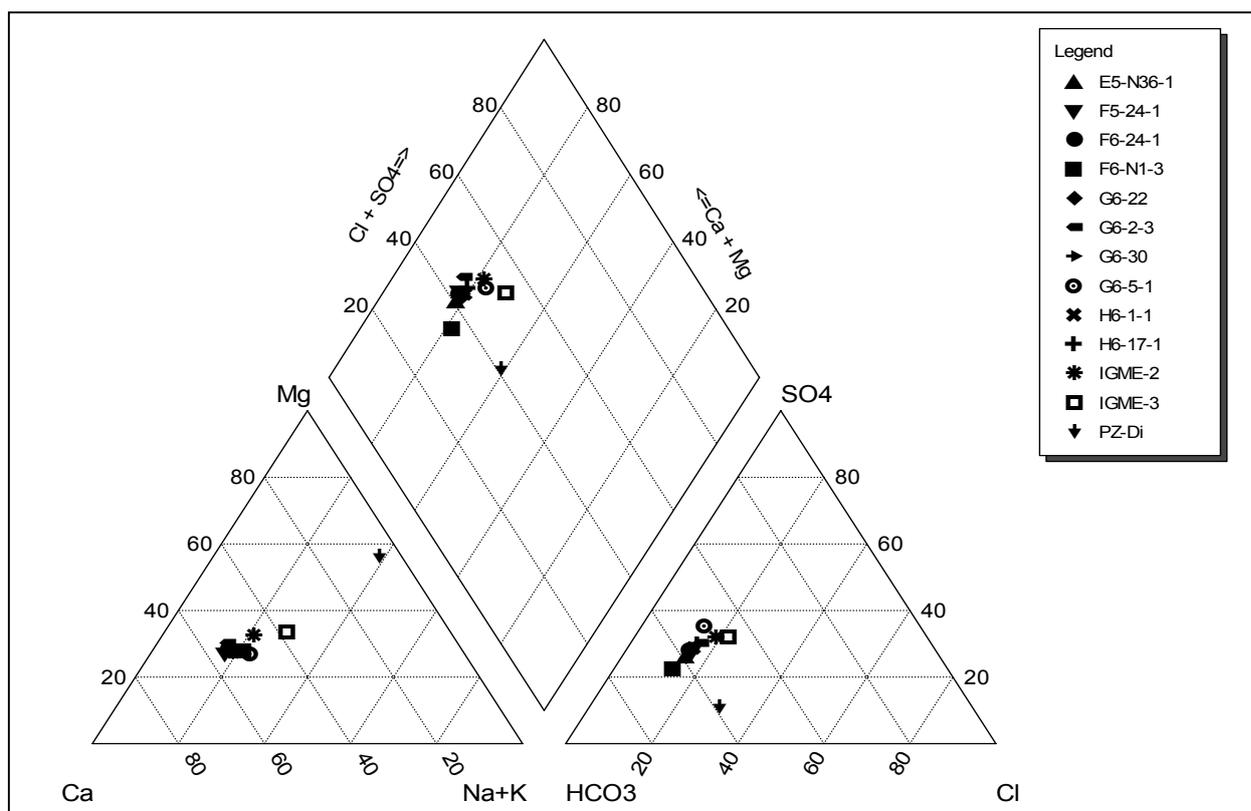
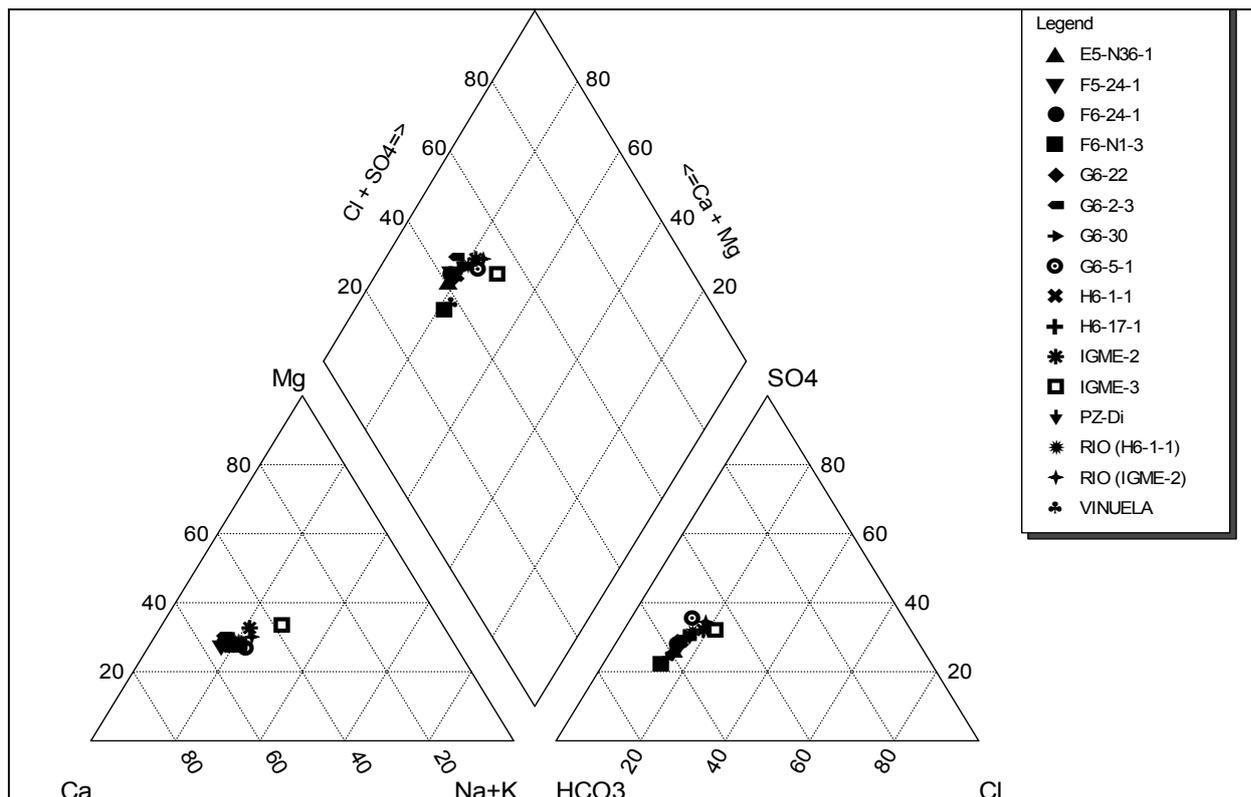


Figura 18.1. Diagramas hidroquímicos de Piper (marzo de 2007), con todos los puntos muestreados (arriba) e incluyendo sólo los correspondientes a aguas subterráneas (abajo).

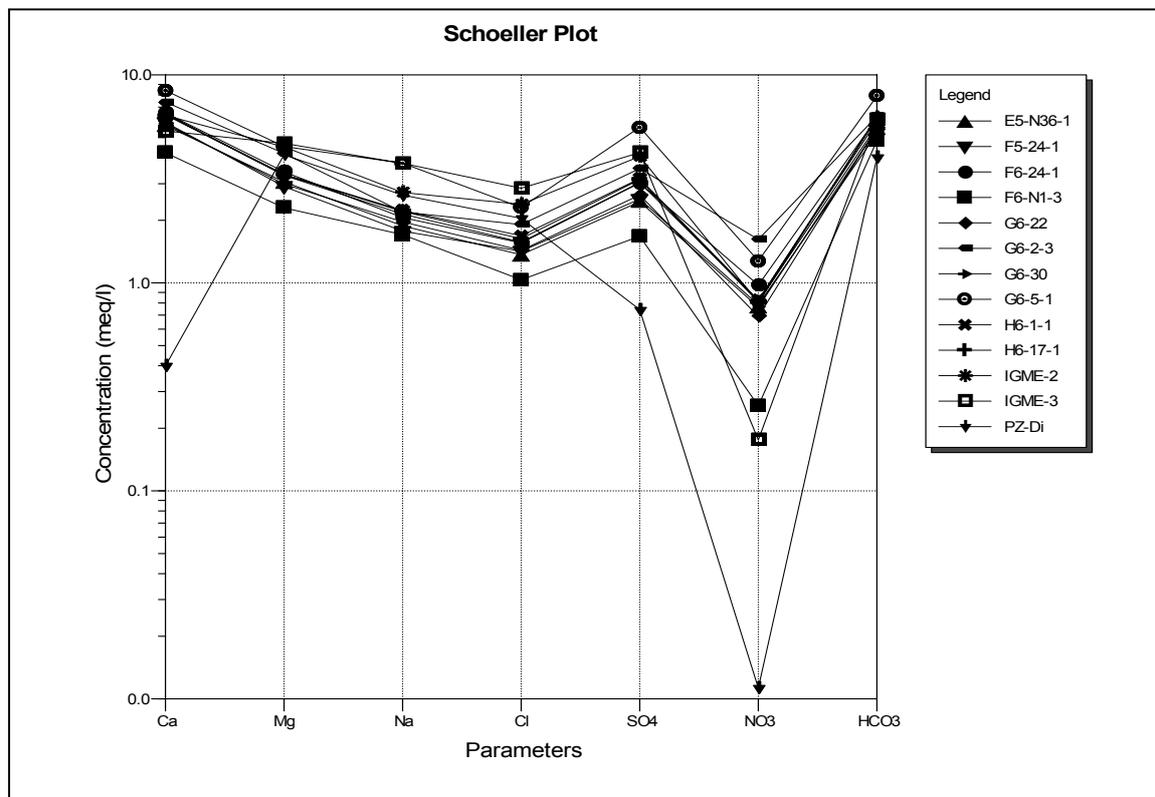
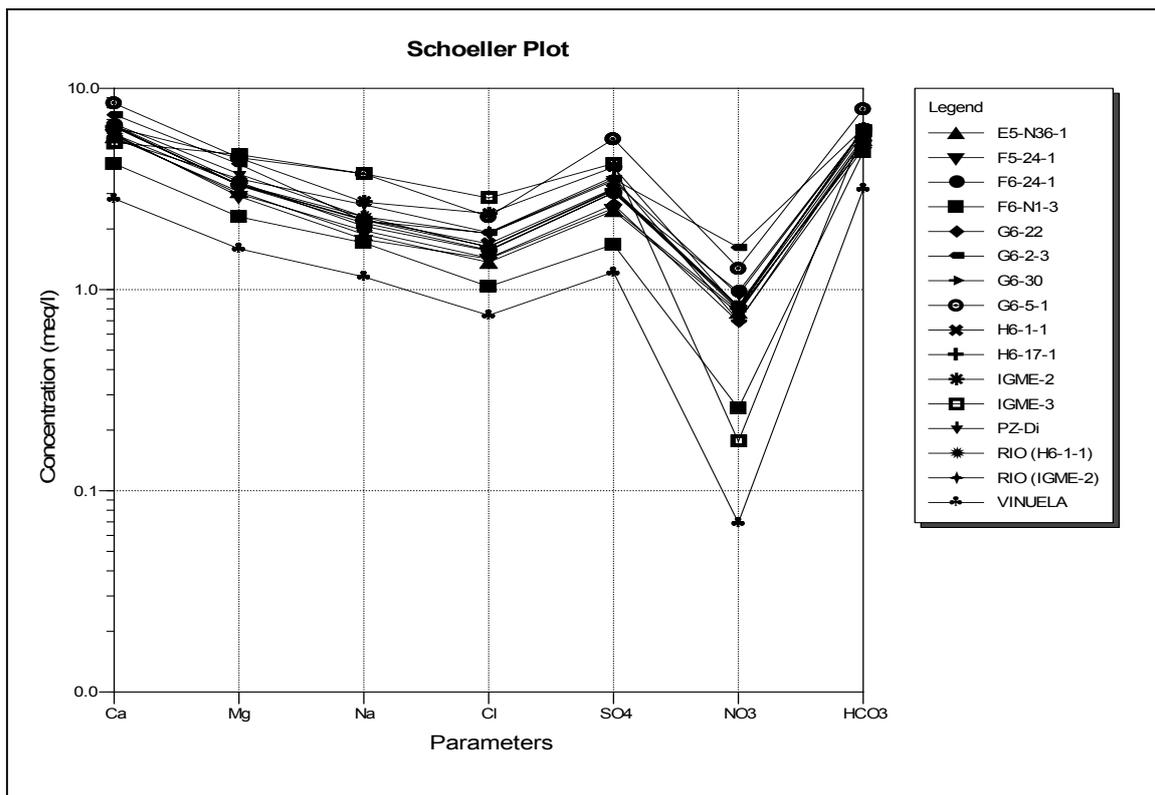


Figura 18.2. Diagramas hidroquímicos de Shoeller (marzo de 2007), con todos los puntos muestreados (arriba) e incluyendo sólo los correspondientes a aguas subterráneas (abajo).

