

**INVESTIGACIÓN DE LA RESPUESTA DE ACUÍFEROS
PROFUNDOS A LA EXPLOTACIÓN INTENSIVA:
CASO DEL ACUÍFERO CARBONATADO DE
LA LOMA DE ÚBEDA (UNIDAD 05.23)**

**MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO
CARBONATADO DE LA LOMA DE ÚBEDA (UNIDAD 05.23)**

MEMORIA

Mayo, 2008



INFORME	Identificación: 2. Reconocimiento y estudios H - 2 - 82 - 08
	Fecha: Mayo de 2008
TÍTULO MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA LOMA DE ÚBEDA (UNIDAD 05.23) Volumen 1: Memoria Volumen 2: Anexos	
PROYECTO Investigación de la respuesta de acuíferos profundos a la explotación intensiva: caso del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda (Unidad 05.23).	
RESUMEN En el documento se describen todo lo referente a los trabajos ligados a la modelación del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda (Unidad 05.23). Ello comprende los trabajos de premodelación aborados, que incluyen la interpretación mediante premodelos de las ensayos de bombeo ejecutados, el estudio geoestadístico para las restitución de la geometría del acuífero incorporando el conocimiento referente a la estructura tectónica del acuífero. Asimismo, se describe la consecución de los objetivos propuestos para la modelación numérica que procuró: 1, identificar un modelo conceptual plausible y establecer un balance hídrico en un escenario no influenciado modelando en régimen estacionario la situación hídrica media del período 1960/62–1994/95 y 2, establecer un balance hídrico en un escenario de fuerte explotación modelando en régimen transitorio el período 2000/01–2005/06. Mediante ambos balances hídricos y atendiendo a nuevo modelo conceptual, se realizó una primera propuesta que sectorizadamente estableció umbrales para la explotación sostenible del acuífero	
PALABRAS CLAVE: modelo de flujo, acuífero profundo, gestión hídrica sostenible, acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda	
Revisión Nombre: Antonio González Ramón Área: Hidrogeología y Aguas Subterráneas Fecha: Mayo 2008	Autor: Javier Heredia Responsable: Antonio González Ramón



ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN

II. ESTRUCTURA DEL MODELO

II.1. Definición del dominio espacial

II.1.1. Sinopsis geológica del Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda

II.1.2. Definición geométrica del Acuífero Carbonatado

II.1.3. Definición del dominio y discretización espacial del modelo

II.2. Definición del dominio temporal. Discretización

II.3. Condiciones de contorno

II.3.1. Límite perimetral del dominio del modelo: límite impermeable y nivel fijo, H

II.3.2. Hidrografía de la zona de estudio: condiciones de río y dren

II.3.3. Fracturas regionales: celdas inactivas y pantallas

II.3.4. Recarga del acuífero

II.4. Permeabilidad, k, y coeficiente de almacenamiento, S.

II.5. Explotación del acuífero: bombeos

II.6. Información piezométrica



III. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN ESTACIONARIO.

III.1. Identificación de un modelo conceptual plausible

III.1.1. Análisis de la información piezométrica

III.1.2. Análisis de la información hidroquímica e isotópica

III.1.3. Contraste de los distintos modelos conceptuales

III.2. Parámetros calibrados

III.3. Balance Hídrico: régimen estacionario

IV. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN TRANSITORIO

IV.1. Definición de la condición inicial

IV.2. Caracterización histórica de las extracciones y calibración de los parámetros

IV.3. Balance Hídrico: régimen transitorio

V. CONCLUSIONES

V.1. Propuesta para la explotación sostenible del acuífero.

V.2. Aportes de los trabajos de modelación numérica.