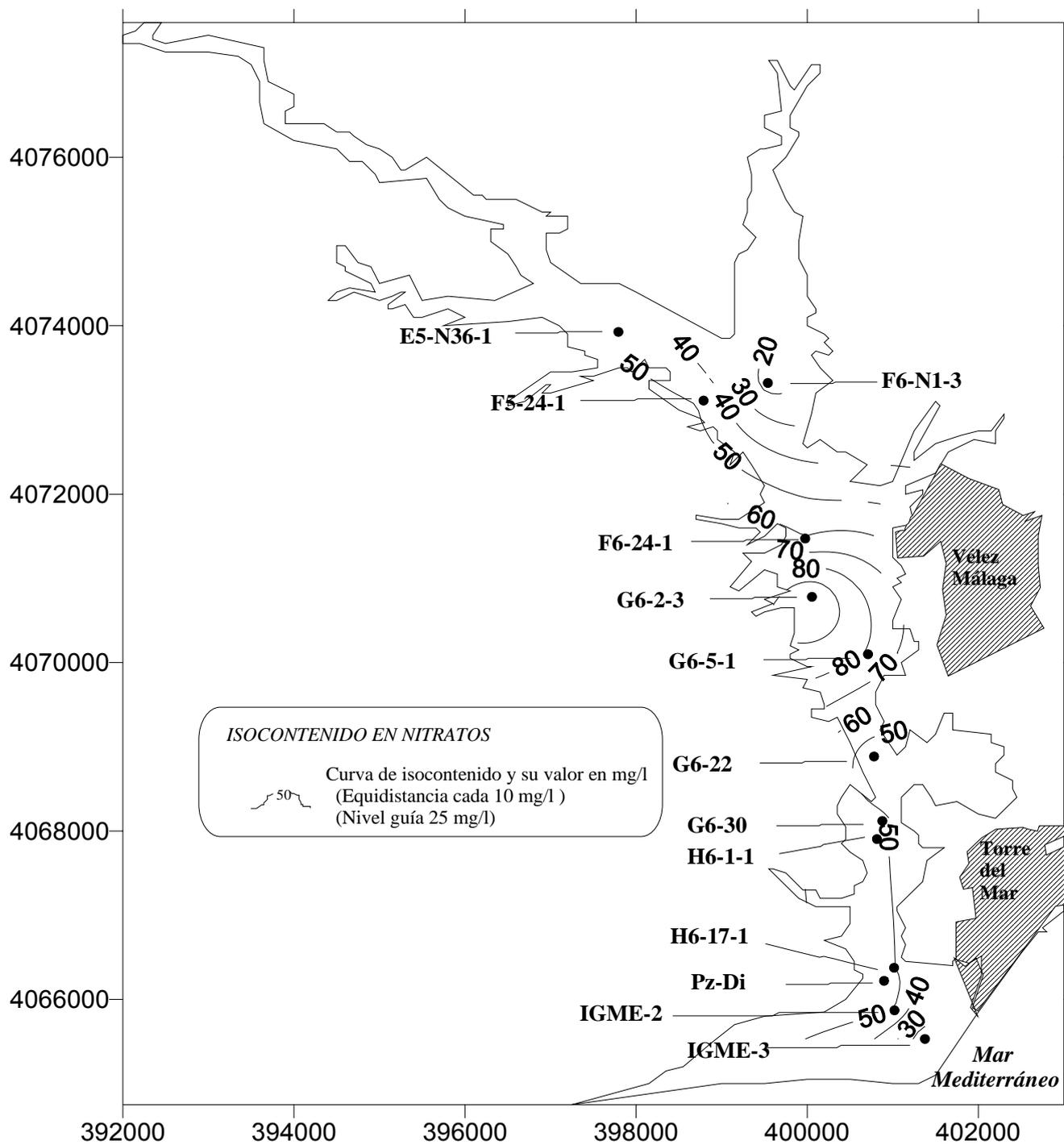


Figura 18.3. Mapa de isocontenidos en nitratos en las aguas subterráneas en marzo de 2007.

19. ESTADO ACTUAL DE LA INTRUSIÓN EN EL ACUÍFERO

Durante algunos años de las décadas de los ochenta y noventa del pasado siglo la concentración de bombeos en el sector costero ha provocado la salinización de numerosas captaciones debido al progreso de la intrusión marina. Este fenómeno consiste básicamente en la alteración del régimen de flujo subterráneo en áreas costeras inducido por una distribución espacial incorrecta o por un régimen de bombeo inadecuado de las captaciones, de tal manera que se modifica la posición de la zona de transición agua de mar-agua dulce que provoca una entrada de agua salada o salobre hacia sectores más interiores del acuífero.

En el acuífero superior, debido a su reducido espesor, los registros verticales de conductividad eléctrica efectuados con ocasión de estudios hidrogeológicos previos no han evidenciado la existencia de agua salada. Las aguas de este tramo han presentado salinidades moderadas (entre 2 y 3 g/l), si bien en la margen derecha, durante el periodo 1993-1995, se registraron mayores salinidades (5-6 g/l) probablemente relacionadas con el bombeo en una zona más permeable (gravas).

En el acuífero profundo, las testificaciones de conductividad realizadas entre finales de los años ochenta y mediados de los noventa permitieron observar claramente la zona de transición agua dulce-agua salada. El punto que ha permitido un seguimiento más fiable a este respecto es el piezómetro IGME-2, de 42 m de profundidad, situado en la margen derecha del cauce del río Vélez a unos 700 m de la desembocadura (figura 19.1). Aquí se registraron en 1993 y 1994 valores de 4 mS/cm en la parte superior de la columna, con incremento progresivo con la profundidad hasta valores típicamente marinos (algo superiores a 40 mS/cm) a 35-40 m. Las importantes precipitaciones que tuvieron lugar a principios de 1996 provocaron –como consecuencia de los desembalses en La Viñuela y la reducción de los bombeos- una significativa mejora de la calidad del agua y un proceso de extrusión marina: desde 4 mS/cm en la parte superior de la columna hasta 20 mS/cm a 40 m. Esta disminución de la salinidad continuó progresando y los registros realizados en marzo de 1997 mostraron valores de conductividad inferiores a 2000 μ S/cm en toda la columna. Esta situación de extrusión marina y recuperación de la calidad de las aguas del acuífero inferior se mantiene

actualmente y es verosímilmente el resultado de la reducción de la explotación. Así, las medidas efectuadas en este punto a mediados de marzo de 2007 han puesto de manifiesto una notable homogeneidad en los valores de conductividad registrados a lo largo de toda la columna: entre 1040 y 1235 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Lo mismo se ha evidenciado en el piezómetro IGME-3, de 50 m de profundidad, situado en la margen izquierda del cauce del río Vélez a unos 400 m de la desembocadura, donde en las fechas antes mencionadas se han registrado valores igualmente homogéneos: entre 897 y 1237 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

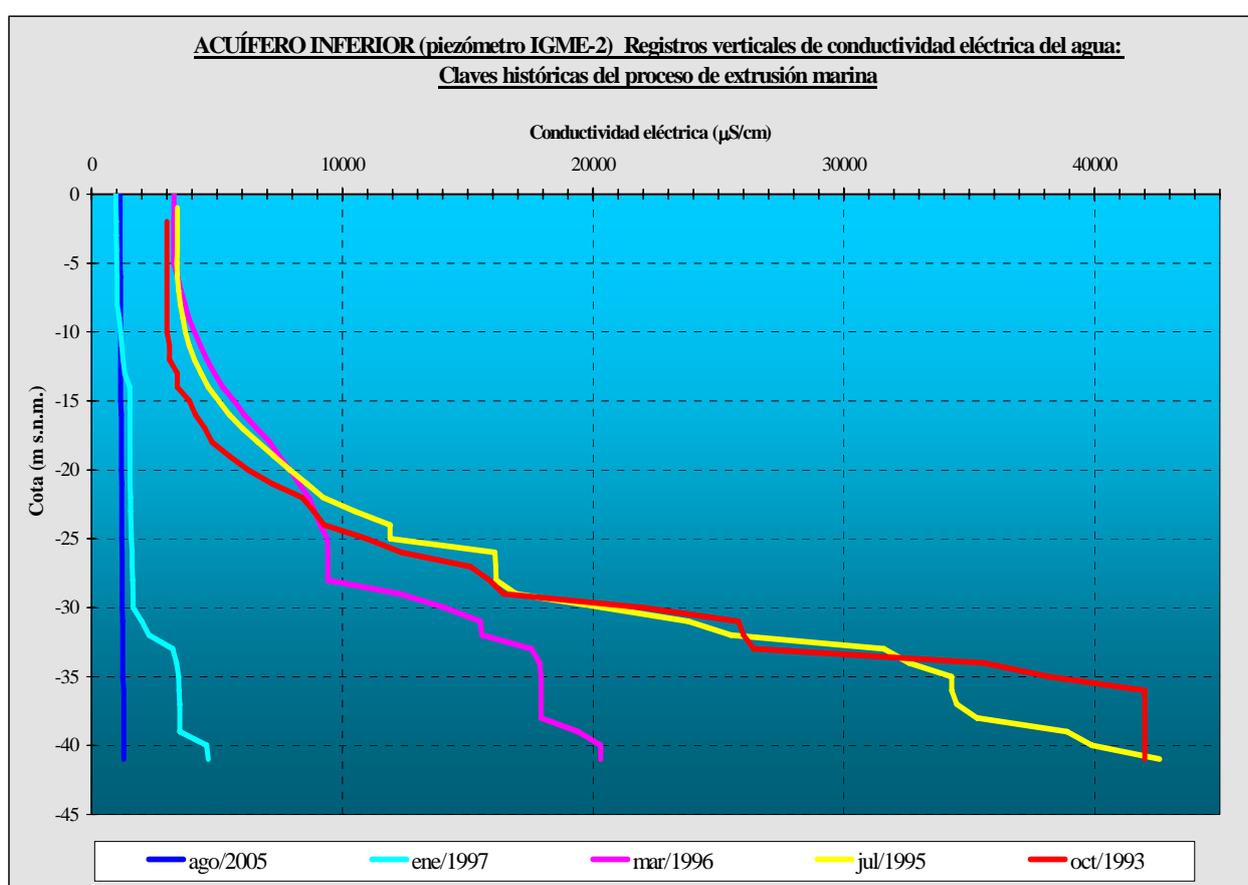


Figura 19.1. Registros verticales de conductividad eléctrica en el piezómetro IGME-2.

Los valores medios de conductividad a mediados de marzo de 2007 obtenidos en los piezómetros IGME-2 e IGME-3 son de aproximadamente 1150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tablas 19.1 y 19.2).

Tabla 19.1. Registros de conductividad y temperatura en el piezómetro IGME-2.

| IGME 2 | | | | |
|------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | 22-03-2007 | | 30-06-2007 | |
| Prof. (m) | C.E. (µs/cm) | T (°C) | C.E. (µs/cm) | T (°C) |
| 2.5 | 1040 | 18 | | |
| 5 | 1054 | 18.5 | 1058 | 19.5 |
| 7.5 | 1063 | 18.9 | | |
| 10 | 1066 | 19.3 | 1080 | 19.3 |
| 12.5 | 1114 | 19.4 | | |
| 15 | 1159 | 19.2 | 1145 | 19.2 |
| 17.5 | 1172 | 19.1 | | |
| 20 | 1180 | 19.1 | 1175 | 19.2 |
| 22.5 | 1184 | 19.1 | | |
| 25 | 1197 | 19.1 | 1183 | 19 |
| 27.5 | 1190 | 19 | | |
| 30 | 1189 | 19.1 | 1176 | 19 |
| 32.5 | 1189 | 19.1 | | |
| 35 | 1189 | 19 | 1178 | 19 |
| 37.5 | 1208 | 18.9 | | |
| 40 | 1234 | 18.9 | 1225 | 18.3 |
| 42.5 | 1235 | 18.8 | | |
| 45 | 1235 | 19 | 1225 | 18.9 |
| MEDIA | 1161 | 19.0 | 1167 | 19 |
| MAX | 1235 | 19.4 | 1225 | 19.5 |
| MIN | 1040 | 18.0 | 1058 | 18.3 |

Tabla 19.2. Registros de conductividad y temperatura en el piezómetro IGME-3.

| | 22-03-2007 | | 30-06-2007 | |
|------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
| | IGME 3 | | IGME 3 | |
| Prof. (m) | C.E. (µs/cm) | T (°C) | C.E. (µs/cm) | T (°C) |
| 2.5 | 897 | 16.3 | | |
| 5 | 901 | 17.4 | 895 | 20 |
| 7.5 | 903 | 18.7 | | |
| 10 | 903 | 19.4 | 903 | 19.8 |
| 12.5 | 1228 | 19.8 | | |
| 15 | 1229 | 19.6 | 1226 | 19.5 |
| 17.5 | 1229 | 19.4 | | |
| 20 | 1229 | 19.3 | 1229 | 19.3 |
| 22.5 | 1229 | 19.3 | | |
| 25 | 1229 | 19.2 | 1230 | 19.1 |
| 27.5 | 1230 | 19.1 | | |
| 30 | 1230 | 19.1 | 1230 | 19.1 |
| 32.5 | 1229 | 19 | | |
| 35 | 1229 | 19.1 | 1238 | 19.1 |
| 37.5 | 1237 | 19 | | |
| 40 | 1237 | 19 | 1238 | 19.1 |
| 42.5 | 1237 | 18.9 | | |
| 45 | 1236 | 19 | 1237 | 19 |
| 47.5 | 1236 | 18.9 | | |
| 50 | 1237 | 18.9 | 1238 | 19 |
| MEDIA | 1169 | 18.9 | 1166 | 19.3 |
| MAX | 1237 | 19.8 | 1238 | 20 |
| MIN | 897 | 16.3 | 895 | 19 |

En dos secciones del río Vélez (una a la altura de la autovía y otra frente al punto IGME-2) se han medido en esas fechas valores de 985 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de 1010 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Se trataba exclusivamente de caudal (entre 50 y 150 L/s) procedente de descarga subterránea, según se ha dicho anteriormente, pues aguas arriba de Vélez-Málaga el cauce permanecía en seco.

También se ha medido la conductividad del agua bombeada en una decena de captaciones a lo largo del acuífero, en su mayoría utilizadas para riego. Se han obtenido valores entre 707 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1391 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (570 mg/L y 1110 mg/L). El agua de La Viñuela utilizada para riego tenía conductividad de 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores más bajos de conductividad en las aguas bombeadas, inferiores a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se registran en el sector de confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa. La conductividad aumenta aguas abajo hasta valores de alrededor de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el tramo entre la autovía y la antigua carretera N-340, es decir, parecidos a los del agua circulante por el cauce en ese tramo. Luego se incrementa ligeramente en el tramo final, hasta el borde costero, según se ha comentado en el caso de los piezómetros IGME 2 y 3. En algún piezómetro de este sector que, como los dos antes citados, capta el acuífero inferior, se han medido valores de conductividad anormalmente bajos (650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el Pz-Di), cuyas causas han sido antes apuntadas.

En la figura 19.2 se representa la variación espacial de la conductividad a lo largo del acuífero. El que el valor más alto de conductividad (unos 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) se haya medido en un punto de la vega en las inmediaciones de Vélez-Málaga debe responder a efectos locales de recirculación de aguas bombeadas.

En la tabla 19.3 se comparan valores de conductividad medidos "in situ" en los mismos puntos en dos fechas diferentes: finales de marzo y finales de junio de 2007. Se constata que la tendencia general es hacia un aumento pequeño de salinidad, en correspondencia con la bajada general de nivel en el acuífero que, como ya se ha visto, caracteriza a ese intervalo de tiempo.

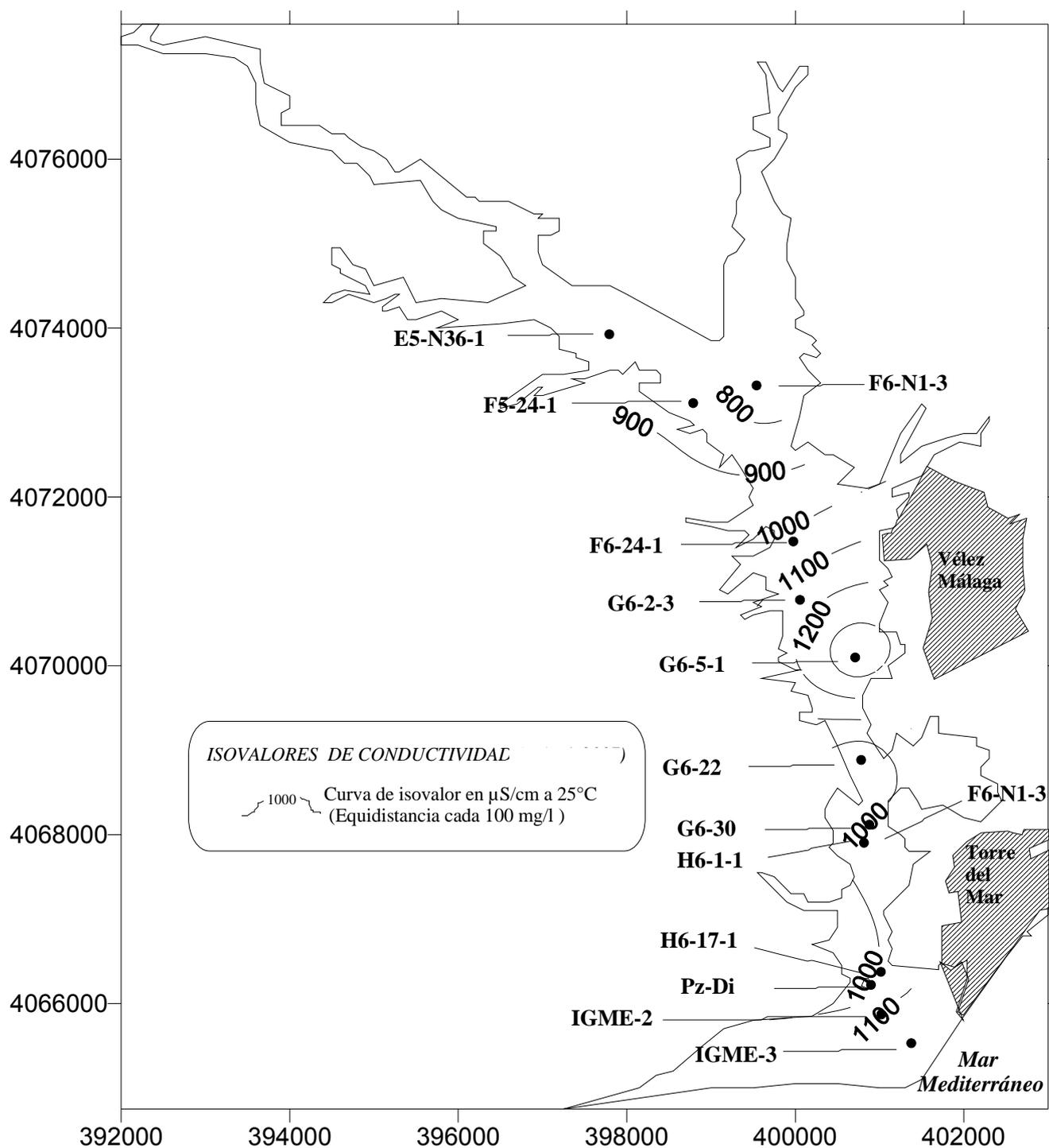


Figura 19.2. Mapa de isovalores de conductividad del acuífero (marzo de 2007).

Tabla 19.3. Medidas de conductividad eléctrica en marzo y junio de 2007 y diferencias.

| PUNTO | SECTOR | 23/03/2007 | | 30/06/2007 | | DIFERENCIAS C.E. 23/03-30/06 |
|--------------|--------|--------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| | | Prof. (m) | C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Prof. (m) | C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | |
| F6-24-1 | B | B | 1021 | 8 | 1040 | -19 |
| G6-22 | B | B | 912 | 7 | 1033 | -121 |
| H6-1-1 | B | B | 1025 | 7 | 1086 | -61 |
| RIO (H6-1-1) | B | | 985 | | 1031 | -46 |
| IGME-2 | C(l) | 25 | 1161 | 25 | 1167.1 | -6.1 |
| IGME-3 | C(l) | 25 | 1169 | 25 | 1166.4 | 2.6 |
| Pz Di | C(l) | 15 | 650 | 5 | 656 | -6 |
| H6-17-1 | C(S) | B | 1011 | 5 | 1192 | -181 |

Por último, el 16 de julio de 2007 se realizó un perfil geoelectrico (tomografía eléctrica) de unos 450 m de longitud, paralelo al cauce del río Vélez en el sector próximo a su desembocadura, aunque desplazado unos 50-100 m hacia su margen izquierda. El extremo sur del perfil se localiza a unos 100 m del mar. En la figura 19.3 se presenta el resultado. Se advierte, entre otros aspectos, la presencia de una lengua de resistividad baja correspondiente a agua salada dentro del acuífero. Su espesor es de unos 20 m (entre 10 y 30 m bajo el nivel del mar) y su máxima penetración tierra adentro desde el mar en el perfil es de aproximadamente 200 m.

A la vista de todos los resultados anteriores debe destacarse la ausencia de indicios significativos de salinización por intrusión marina en las fechas del muestreo.

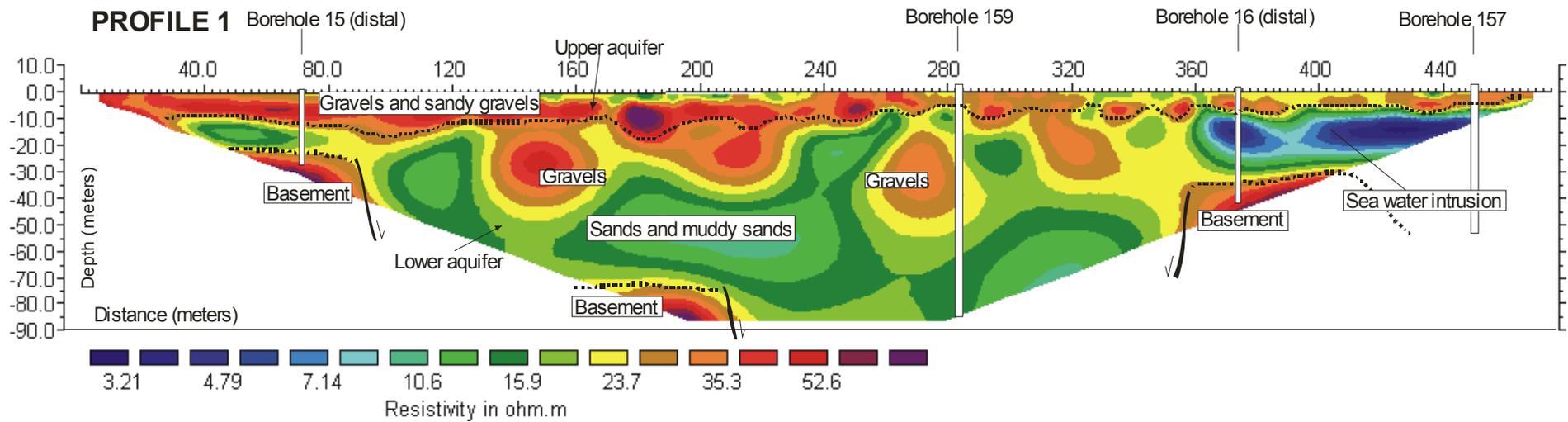


Figura 19.3. Perfil geoelectrico paralelo al río en delta (julio de 2007).

20. CONSIDERACIONES SOBRE EL NIVEL DE EXPLOTACIÓN PLANTEADO

20.1. Balances generales del acuífero y datos experimentales previos

El funcionamiento del acuífero puede explicarse por un balance de entradas y salidas. En condiciones medias, se establece en el “Atlas Hidrogeológico de Andalucía” (JA-ITGE,1988) que los recursos del acuífero son 33 hm³/año, de los que la mayor parte (28 hm³/año, es decir, el 85 % del total de la recarga) corresponden a la alimentación procedente de aguas superficiales: ríos Vélez y Benamargosa. El que la recarga del acuífero dependa mayoritariamente de los caudales fluyentes por los cauces principales motiva que la gestión de los desembalses de la presa de la Viñuela tiene una importancia capital en el funcionamiento del acuífero.

Según la fuente citada, las salidas se producen por bombeo: 27-43 hm³/año (y se especifica que “con tendencia a aumentar”). Estas cifras implican, en ocasiones, un desequilibrio deficitario que se compensa con la entrada de agua del mar (intrusión marina).

En las circunstancias actuales, aunque se carece de estimaciones al respecto, es razonable suponer que la magnitud de los recursos medios del acuífero puede verse disminuida respecto a la cifra anterior, debido al efecto derivado de la modulación inducida por el funcionamiento de La Viñuela en el régimen de caudales del río Vélez.

En cuanto a las salidas del acuífero en las condiciones actuales, no hay datos directos sobre su nivel de explotación, aunque se considera que se produce casi exclusivamente con fines de regadío en la margen derecha, junto con caudales procedentes de La Viñuela. A partir de la superficie ocupada por riegos, de la dotación estimada para éstos y admitiendo que la mitad del agua aplicada procede del acuífero, se obtiene un valor de aproximadamente 16 hm³/año de bombeo actual, que, aunque tentativo, es inferior al rango de cifras antes apuntadas. Esta circunstancia de menor grado de explotación puede verse apoyada por el hecho de que, en los últimos años, los niveles piezométricos experimentan menos descensos

en su ciclo anual que en años precedentes. A nivel de balance en condiciones de año medio, la consecuencia de esa cifra de explotación sería el carácter excedentario del acuífero ($\leq 17 \text{ hm}^3/\text{año}$). Esta circunstancia se manifestaría, por un lado, en la descarga de caudales subterráneos ($\approx 3-6 \text{ hm}^3/\text{año}$?) al propio cauce del río Vélez a poca distancia de su desembocadura. El resto ($\approx 11-14 \text{ hm}^3/\text{año}$?) sería descarga subterránea al mar en sentido estricto. Esta circunstancia de descarga significativa hacia el mar se puede apoyar en los datos piezométricos y físico-químicos del sector deltáico del acuífero en los años recientes.

Con los datos de recarga del acuífero en condiciones de año medio ($33 \text{ hm}^3/\text{año}$, según JA-ITGE, 1988) y de salidas por bombeo que se estiman para la situación actual ($16 \text{ hm}^3/\text{año}$, pendiente de verificación), la explotación planteada de $6,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ no modifica el carácter excedentario del acuífero en las condiciones citadas. Además, el escenario previsto para la mencionada explotación (riegos en la margen derecha) conlleva el que las captaciones reducirán sensiblemente, cuando no de manera total, su régimen de extracciones. Ello conduciría a un balance hídrico netamente excedentario, en el que las salidas subterráneas hacia el cauce del río en su tramo final y las producidas directamente hacia el mar serían superiores a las actuales.

En cualquier caso, resulta básico un estudio hidrogeológico detallado deseablemente apoyado por un modelo de flujo en régimen transitorio, herramienta de la que nunca se ha dispuesto en el acuífero- que permita evaluar el balance en las condiciones actuales, no sólo a nivel anual sino mensual. Esta herramienta permitiría, entre otros aspectos, cuantificar las citadas salidas subterráneas y los descensos piezométricos producidos por los bombeos, así como prever la evolución de niveles y caudales en distintas condiciones hidrometeorológicas, particularmente las adversas (periodos de sequía). Si el modelo planteado se extiende al transporte de solutos, lo cual es recomendable, las predicciones pueden extenderse a las variaciones espacio-temporales de la zona de mezcla agua dulce-agua marina y su incidencia en las captaciones.

En relación con lo anterior, conviene apuntar que –en climas mediterráneos como el que caracteriza el área- la representatividad de un balance hídrico en

condiciones medias puede ser cuestionable. Así, por ejemplo, García Arostegui (1997) encuentra que las entradas al acuífero en un año excepcionalmente lluvioso (1996/97) son muy superiores a las de un año que culminó una importante sequía (1994/95). En ese año lluvioso, además, la explotación por bombeo fue muy inferior a la media (unos 6 hm³/año), por lo que ese año el balance resultó en un desequilibrio excedentario en el que, como consecuencia, el almacenamiento del acuífero se incrementó en unos 40 hm³.