V.3. Líneas de trabajos futuros

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE DE FIGURAS

II. ESTRUCTURA DEL MODELO

- Figura 2.1. Esquema geológico general del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda**
- Figura 2.2. Modelo Digital del Terreno del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda**
- Figura 2.3. Isobatas y fracturas caracterizadas en el acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda**
- Figura 2.4. Puntos con información sobre la profundidad del techo y muro del acuífero**
- Figura 2.5. Puntos con información de cota del techo del acuífero carbonatado y superficie de techo interpolada sin considerar la existencia de fracturas y del proceso erosivo. (Obs.: se indican las fallas interpretadas)**
- Figura 2.6. Krigin ordinario para interpolar la superficie de techo sin considerar fracturas**
- Figura 2.7. Potencia restituida del acuífero para generar información complementaria para la interpolación de la superficie de la cota de muro.**
- Figura 2.8. Puntos con información original y generada sobre la cota del techo del acuífero carbonatado y superficie de muro interpolada sin considerar la existencia de fracturas y del proceso erosivo.**
- Figura 2.9. Krigin ordinario para interpolar la superficie de muro sin considerar fracturas**

Figura 2.10. Información de la cota del techo del acuífero carbonatado y superficie de techo interpolada considerando la existencia de fracturas.

Figura 2.11. Krigin ordinario para interpolar la superficie de techo considerando fracturas

Figura 2.12. Superficie final del techo del acuífero

Figura 2.13.a. Superficie final del muro del acuífero

Figura 2.13.b. Potencia final del acuífero

Figura 2.14. Discretización espacial del premodelo del acuífero carbonatado de Úbeda

Figura 2.15. Discretización espacial del modelo del acuífero carbonatado de Úbeda

Figura 2.16.a. Discretización espacial: columnas, cortes N-S

Figura 2.16.b. Discretización espacial: Filas, cortes E-O

Figura 2.17. Condiciones de contorno en el perímetro del modelo

Figura 2.18. Red hidrográfica en el dominio del modelo

Figura 2.19. Caracterización geométrica de las fracturas regionales

Figura 2.20. Esquema para la estimación de k_p

Figura 2.21. Representación en el modelo de fracturas regionales y locales

Figura 2.22. Estaciones meteorológicas en el dominio del modelo.

Figura 2.23. Zonificación de la recarga en el modelo.

Figura 2.24. Emplazamiento de los ensayos de bombeo.

Figura 2.25 a. Método de Theis: ajuste gráfico. Período: bombeo

Figura 2.25 b. Método de Theis: resolución matemática. Período: bombeo y recuperación

Figura 2.26. Discretización espacial del ensayo en la zona de La Imagen II para su interpretación numérica (MDF)

Figura 2.27. Resolución numérica (MDF) del ensayo en zona de La Imagen II

Figura 2.28. Esquema de situación del ensayo de bombeo en el sondeo S-10

Figura 2.29. Esquema de situación del ensayo de bombeo en el sondeo S-11

Figura 2.30. Zonificación de permeabilidad, k , y coeficiente de almacenamiento, S

Figura 2.31. Explotación del acuífero: 208 puntos de bombeo

Figura 2.32. Niveles piezométricos en el acuífero en 1996 y red piezométrica 2000/01-2005/06

Figura 2.33. Modelo transito: agrupamiento de puntos de observación

Figura 2.34. Hidrogramas de los sondeos del sector confinado del acuífero y del piezómetro Camino en el sector libre.

Figura 2.35. Hidrogramas de los sondeos próximos al río Guadlimar.

III. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN ESTACIONARIO

Figura 3.1. Piezometría de 1996. Agrupamiento de los datos

Figura 3.2. Análisis de tendencias en la piezometría de 1996.