El mismo autor citado cuantificó en 16 hm³ las extracciones del acuífero en un periodo de cuatro meses de gran sequía (junio a septiembre de 1995), en el que no hubo caudales disponibles procedentes de La Viñuela. Esto supone una tasa de extracción de 4 hm³/mes. Si se considera nula la recarga en ese periodo, lo que parece bastante lógico, y se admite un valor del coeficiente de almacenamiento general de 0,2, entonces se obtiene un descenso a lo largo de toda la extensión del acuífero de unos 4 m. El registro disponible en el piezómetro P6-2, el más cercano a las perforaciones de AcuaMed, indica para ese periodo un descenso de 8,2 m, lo que corrobora la estimación anterior, puesto que a medida que se consideran sectores del acuífero más próximos al borde costero los descensos piezométricos generalizados tienden a ser nulos, de lo que se desprende un valor promedio semejante al de los 4 m indicado.

También hay información de extracciones en el periodo de agosto y septiembre de 1996: 3,8 hm³. Entonces el descenso en el P6-2 fue de 1,5 m. Este ritmo de extracción es superior al previsto de 6,5 hm³/año, incluso concentrando los bombeos en el periodo de seis meses de menor pluviosidad.

20.2. Modelización del ámbito de explotación

Se ha modelizado, mediante el programa Processing Modflow (para Windows), versión 5.3.0 de Chiang y Kinzelbach (1991-2001), una porción del acuífero de 8 km² de superficie, de planta rectangular con lados de 2 y 4 km (figura 20.1). De esa superficie, 5 km² corresponden a materiales aluviales acuíferos, aproximadamente la cuarta parte de su extensión total. No obstante, por sus características y situación, la parte modelizada del acuífero debe recibir una recarga relativamente más importante en relación con su superficie que las restantes.

La zona modelizada se ha seleccionado con el criterio de incluir las perforaciones de acuaMed y su entorno inmediato, así como otros posibles puntos de bombeo situados al noreste de tales perforaciones (sector del Molino de Las Monjas) o al sur de las mismas (vega de Vélez-Málaga). Además de los aluviones incluye materiales de los bordes y del sustrato del acuífero: 1,5 km² de esquistos impermeables y 1,5 km² de materiales pliocenos arcillo-arenosos, de permeabilidad baja a media (figura 20.1).

La malla del modelo tiene 40 columnas y 80 filas, con un tamaño de celda de 50m·50 m, con la excepción del sector de las perforaciones donde la malla se ha refinado y tiene un tamaño menor (figura 20.2). Sólo se ha considerado una capa acuífera, de carácter freático, sin anisotropía. Las cotas de techo y muro de acuífero introducidas en el modelo se han estimado a partir de un mapa de isoespesores de la tesis doctoral de García-Aróstegui (1998).

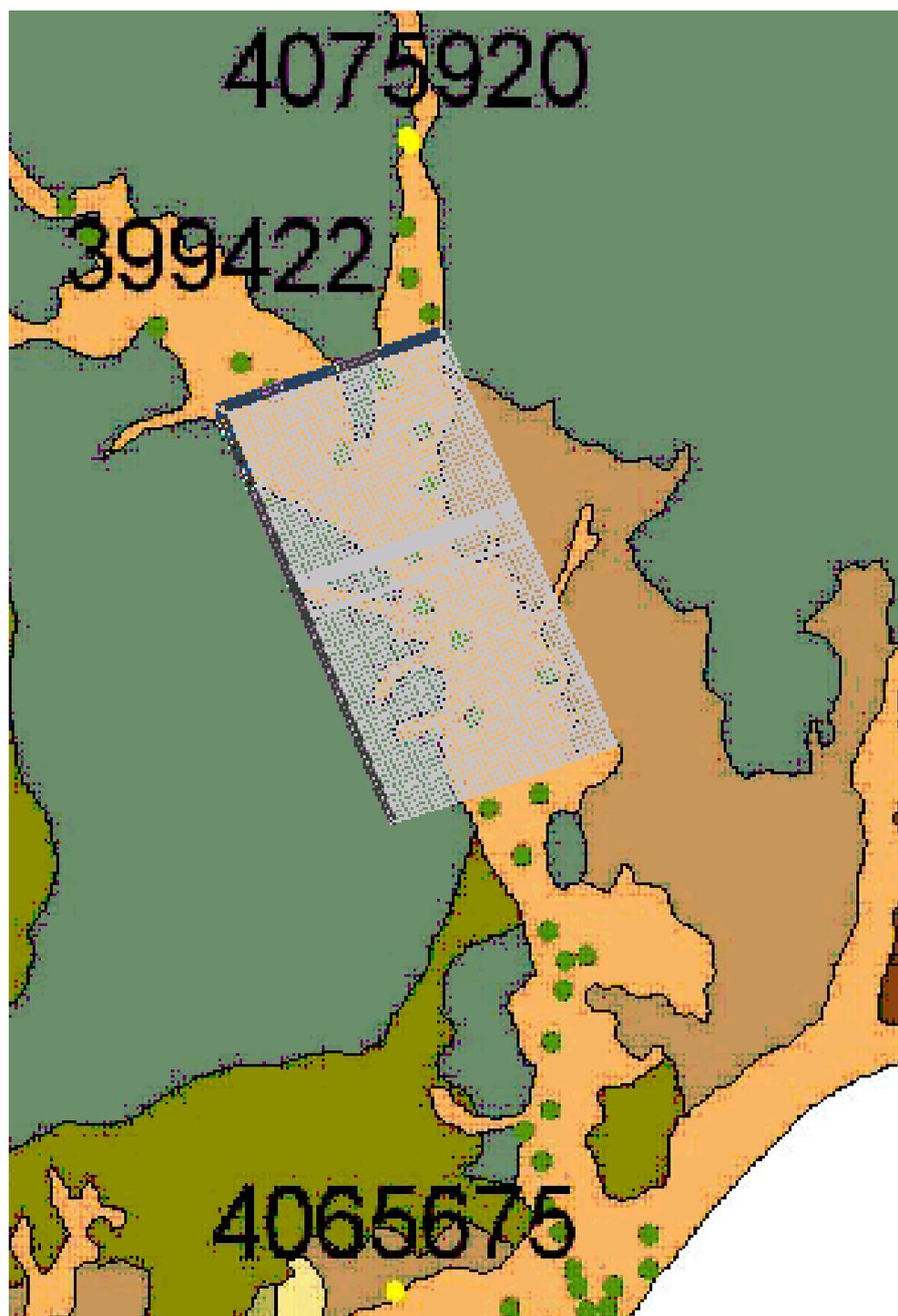


Figura 20.1. Situación del sector modelizado en el contexto geológico del área de estudio. Naranja: Cuaternario. Marrón: Plioceno. Verde y azul: esquistos y pizarras de la Zona Bética.

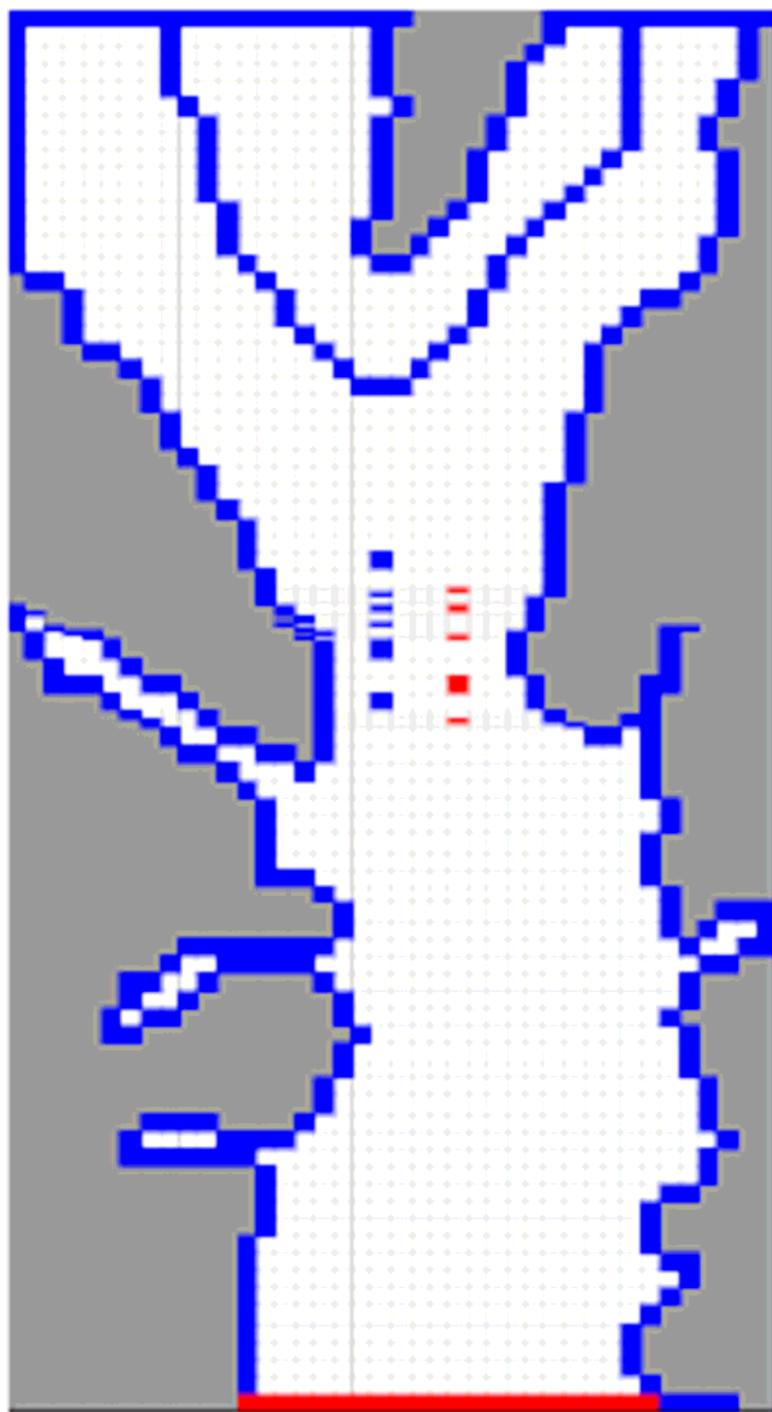


Figura 20.2. Esquema de la malla utilizada en el modelo. Las celdas rojas en el interior del sector modelizado representan captaciones en el enclave donde se localizan los sondeos de AcuaMed. Las celdas azules representan diferentes tipos de recarga localizada.

Como elementos del balance hídrico del acuífero del río Vélez en el sector modelizado, en condiciones medias anuales y régimen permanente, se han considerado los siguientes:

E) Entradas:

E1). Recarga general. Afecta a todas las celdas del acuífero y se calcula a partir de la superficie modelizada de éste (5 km²):

- E1a) Precipitación efectiva (P-ET) .La precipitación efectiva considerada es de 80 mm: 500 mm (P) – 420 mm (ET).
- E1b) Retorno de riegos. El retorno de riegos se considera del 10 % respecto de una dotación de 6000 m³/ha·año.

E2). Recarga localizada. Se introduce como caudales inyectados en determinadas celdas:

- E2a) Percolación de la escorrentía superficial “permanente” (ríos Vélez y Benamargosa). Se aplica a dos filas de celdas coincidentes con los ejes de ambos cauces, aguas arriba de las perforaciones. Aunque no existen datos directos al respecto procedentes de aforos diferenciales, se considera, basándose en la información disponible y en observaciones propias, que puede producirse una percolación del 50 % respecto a caudales medios de 100 L/s en cada curso en el tramo modelizado.
- E2b) Percolación de la escorrentía superficial esporádica (laderas esquistasas impermeables, con un área de influencia en el sector modelizado de 28 km²). Se aplica a las celdas situadas en los bordes del acuífero que contactan con los esquistos. Se considera que el 75 % de la precipitación efectiva (80 mm) se infiltra, mientras que el 25 % restante continua su flujo superficial hacia sectores situados aguas abajo.
- E2c) Flujo subterráneo del borde oriental (alrededores de Vélez-Málaga). Se aplica a las celdas del contacto Plioceno-Aluvial. Se estima, por consideraciones hidrodinámicas, que puede totalizar un valor aproximado de 50 L/s.
- E2d) Percolación ARUs de Benamocarra. Se aplica a una línea de celdas situadas enfrente del sector de perforaciones. Se admite que la infiltración es del

80 % respecto del caudal generado por una población de 3000 habitantes con una dotación de 200 L/hab·día.

- E2e) Flujo subterráneo procedente de la prolongación septentrional de los aluviales de los ríos Vélez y Benamargosa. Se aplica a las celdas del borde N de los materiales acuíferos. Se obtiene por aplicación de la ley de Darcy a partir de secciones saturadas (10500 m^2 y 2500 m^2), gradientes piezométricos (0,05 y 0,007) y valores de K (200 m/d y 240 m/d) obtenidos en antecedentes. Resultan caudales respectivos de aproximadamente 240 y 50 L/s.

La consideración conjunta de todos estos elementos de recarga conduce a unos recursos medios del área modelizada de $10,5 \text{ hm}^3/\text{año}$. Esta cifra es coherente con la expuesta en el apartado anterior de $33 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el total del acuífero, en tanto que el área modelizada, según se ha expuesto, puede considerarse como de recarga relativamente más elevada.

S1) Salidas (opción 1):

Se supone que se producen exclusivamente por flujo subterráneo a lo largo del límite meridional del modelo (aluvial). No se consideran extracciones por bombeo, por desconocerse con su magnitud y ubicación. De hecho, se ha considerado conveniente no tener en cuenta este componente del balance en una primera instancia, pues así el resultado suministrado por el modelo correspondería a una situación prácticamente de régimen natural.

En la figura 20.3 se representa el resultado en forma de curvas isopiezas. Puede comprobarse que el área modelizada se encuentra aproximadamente entre las isopiezas de 32 m y de 14 m, mientras que en el sector central de las perforaciones la cota piezométrica es de 27 m. Si se compara con los mapas de isopiezas de la figura 4.2, se comprueba que el resultado del modelo es intermedio entre ambas figuras, aunque se acerca más a la situación de enero de 1997. La razón seguramente reside en no haber considerado ninguna extracción, circunstancia que se matizará a continuación. En cualquier caso, la figura 20.3 puede dar idea de la distribución piezométrica promedio del sector estudiado de acuífero a lo largo de un año de recarga media-alta, si se llegase a producir la eliminación prácticamente total de los bombeos.

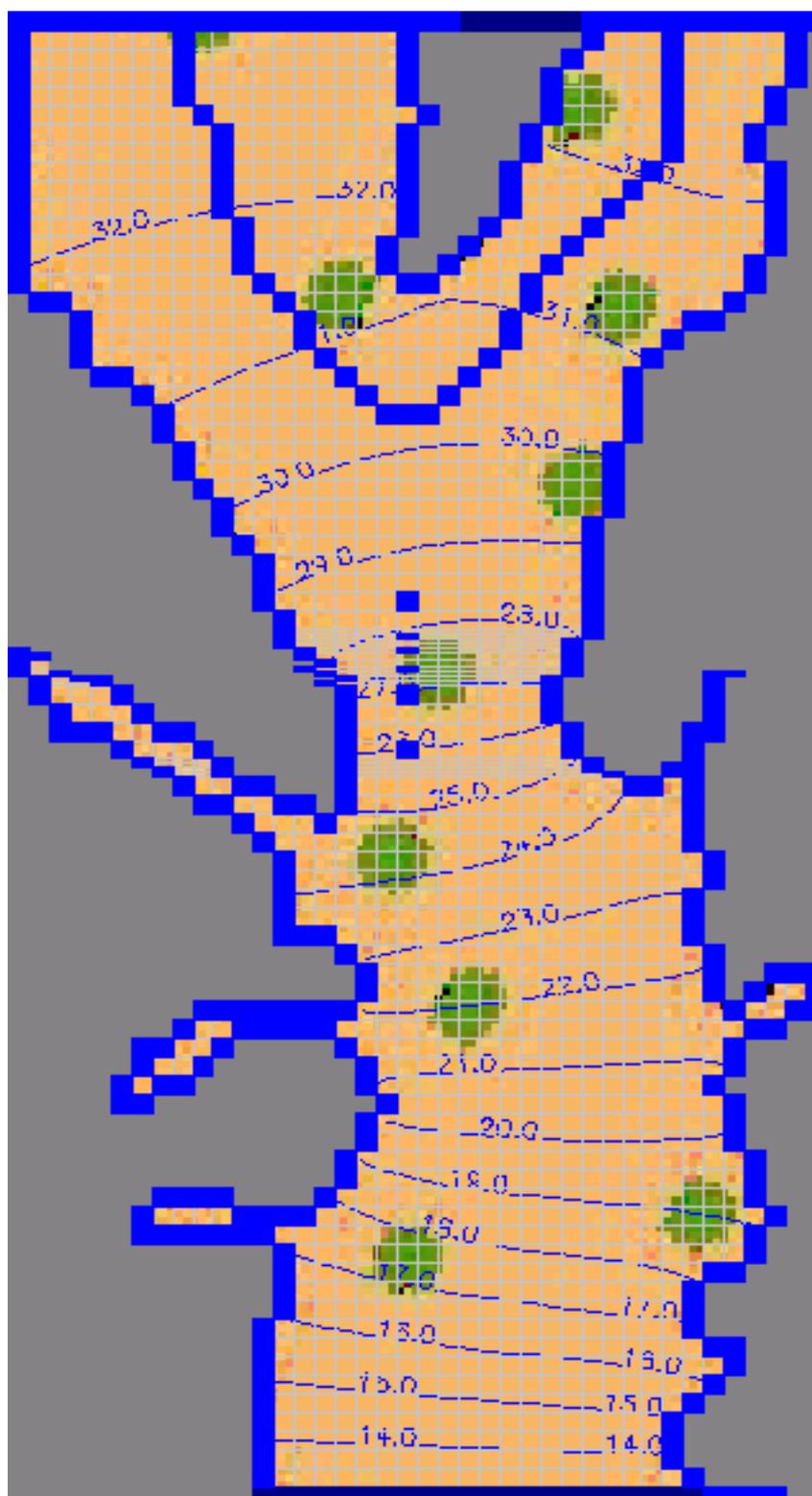


Figura 20.3. Mapa de isopiezas (valores en m s.n.m.) del acuífero en el sector modelizado, correspondiente a una situación media sin extracciones.

S2) Salidas (opción 2).

Se considera aquí el bombeo de 200 L/s (unos 6,5 hm³/año) en cinco captaciones que siguen una línea en coincidencia aproximada con la de las perforaciones de AcuaMed.

La distribución de isopiezas que proporciona el modelo se representa en la figura 20.4. Respecto de la situación sin extracciones se aprecian, lógicamente, cotas piezométricas generalizadas inferiores. A este respecto es más ilustrativo considerar las líneas de isodescensos (figura 20.5). Se aprecia aquí que los descensos producidos en el entorno de las perforaciones representadas son de 7 a 8 m.

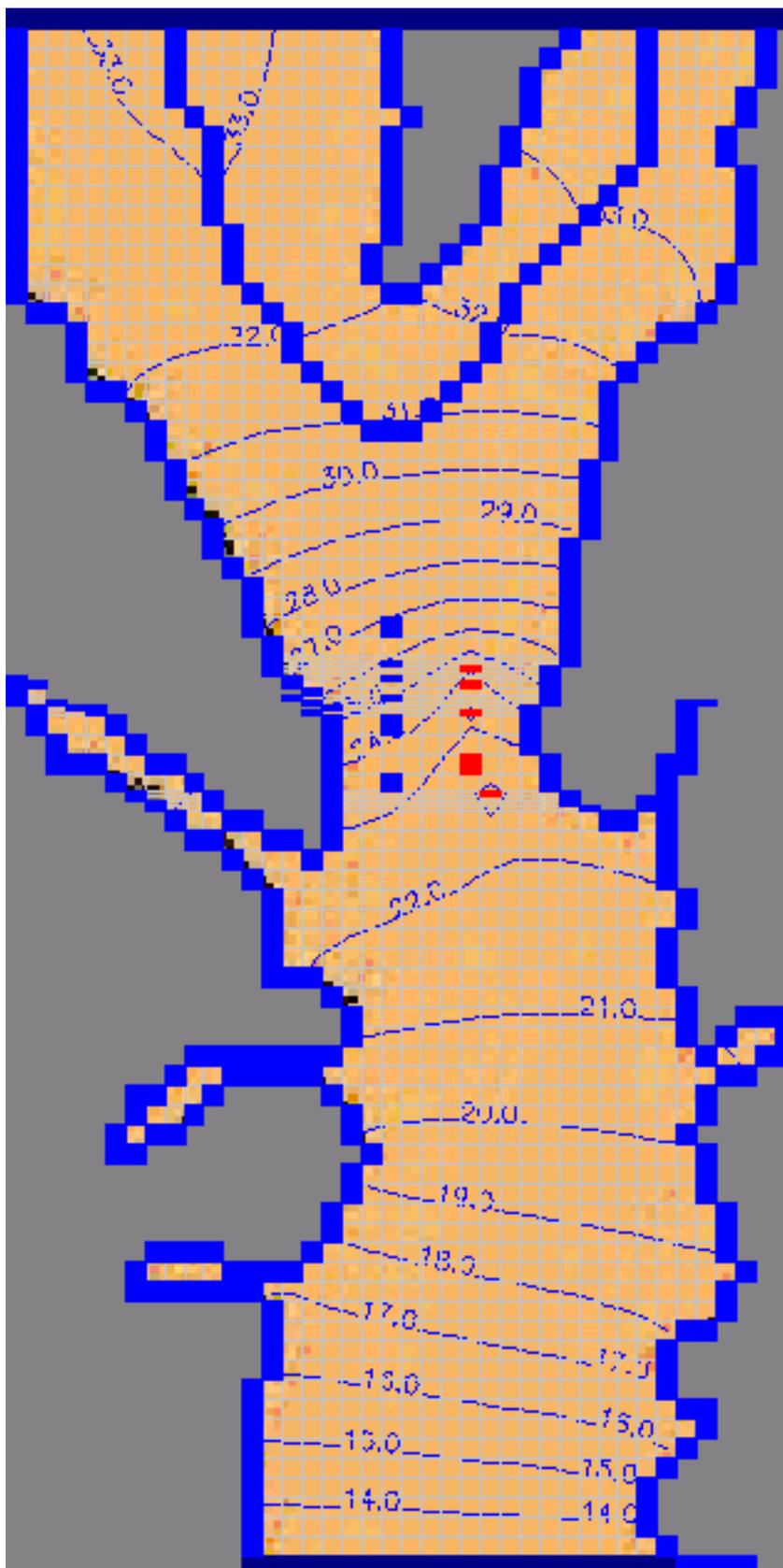


Figura 20.4. Mapa de isopiezas (valores en m s.n.m.) del acuífero en el sector modelizado, correspondiente a una situación media con extracciones (200 L/s en total) en el sector de los sondeos de AquaMed.

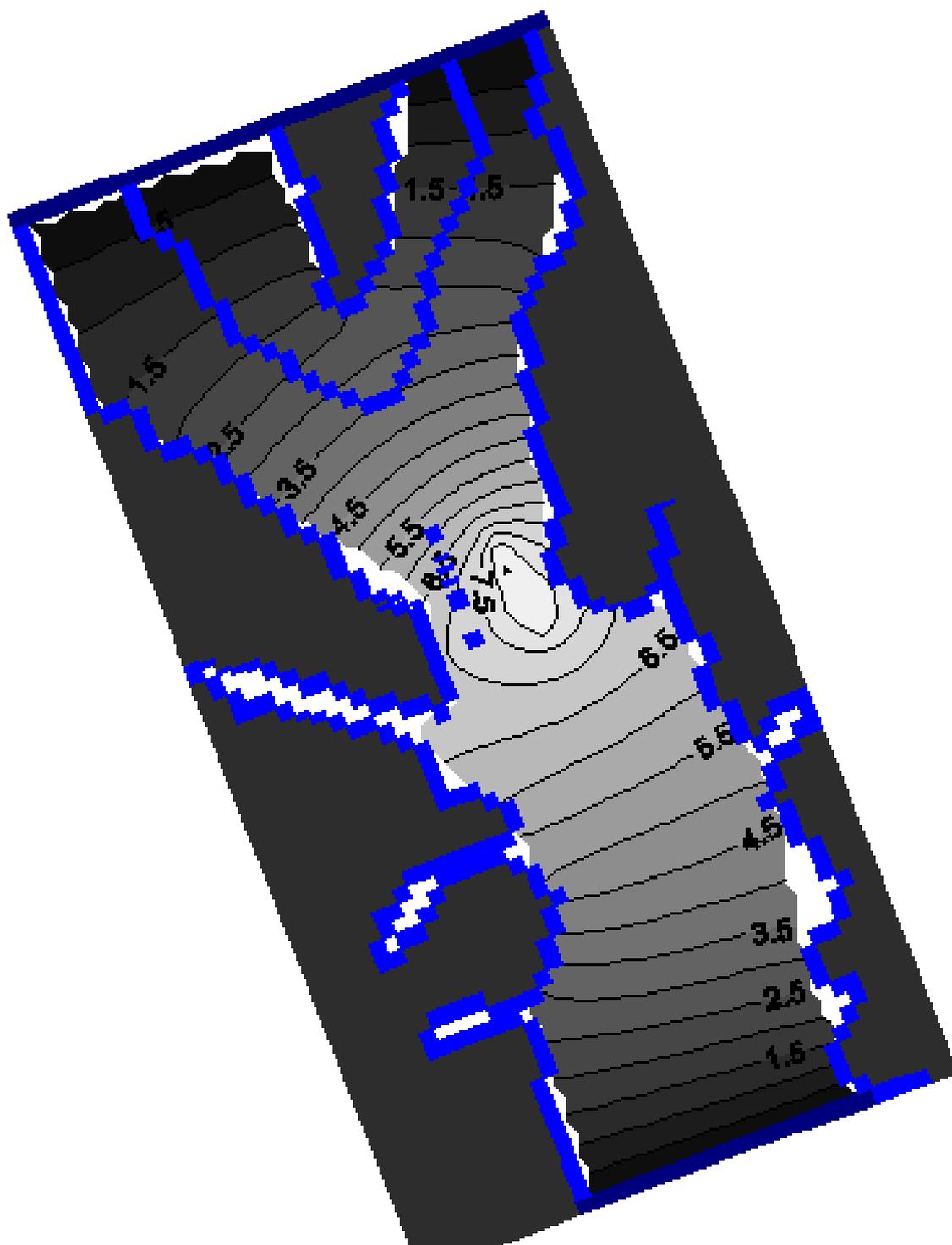


Figura 20.5. Mapa de isodescensos correspondiente a la situación expresada en la figura 20.4.

S3) Salidas (opción 3).