Figura 3.3. Estructuración espacial de los datos hidroquímicos e isotópicos

Figura 3.4. Puntos muestreados en campaña 2006 hidroquímica e isotópica. Patrón de flujo en régimen natural



Figura 3.5. Calibración de los modelos contrastados: niveles medidos vs. calculados

Figura 3.6. Calibración modelo de la conceptualización 5: patrón de flujo resultante

IV. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN TRANSITORIO

Figura 4.1. Agrupamiento de puntos de observación

Figura 4.2. Calibración régimen transitorio: Ajuste piezométrico

ÍNDICE DE TABLAS

II. ESTRUCTURA DEL MODELO

Tabla 2.1. Manantiales en la zona de estudio (de Gollonet, 2005)

Tabla 2.2: Parámetros hidrogeológicos interpretados en la zona de la Imagen II

Tabla 2.3. Dotaciones y necesidades máximas de riego del olivar (CHG, 2005)

Tabla 2.4. Coeficiente porcentual respecto al año medio del volumen de riego del olivar y período de aplicación (CHG, 2005)

Tabla 2.5. Caracterización hidroclimática de los años modelados y de sus respectivos períodos de riego

Tabla 2.6. Sondeo con registros piezométricos durante el período 2000/01-2005/06

Tabla 2.7. Modelo transito: agrupamiento de puntos de observación

III. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN ESTACIONARIO

Tabla 3.1. Criterios de calibración para los modelos contrastados

Tabla 3.2. Parámetros calibrados en el modelo en régimen estacionario (situación media: 1960/62–1994/95)

Tabal 3.3. Balance Hídrico: régimen estacionario

IV. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN TRANSITORIO

Tabla 4.1. Descripción de los agrupamientos de puntos de observación piezométrica

Tabla 4.2. Evolución de las extracciones durante el período 2000/01-2005/06



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I. INFORMACIÓN SOBRE TECHO Y MURO DEL ACUÍFERO

ANEXO II. INFORMACIÓN SOBRE RECARGA POR PRECIPITACIÓN

ANEXO III. ENSAYOS DE BOMBEO

ANEXO IV. INFORMACIÓN SOBRE EXTRACCIONES

ANEXO V. INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA



I. INTRODUCCIÓN

En el presente informe se exponen los trabajos de modelación numérica del Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda, masa de agua 05.23, realizados por el Instituto Geológico y Minero de España. Este trabajo se enmarca en la iniciativa por parte del IGME de desarrollar una herramienta numérica de apoyo a la gestión hídrica de esta masa de agua. Iniciativa que, en el último lustro, ha tenido como antecedentes el desarrollo de algunos premodelos de este acuífero (IGME, 2004).

El desarrollo de modelos numéricos de acuíferos usualmente tiene como objetivo el contar con una herramienta de apoyo a la gestión hídrica de los recursos. Ello se debe a la versatilidad que ofrecen los modelos para representar y estudiar de forma económica los distintos escenarios de interés para la gestión de un sistema. Sin embargo, los modelos también son potentes herramientas de investigación del medio, esto es tanto fruto de los trabajos previos a la estricta actividad de representación numérica, como de los resultados de esta. La modelación numérica exige previamente un análisis riguroso de la información del sistema y una integración coherente de la misma, con el fin de definir una estructura de modelo consistente. Por otro lado, la coherencia de los resultados de la modelación permite validar, o no, el modelo conceptual del sistema que se representa y, en última instancia, la coherencia misma de los datos utilizados así como su representatividad e incertidumbre.

El presente trabajo de modelación numérica ha respondido a los dos objetivos generales expuestos en el párrafo anterior. En un primer estadio, se realizó una revisión crítica sobre modelo conceptual aceptado hasta el momento, se investigaron modelos conceptuales alternativos y, finalmente, se identificó un modelo conceptual plausible con el conocimiento que se tiene de este sistema acuífero y cuya representación numérica reproduce más adecuadamente las observaciones del mismo. En una segunda etapa, basado en la representación numérica del modelo conceptual identificado se estableció una valoración sobre el grado de explotación sostenible en la masa de agua subterránea de 050.010 Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda. El modelo de flujo se realizó

CORREO ELECTRÓNICO

igme@igme.es

RÍOS ROSAS, 23
28003-MADRID
TELÉFONO: 91 349 5700
FAX: 91 442 6216

aplicando el difundido código en diferencias finitas MODFLOW (USGS, 1988), en la versión implementada en el paquete informático de modelación hidrogeológica Visual MODFLOW 2.8.1.105 (W.H. Inc., 1998).