Se considera aquí igualmente el bombeo de 6,5 hm³/año, aunque esta vez en ocho captaciones. Cuatro de ellas siguen una línea en coincidencia aproximada con la de las perforaciones de AcuaMed y otras cuatro se ubican en el extremo NE de la zona modelizada, tratando de reproducir el efecto derivado de incluir captaciones en ese sector (¿Molino de Las Monjas?). El resultado, en forma de mapa de curvas isopiezas, se muestra en la figura 20.6. Se advierte en esta figura el que las cotas de los niveles piezométricos en el entorno de las captaciones de AcuaMed se han incrementado respecto a lo expresado en la figura 20.4. Por el contrario, la cota piezométrica en el sector NE del modelo, enclave de nuevas extracciones, se reduce.

Consideraciones:

Lo anterior traduce una circunstancia lógica: cuanto mayor sea el número de captaciones empleadas para sacar el mismo caudal conjunto, el descenso producido en los enclaves de bombeo será menor, pues menores serán los caudales individuales. Si se incluyen otras captaciones (situadas, por ejemplo, más al sur, en la vega de Vélez-Málaga), además de las ya mencionadas, de manera que el total de puntos de bombeo sea doce, entonces los descensos bajo los enclaves de bombeo reducirán su magnitud, si bien es cierto que la depresión piezométrica –aunque más moderada que en la opción 1- afectará a mayor extensión de acuífero.

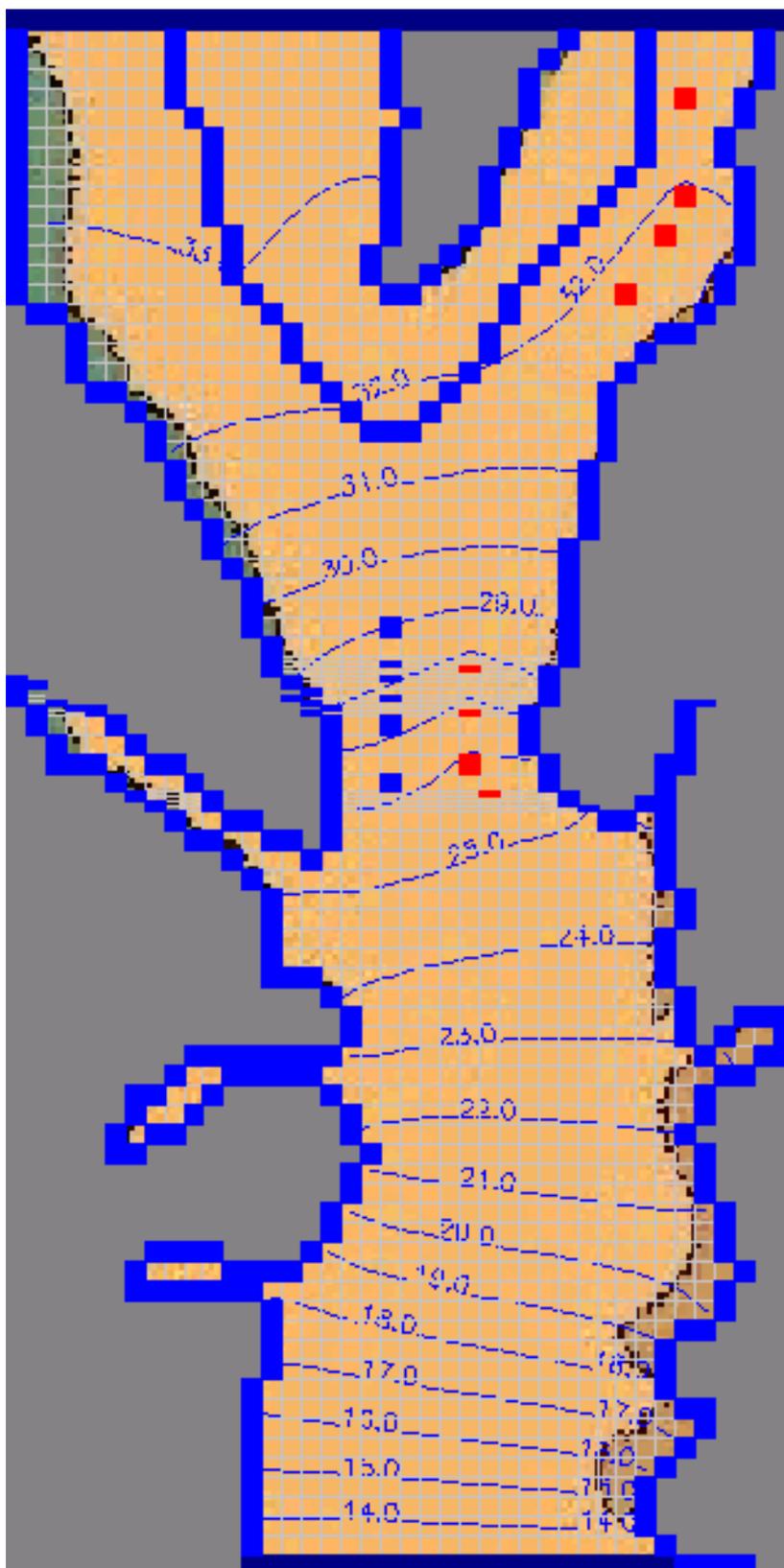


Figura 20.6. Mapa de isopiezas (valores en m s.n.m.) del acuífero en el sector modelizado, correspondiente a una situación media con extracciones (200 L/s en total) en el sector de los sondeos de AquaMed y en el sector NE.

21. PROPUESTAS DE REDES DE CONTROL

21.1. Piezometría

La instalación básica para la investigación y el control de los acuíferos son los sondeos piezométricos (o, simplemente, “piezómetros”). Además de ser datos necesarios para la calibración de los modelos de flujo y transporte, la combinación de datos piezométricos con la geometría del acuífero proporciona el conocimiento de los volúmenes de agua subterránea disponibles.

El acuífero del Vélez dispone de una importante red de piezómetros, perforados en su mayor parte en los años 1984 y 1985, que han permitido obtener información precisa sobre la geometría, características geológicas y la evolución espacial y temporal de los niveles piezométricos del acuífero.

Las primeras mediciones sistemáticas de niveles piezométricos se llevaron a cabo por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOPU) en el año 1972. Posteriormente, en el año 1977, el citado Organismo acometió la realización de 22 sondeos piezométricos en el sector deltaico.

En el año 1984, la Confederación Hidrográfica del Sur de España (CHSE) perforó 79 nuevos puntos para el control del acuífero que sustituían o complementaban los ya existentes del SGOPU. En concreto, se realizaron 13 sondeos en el delta, 63 en el aluvial distribuidos en trece perfiles transversales al cauce y los 3 restantes se ubicaron en el sector del Trapiche para el estudio de las anomalías salinas. Todos estos puntos fueron controlados durante el periodo 1984/86.

El Instituto Geológico y Minero de España llevó a cabo, en el año 1988, 7 nuevos piezómetros, tres de ellos para el control de la intrusión marina y los 4 restantes para realizar ensayos de inyección y admisión ante la posibilidad de construir una barrera física contra la intrusión marina.

En los años 1996 y 1997 la Confederación Hidrográfica del Sur de España construyó 11 nuevas perforaciones que fueron adecuadamente protegidas para evitar su destrucción.

En resumen, en el acuífero del río Vélez se han perforado a lo largo del tiempo 119 sondeos piezométricos, que han proporcionado abundante información para establecer la geometría y funcionamiento del acuífero. Sin embargo, con el paso de los años se ha perdido la mayor parte de estas perforaciones o se han reducido las profundidades útiles por colmatación, rotura de filtros, etc. De esta manera, en el año 1993 sólo existían 50 piezómetros útiles para realizar medidas de nivel, registros de conductividad y temperatura, o toma de muestras de agua; en el año 1995 el número de puntos utilizables era tan sólo de 32 y actualmente, el número de piezómetros útiles se estima en unos 26.

En este aspecto, la propuesta actual pretende realizar las labores oportunas para que las medidas que se realicen sean válidas. La red propuesta está compuesta por 29 puntos de los cuales 3 son de nueva ejecución cuyos datos principales y ubicación quedan reflejados en la tabla 1 y figuras 21.1 y 21.2. Actualmente ya se dispone de un piezómetro donde se ha instalado un sensor para el control en continuo. Así mismo se estiman necesarias las siguientes actuaciones complementarias: a) Revisión limpieza y acondicionamiento de piezómetros; b) ejecución de nuevos piezómetros; c) campaña de nivelación.

| Código Local | Código Oficial | X_UTM | Y_UTM | COTA | Sector acuífero | Tramo acuífero controlado | Control (Piezometría; Intrusión marina) | Observaciones generales |
|----------------------|---------------------|--------|---------|--------|-----------------|---------------------------|---|---|
| IGME 1 | P.06.27.001-B | 401050 | 4066100 | 4.600 | Delta | Inferior | P-I | Red Básica Oficial |
| Pz-B | P.06.27.001-S | 401040 | 4065947 | 4.500 | Delta | Inferior | P-I | |
| Pz-A nuevo | P.06.27.002-S nuevo | 401167 | 4065510 | 3.040 | Delta | Superior | P-I | Nueva ejecución para sustituir al Pz-A |
| Pz-Ds | P.06.27.003-S | 400898 | 4066220 | 5.730 | Delta | Superior | P-I | |
| Pz-C | P.06.27.004-S | 400947 | 4065950 | 4.400 | Delta | Superior | P-I | |
| Pz-E | P.06.27.005-S | 400821 | 4066424 | 7.400 | Delta | Inferior | P-I | |
| Pz-F | P.06.27.006-S | 400749 | 4066514 | 7.230 | Delta | Inferior | P-I | |
| IGME 3 | P.06.27.007-S | 401273 | 4065572 | 3.020 | Delta | Inferior | P-I | |
| Pz-G | P.06.27.008-S | 400743 | 4066524 | 7.180 | Delta | Superior | P-I | |
| P1-5 | P.06.27.009-S | 400907 | 4066337 | 5.980 | Delta | Superior | P-I | Posiblemente inutilizado |
| Pz-J | P.06.27.010-S | 399455 | 4074379 | 41.880 | Aluvial | Único | P | |
| P4-2 nuevo | P.06.27.011-S nuevo | 400566 | 4069552 | 17.360 | Aluvial | Único | P | Nueva ejecución para sustituir al P4-2 |
| Pz-K | P.06.27.012-S | 399455 | 4074375 | 41.940 | Aluvial | Único | P | |
| P6-2 | P.06.27.013-S | 399640 | 4072320 | 28.740 | Aluvial | Único | P | Sensor automático instalado en Oct-2006 |
| IGME 2 | P.06.27.014-S | 401019 | 4065849 | 4.630 | Delta | Inferior | P-I | |
| P7,8-9 | P.06.27.015-S | 399939 | 4073151 | 32.470 | Aluvial | Único | P | |
| S-152 | P.06.27.016-S | 401071 | 4065721 | 4.050 | Delta | Inferior y Superior | P-I | Posiblemente inutilizado |
| P10-2 | P.06.27.017-S | 399665 | 4076376 | 57.200 | Aluvial | Único | P | |
| S-153 nuevo | P.06.27.018-S nuevo | 401169 | 4065502 | 2.880 | Delta | Inferior | P-I | Nueva ejecución para sustituir al S-153 |
| P15-4 | P.06.27.019-S | 397277 | 4074397 | 49.750 | Aluvial | Único | P | |
| P1-3 | P.06.27.020-S | 400806 | 4066253 | 6.400 | Delta | Inferior y Superior | P-I | Posiblemente inutilizado |
| P2-1 | P.06.27.022-S | 400553 | 4067198 | 8.880 | Aluvial | Único | P | |
| Pz-Di o Pz-Dp | P.06.27.023-S | 400898 | 4066220 | 5.730 | Delta | Inferior | P-I | |
| P7,8-2 | P.06.27.024-S | 398751 | 4073102 | 34.810 | Aluvial | Único | P | |
| P9-3 | P.06.27.026-S | 399448 | 4074230 | 41.280 | Aluvial | Único | P | |
| E6-20-1 | P.06.27.027-S | 399486 | 4074933 | 44.200 | Aluvial | Único | P | |
| P6-1 | P.06.27.Sin código | 399470 | 4072265 | 28.915 | Aluvial | Único | P | |
| P7,8-1 | P.06.27.Sin código | 398575 | 4072960 | 35.304 | Aluvial | Único | P | |
| S-16BIS | P.06.27.Sin código | 401420 | 4065715 | 1.853 | Delta | Superior | P-I | |

Tabla 21.1. Propuesta de red piezométrica y de intrusión marina

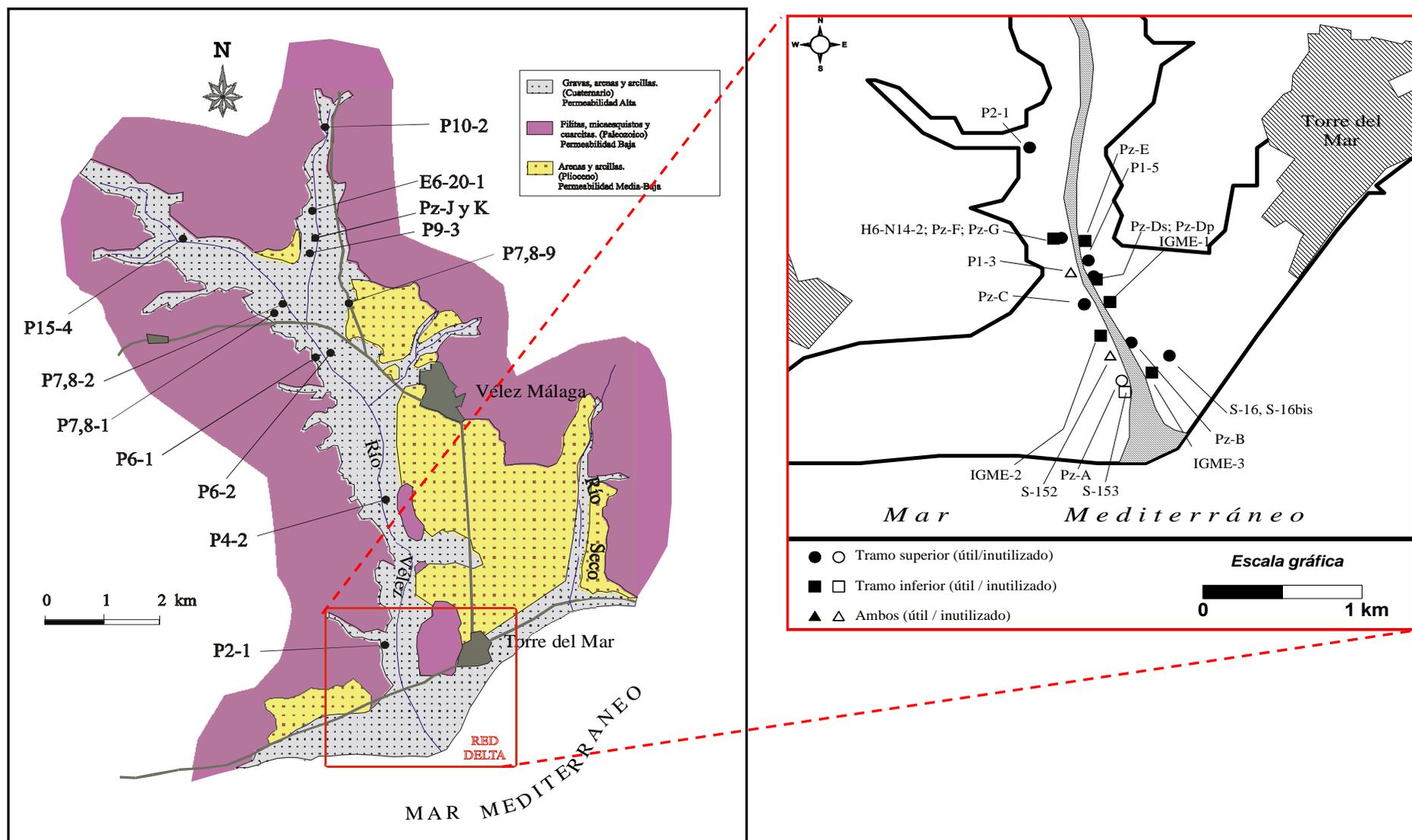


Figura 21.1. Ubicación de los puntos propuestos de la red piezométrica y de intrusión marina.

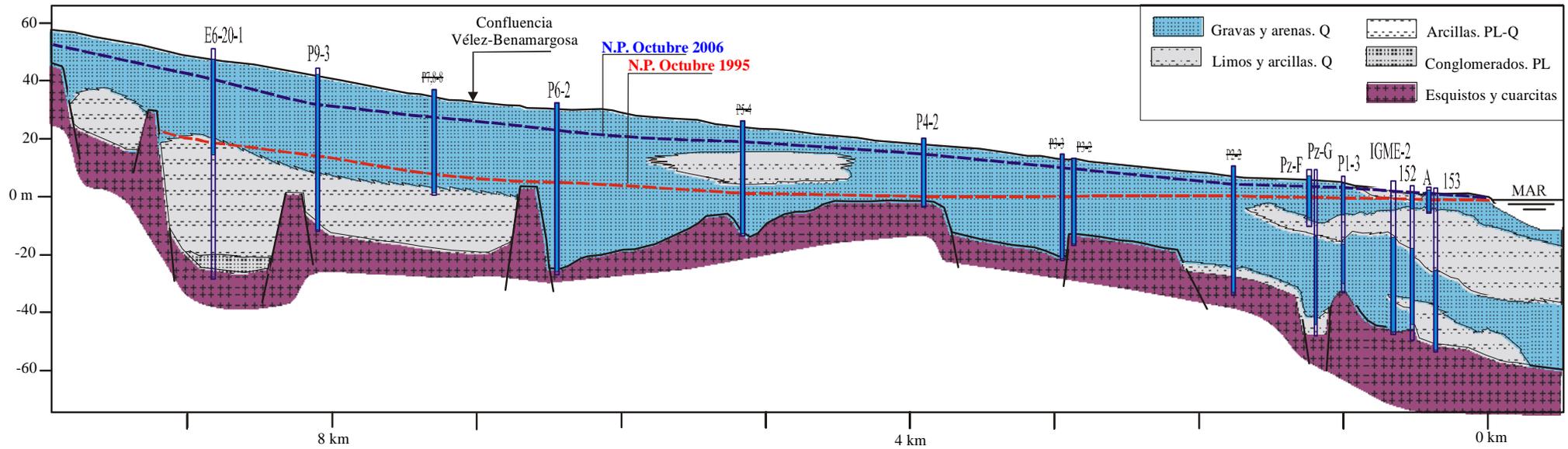


Figura 21.2. Perfil longitudinal por el río Vélez que incluye la ubicación de puntos de la red piezométrica y de intrusión marina.

Una vez establecida la red, se estima que cada campaña de medidas se puede realizar en 1-2 días, con una periodicidad entre campañas de mensual a trimestral.

a) Revisión, limpieza y acondicionamiento de piezómetros

La mayor parte de los piezométricos deben mostrar profundidades útiles inferiores a las iniciales o las aguas están estancadas al haberse obstruido los filtros por lo que requieren de una limpieza previa a las tareas de control. Las tareas concretas deben establecerse tras la revisión de su estado.

Se propone el método de limpieza mediante aire comprimido optimizado con los siguientes productos:

- Aditivo químico (polifosfato) en la proporción de 15 kg por m³ de agua inyectada, si bien se considera que puede ser efectivo a partir de 1kg/m³ de agua, si se deja actuar más de 1 hora. El uso de este producto es frecuente para la limpieza de perforaciones con objeto de dispersar los limos y arcillas que puedan haber obstruido los filtros.
- Hipoclorito cálcico a razón de 1kg/m³ de agua para la destrucción de los lodos orgánicos.

El procedimiento puede ser el siguiente:

- 1) Mezclar y batir enérgicamente los productos con agua utilizando bidones de 200 litros. Introducir 3 kg de polifosfato y 200 gr de hipoclorito por cada bidón de agua.
- 2) Inyectar la mezcla en los piezómetros, lo más al fondo posible, con ayuda de una manguera.
- 3) Dejar actuar 24 horas, como mínimo.
- 4) Agitar durante 2 horas con aire comprimido.
- 5) Dejar reposar durante al menos 8 horas.
- 6) Efectuar una segunda fase de agitación (pistoneo) durante 2 horas.
- 7) Bombear hasta que el agua salga limpia.

Finalmente se procederá al acondicionamiento de algunos de los piezómetros mediante la instalación de una caseta de protección.

b) Ejecución de nuevos piezómetros

Para la ubicación los piezómetros se ha tenido en cuenta la situación espacial de los piezómetros útiles, de forma que se ha pretendido cubrir la pérdida de alguno de ellos. En concreto se considera que deben ser repuestos los siguientes piezómetros:

- Pz-A-nuevo: Profundidad estimada: 15 m. Objetivo: captar el tramo superficial para el control piezométrico y de intrusión marina.
- S-153-nuevo: Profundidad estimada: 45 m. Objetivo: captar el tramo profundo para el control piezométrico y de intrusión marina.
- P4-2-nuevo: Profundidad estimada: 25 m. Objetivo: reponer piezómetro de control histórico.

c) Campaña de nivelación de piezómetros

A partir de las medidas piezométricas puntuales, el trazado de isopiezas para conocer el flujo subterráneo exige la nivelación topográfica de precisión de los puntos de la red propuesta.

21.2. Intrusión marina

En el sector deltaico se propone una red de control compuesta por 16 puntos, dos de ellos de nueva construcción (tabla 21.1 y figura 21.1). Se estima que cada campaña de medidas puede ser realizada en unos 2 días con una periodicidad trimestral. Los parámetros básicos a determinar son la conductividad eléctrica y la concentración de cloruros de las aguas subterráneas. Reviste particular interés la realización de registros verticales de conductividad eléctrica en piezómetros completamente penetrantes.

21.3. Red de control de la calidad de las aguas subterráneas

En la tabla 21.2 y en la figura 21.3 se presenta la red de control de calidad de las aguas subterráneas compuesta por 15 puntos. La duración de cada campaña puede ser de 1-2 días con una periodicidad trimestral.

Asimismo, puede ser interesante añadir varios puntos de control de la calidad de las aguas de los ríos Vélez y Benamargosa.

Las determinaciones a realizar deben incluir el análisis de elementos mayoritarios, nitrogenados, fosfatos y eventualmente plaguicidas.

| Nº PUNTO | X_UTM | Y_UTM | COTA | Toponimia | Naturaleza | Uso del agua | Propietario o administrador |
|------------|--------|---------|--------|-------------------------------|------------|--------------------------|---|
| E5-N36-1 | | | | Pedro Gómez | Sondeo | Abastecimiento (reserva) | Ayuntamiento de Benamocarra |
| F5-24-1 | 398781 | 4073112 | 34.758 | Vega de Cela | Sondeo | Agricultura | Sociedad Capellanía Patarra SAT Nº 701 |
| E6-18 | 399403 | 4075155 | 48.253 | Atalaya Baja | Pozo | Agricultura | Manuel Téllez Bueno (¿?) |
| E6-29 | 399634 | 4074364 | 43.138 | El Trapiche | Sondeo | Abastecimiento (reserva) | Ayuntamiento de Vélez Málaga |
| F6-1-3 | | | | Finca El Banco | Pozo | Agricultura | Hermanos Gutierrez Ariza |
| F6-24-1 | 399978 | 4071474 | 25.321 | Huerta de la Lechuga | Sondeo | Agricultura | CR Río Vélez. Acequia de Anaya |
| G6-2-3 | 400055 | 4070752 | 20.936 | Antigua finca de Belda | Sondeo | Agricultura | Isabel Pérez Clavero |
| G6-5-1 | 400718 | 4070039 | 18.296 | Vega de la Alberquilla | Pozo | Agricultura | CR Río Vélez. Acequia Prado del Rey |
| G6-N6-2-1 | 400227 | 4069965 | | Cortijo los López "Cabrillas" | Sondeo | Agricultura | Miguel Garcia Quintero. |
| G6-N22-1 | 400776 | 4068871 | | Barranca Trigueros | Sondeo | Agricultura | CR Río Vélez. Acequia Chica Barranca de Trigueros |
| G6-30 | 400858 | 4068082 | 11.955 | Vega de Enrique | Pozo | Agricultura | CR Playa de Vargas y Vega Enrique |
| H6-1-1(S) | 400870 | 4067772 | | Vega de Mena | Sondeo | Agricultura | CR Torre del Mar |
| H6-N12-1-2 | 400604 | 4066793 | | Vega Enrique | Sondeo | Agricultura | CR Cerro de la Encina |
| H6-16(P) | 400764 | 4066235 | 6.402 | El Puente | Pozo | Agricultura | CR Playa de Vargas y Vega Enrique |
| H6-17-1 | 400989 | 4066369 | 4.848 | Carril de la Culebra | Pozo | Agricultura | CR Torre del Mar |

Tabla 21.2. Propuesta de red de control de la calidad de las aguas subterráneas

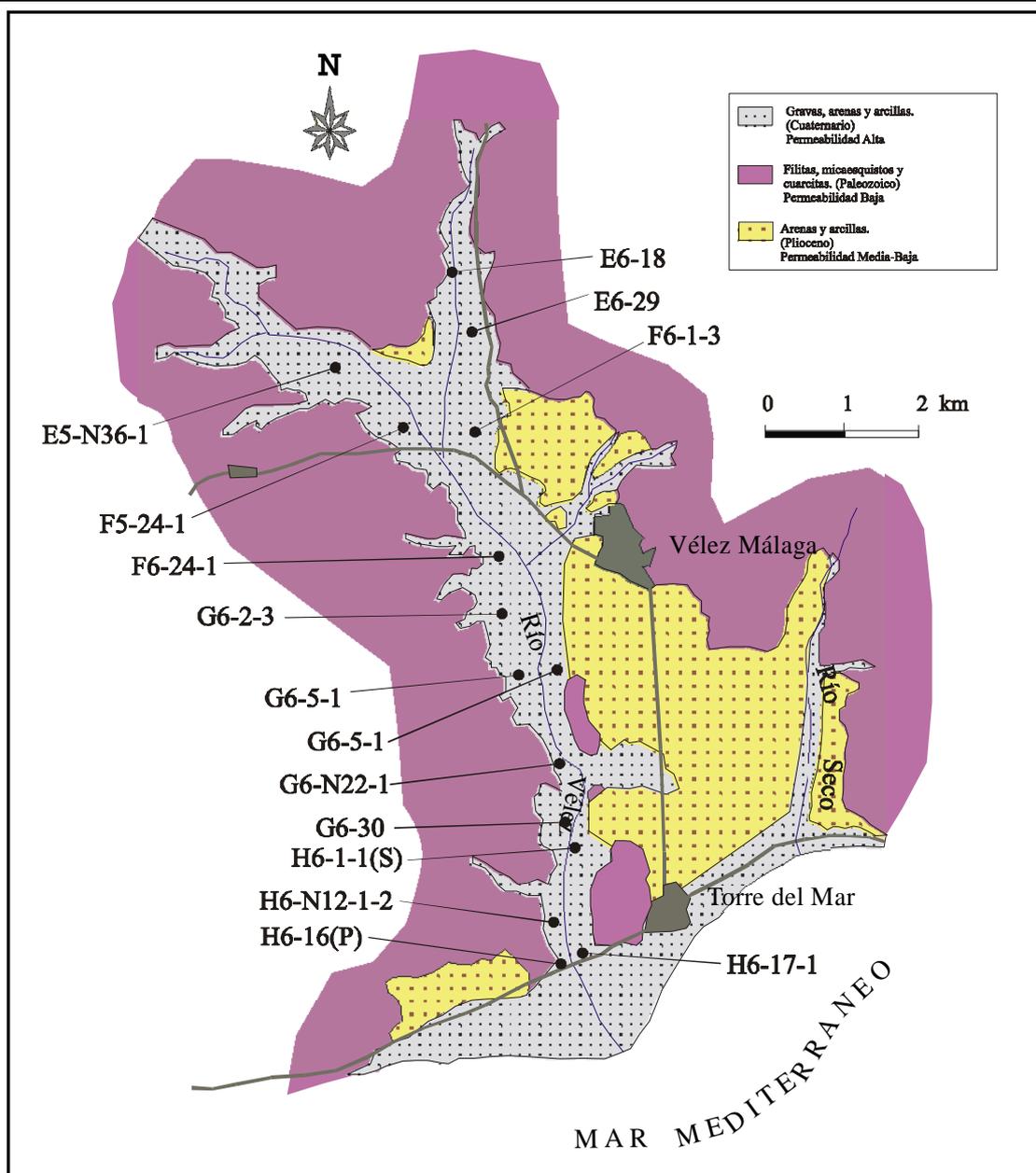


Figura 21.3. Ubicación de los puntos propuestos de la red de control de la calidad de las aguas subterráneas.