El Informe se estructura en cuatro capítulos. En el primero de los mismos, se describen los distintos elementos -discretización, condiciones de contorno, zonificaciones- con los que se definió la estructura del modelo, así como la información sobre la que se basó esta actividad, comentándose el tratamiento dado a los datos.

En el siguiente capítulo se presenta la modelación en régimen estacionario, que corresponde a la situación hídrica media del período 1960/62 – 1994/95. Este escenario representaría el estado en régimen natural del acuífero, previa a la explotación del mismo. El capítulo se divide en dos secciones temáticas claramente diferenciadas. Su primer parte atiende al proceso de identificación del modelo conceptual del acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda, exponiéndose los sucesivos modelos considerados, sus fundamentos, rasgos y los resultados obtenidos en sus respectivas representaciones numéricas. En la segunda parte, se presenta el balance hídrico y la piezometría, así como análisis de sensibilidad, resultantes de la modelación en régimen estacionario del modelo conceptual que, en el proceso de identificación previo, se considero más consistente con la información que se tiene del sistema.

En el capítulo a continuación, se expone todo lo referente a la modelación en régimen transitorio: datos en que se basa, estructura del modelo, resultados de la calibración y en particular el balance hídrico. El régimen transitorio comprende el período 2000/01 – 2005/06, etapa en la que el acuífero ya se encuentra sometido a una fuerte explotación..

En el capítulo final correspondiente a las conclusiones del trabajo se expone la propuesta para una explotación sostenible del acuífero. Esta propuesta se considera una primera aproximación y se basa en los balances hídricos correspondientes a modelos del acuífero en regímenes estacionario y transitorio calibrados. En la siguiente sección se realiza una relación pormenorizada de los aportes resultantes de los trabajos numéricos presentados. Por último, se exponen las actuaciones, que los trabajos de modelación, indican como necesarios para avanzar en el conocimiento del acuífero Carbonatado de la Loma de



Úbeda, con la mejora consiguiente en lo que respecta a la definición de una explotación sostenible de este estratégico acuífero.

II. ESTRUCTURA DEL MODELO

II.1. Definición del dominio espacial

II.1.1. Sinopsis geológica del Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda

Esta síntesis extracta la descripción geológica e hidrogeológica realizada en el informe sobre la Masa de Agua Subterránea 050.010 por el Laboratorio Virtual Conjunto IGME-CEDEX (CEDEX, 2006). El acuífero carbonatado jurásico está constituido por dolomías liásicas de la cobertera tabular de la Meseta. Se trata de carbonatos fuertemente brechificados con una alta porosidad secundaria. Los materiales triásicos constituyen la base y el límite septentrional del acuífero. Hacia el sur se sumerge bajo los depósitos del Mioceno, que lo convierten en un acuífero confinado y en carga a escasa distancia de sus afloramientos. Los estudios geofísicos precedentes consultados no permiten definir el espesor de estos materiales en su sector confinado bajo el mioceno, pero los datos de los sondeos parecen confirmar que su espesor es mayor en el borde este, se mantiene en torno a unos 95 m en la zona central, y se acuña hacia su límite oeste (Figura 2.1).

La superficie total del acuífero jurásico es, aproximadamente, 880 Km². Presenta, en el Norte, un sector, de unos 250 Km², que funciona como acuífero libre y donde en su mayor parte afloran los carbonatos, si bien localmente quedan restos discontinuos de materiales margo-arenosos miocenos sobre el acuífero (Figura 2.1). Al Sur de este sector el acuífero se haya confinado por las margas del Mioceno, sobre las que se sitúa en el Suroeste el acuífero detrítico de Úbeda, constituido por calcarenitas del Mioceno superior. La extensión del sector confinado es de unos 630 Km². Los límites del sector libre lo definen los materiales triásicos. Respecto al sector confinado, hacia el oeste el acuífero desaparece progresivamente por acuñamiento; hacia el este lo limitan los cabalgamientos prebélicos que conforman el acuífero de Sierra de las Villas (Unidad de Cazorla) y hacia el sur el límite lo marcarían las Unidades Olitostrómicas de la Depresión del Guadalquivir.