21.4. Otras redes de control

Para trabajos específicos deberán establecerse otras redes de control tales como:

a) Control de los caudales superficiales

Se trata de establecer una red foronómica en varias secciones de los ríos Vélez y Benamargosa y en el control de los caudales derivados por acequias. Especialmente interesante puede ser el control de la relación río-acuífero aguas abajo de la confluencia de ambos ríos, mediante la realización de aforos diferenciales.

b) Control de la explotación por bombeo del acuífero

Esta red debe ser establecida tras un primer análisis de la situación actual y resultará necesaria para conocer los balances zonales de agua y los usos y destinos. El control de la explotación por bombeo es asimismo fundamental para conocer cómo se modificará el régimen del acuífero si se paralizasen determinadas captaciones al recibir agua desde el nuevo sistema Viñuela-Acuífero-EDAR.

22. PROPUESTA DE GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS

De acuerdo con los planteamientos de la Directiva Marco del Agua y las líneas estratégicas de acción del Programa AGUA, el esquema de explotación planteado del sistema Viñuela-acuífero-EDAR/Vélez puede presentarse como un excelente ejemplo de actuación en gestión integral y sostenible de recursos hídricos. Además, dicho esquema implica un efecto medioambiental altamente positivo, como es el de la recuperación de masas de agua degradadas debido a la contaminación por nitratos de origen agrario y la protección de éstas frente a la intrusión marina. Todas estas actuaciones pueden y deben acometerse aprovechando las oportunidades y sinergias que ofrecen los trabajos de AcuaMed para la consolidación de los regadíos del Plan Guaro. La sostenibilidad en la explotación de los recursos y el logro de un buen estado cualitativo y cuantitativo del sistema es posible, sin perder de vista otro de los aspectos en los que pone especial énfasis la política de aguas establecida por la DMA: el agua es un recurso limitado y valioso, por lo que debe ser considerada su dimensión como bien económico.

El uso conjunto es un elemento fundamental dentro de la estrategia de gestión integral del agua. La aplicación actual del uso conjunto con una amplísima tipología puede integrarse con otras técnicas de gestión del agua, como mercados del agua, gestión de la demanda, reutilización, etc. Las ventajas son significativas, tanto económicas como de calidad, cantidad y garantía de suministro del recurso. La unidad principal de análisis de la gestión integral de recursos hídricos es la cuenca (o agrupación de cuencas en caso de sistemas interconectados), donde las decisiones de operación del sistema y asignación de agua tienen mayores implicaciones hidrológicas, económicas, sociales y ambientales. En este contexto, los modelos ofrecen una representación simplificada de los problemas que permiten procesar la información de una manera rápida y eficiente, y son de ayuda imprescindible para hacer más racional la compleja toma de decisiones en relación con la planificación y gestión del agua.

Para el caso propuesto del sistema Viñuela-acuífero-EDAR/Vélez, su configuración física lo hace idóneo para aplicar un modelo relativamente sencillo pero completo

de uso conjunto que se traduce en un Sistema Soporte a la Decisión, donde deben incorporarse las siguientes consideraciones desde el punto de vista hidrogeológico:

Las aguas subterráneas y las relaciones río-acuífero deben jugar un papel importante en la operación del sistema, lo que requiere que el acuífero sea introducido en el modelo de uso conjunto mediante la aplicación de modelos de parámetros distribuidos.

La explotación por bombeo del acuífero necesita ser restringida para evitar el deterioro de la calidad por intrusión marina. Ello requerirá que el modelo de parámetros distribuido a incorporar al modelo de simulación/optimización de la gestión, permita la representación 3D del flujo y transporte de solutos e integre la característica de densidad variable en el fluido.

Las demandas urbanas, agrícolas y medioambientales deben incorporarse al sistema considerando su distinto valor económico. Asimismo, deben tomarse en consideración las diferentes exigencias de calidad del agua según el uso que se haga de las mismas, lo que puede permitir su simulación/optimización con criterios económicos.

El modelo de flujo permitiría la simulación de una hipotética reordenación de captaciones y el análisis de la situación respetando los derechos implicados.

Tanto los antecedentes como las actuaciones hidrogeológicas de AcuaMed en el marco del Proyecto Informativo indican que el acuífero de Vélez permite proporcionar los caudales solicitados para riego (6,5 hm³/año). Respecto a los impactos hidrológicos negativos (relaciones río-acuífero e intrusión marina), su análisis detallado requiere del desarrollo de modelos de flujo y transporte de solutos. No obstante, las primeras estimaciones al respecto son favorables a la viabilidad, entre otros aspectos, porque los caudales de bombeo para riego planteados son inferiores a los actuales y sustitutivos de ellos en gran medida, si bien su cuantificación detallada debe ser objeto de estudio.

Así pues, las actuaciones para el estudio de la explotación sostenible del acuífero de Vélez y el establecimiento del modelo de uso conjunto de los recursos hídricos del sistema Viñuela-Acuífero-EDAR/Vélez requerirían de las siguientes tareas concretas:

- Actualización del inventario de puntos de agua.
- Red de monitorización que incluye el completado y mantenimiento de las redes de control y vigilancia de niveles piezométricos, calidad y explotación por bombeo.
- Adecuación de las redes de control piezométrico: revisión y limpieza de piezómetros y construcción de tres nuevos.
- Campañas periódicas de medidas de nivel piezométrico y adquisición e instalación de instrumentos tipo “data logger” para el control continuo.
- Campañas de registros de conductividad y temperatura en piezómetros y captaciones del delta para el control de la intrusión marina.
- Campañas de toma de muestras y analítica de parámetros de calidad fisicoquímica y bacteriológica de las aguas superficiales y subterráneas.
- Identificación de la relación río/acuífero: campañas periódicas de aforos diferenciales en cauces (ríos Vélez y Benamargosa) y control de caudales derivados por acequias.
- Cálculo de explotación por bombeo y su evolución en los últimos 10 años. Dado que la mayor parte de los puntos carecen de contador volumétrico, la explotación se calculará a partir de datos de consumos eléctricos en captaciones seleccionadas y contrastado con superficies de riego. Tal procedimiento ya fue aplicado con éxito a mediados de los años 90 (CHSE, 1997).
- Cálculo de la explotación actual y previsión de las modificaciones a raíz de las actuaciones de AcuaMed. A efectos de gestión del acuífero, resulta fundamental conocer cual va a ser la previsible explotación por bombeo adicional a la que efectuará AcuaMed, es decir, conocer si van a existir bombeos particulares complementarios o independientes del nuevo sistema planteado, bien por decisión propia o por que sus aguas se destinen a riegos por encima de la cota 140.

- Ensayos complementarios para la obtención de parámetros de flujo y transporte necesarios para la elaboración de los modelos: campañas de medidas de flujos subterráneos, ensayos de trazadores, ensayos de dispersividad, ensayos de infiltración y determinación de la permeabilidad en el lecho del río.
- Campañas de prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para la determinación de la intrusión marina en el delta y la geometría del sustrato en el sector de la confluencia de los ríos Vélez y Benamargosa.
- Identificación precisa de la ubicación idónea de nuevas captaciones a ejecutar.
- Regulación de la cuenca. Estudio de usos y demandas de agua. Revisión de las relaciones entre captaciones, zonas y cultivos de regadío. Análisis de las modificaciones respecto a los últimos datos disponibles (año 1997).
- Determinación del balance hídrico del acuífero y sus modificaciones en los últimos diez años.
- Actuaciones para creación e implicación activa de la Comunidad de Usuarios como medida clave en la protección cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos subterráneos: divulgación del sistema de uso conjunto y de las características hidrogeológicas del acuífero de Vélez, tareas de concienciación sobre el uso sostenible de los recursos hídricos y creación de una página web al respecto.
- Diseño, construcción y experimentación en una instalación piloto para la recarga artificial con aguas de la EDAR de Vélez.
- Desarrollo de un modelo de flujo y transporte de solutos 3D que considere densidad variable en el fluido. Permitirá analizar las repercusiones de las actuaciones previstas, simular las relaciones río-acuífero, eventuales efectos de la recarga artificial, el transporte de contaminantes y la intrusión marina.
- Desarrollo de un modelo de uso conjunto Viñuela-Acuífero-EDAR
- Desarrollo de una herramienta para el acople en entorno SIG de los modelos de flujo y transporte y el de gestión/optimización.
- Identificación y valoración económica de propuestas para la mejora de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en relación con la contaminación por nitratos de origen agrario.

- Elaboración de planes de sequía incorporando el uso conjunto embalse-acuífero-EDAR y el acoplamiento de modelos a GIS.

Desde el punto de vista presupuestario todas las actuaciones anteriormente expuestas pueden suponer del orden de 420.000 euros. El plazo de ejecución se estima en 1,5-2 años y su desarrollo puede ser paralelo a la ejecución de las obras, aunque sería deseable que se iniciase con anterioridad, especialmente con objeto de determinar la ubicación hidrogeológica óptima de las nuevas captaciones a efectuar.

Respecto a la red de monitorización cabe señalar que la propuesta indicada incluye la red explicitada en el apartado correspondiente. Dicha red se establecería durante el plazo señalado anteriormente y sería diferente de la red definitiva a instaurar una vez concluyan las obras, momento en el que ya se dispondría de los modelos de flujo y transporte desarrollados que permitirían su diseño óptimo.

23. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavente, J., El Mabrouki, K., Himi, M., García-Aróstegui, J.L., Calabrés, C. y Casas, A. 2005. Uso de técnicas geofísicas para caracterizar la extrusión de agua salina en un acuífero costero mediterráneo bicapa (Río Vélez, provincia de Málaga). *Geogaceta*, 37, 127-130.
- CHSE. 1987. Estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa. Proyecto 12/87. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Sur de España.
- CHSE. 1997. Asistencia técnica para el seguimiento, conservación y explotación del estudio hidrológico de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga) y control de su calidad. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Sur de España.
- García-Aróstegui, J.L., Hidalgo, M.C. and Benavente, J. 2005. Groundwater quality monitoring in a coastal Mediterranean aquifer affected by agricultural contamination and seawater intrusion-extrusion processes (Vélez river, Andalusia, Spain). In: Benavente, J., Larabi, A. and El-Mabrouki, K. (eds.), *Monitoring, Modelling and Management of coastal aquifers*. Instituto Geológico y Minero de España, Granada, 301-313.
- García-Aróstegui, J.L. 1998. Estudio hidrogeológico y modelización del acuífero de los ríos Vélez y Benamargosa (Málaga). Tesis Doctoral. Universidad de Granada. Memoria inédita. 377 pp.
- García-Aróstegui, J.L., Padilla, F. y Cruz-Sanjulián, J.J. 1998. Numerical simulation of the influence of the La Viñuela reservoir system on the coastal aquifer of the Vélez River (Málaga, Spain). *Hydrological Sciences Journal*, 43 (3), 459-477.

- García-Aróstegui, J.L., Padilla, F., Hidalgo, M.C. y Cruz-Sanjulián, J.J. 2000. Water management in a coastal region of Southern Spain, the Vélez River catchment area. Simulation of groundwater and surface water flow for the correct freshwater budget. *Hydrogéologie*, 3, 13-22.
- ITGE. 1988. Estudio de las posibilidades de lucha contra la intrusión salina mediante la utilización de barreras artificiales. Instituto Tecnológico y Geominero de España. Memoria inédita.
- Sánchez, L. y Castillo, A., Eds. y Coords. 2005. Itinerario hidrogeológico por el litoral mediterráneo andaluz. Universidad de Granada-Agencia Andaluza del Agua, Granada, 238 pp..
- Vadillo, I., Benavente J., El-Mabrouki, K., Carrasco, F., López, V. and García-Aróstegui, J.L. (2007). Distribution of nitrogen species and evidence of denitrification in the Velez river aquifer (South of Spain). WAPO Conference, Barcelona.
- Wichenbach, M. 1993. Leitähigkeitsmessungen im delta des río Vélez (Málaga, Spanien). Tesis de Licenciatura. Universidad Libre de Berlín. Memoria inédita, 72 pp.

ANEXO 1.

INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS HIDRÁULICOS

MEDIANTE AQTESOLV

ANEXO 2.

REPORTAJE FOTOGRÁFICO