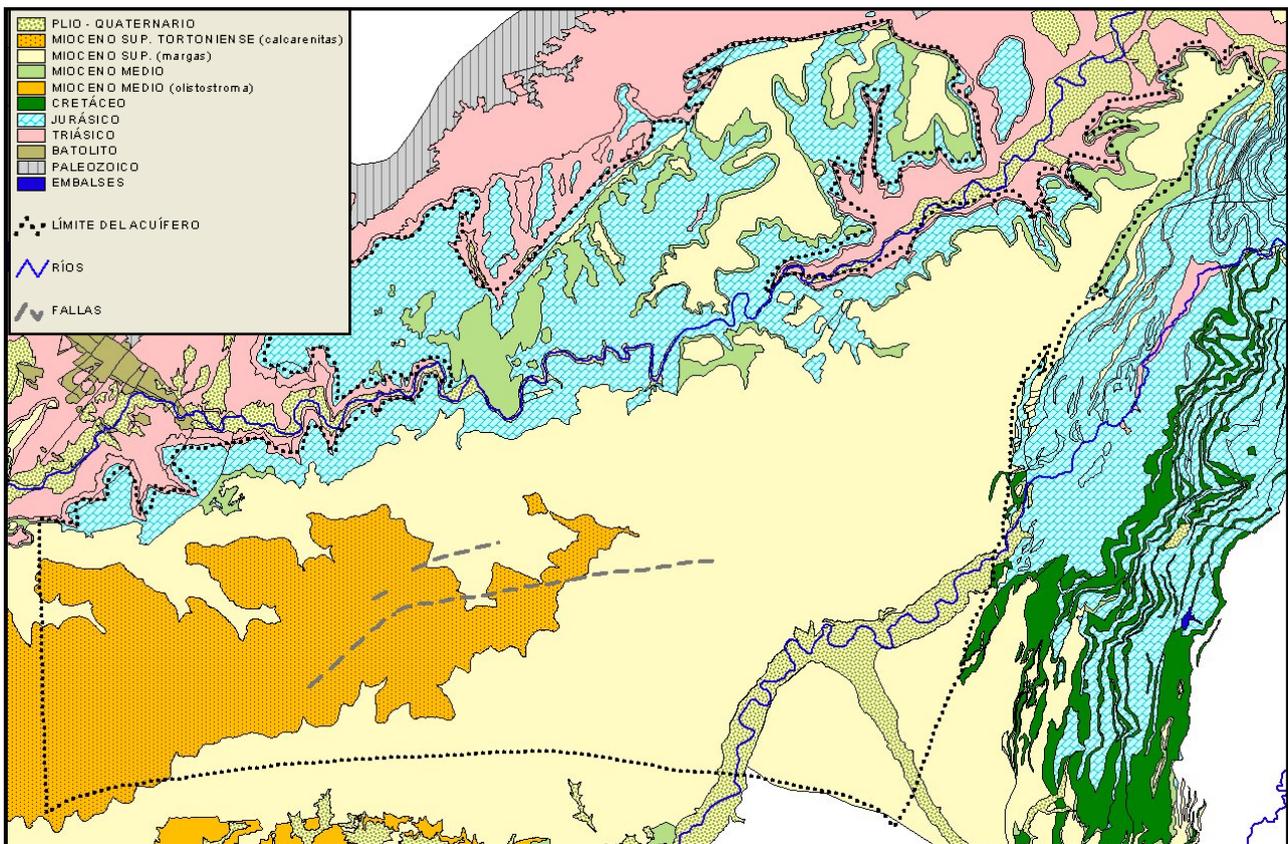


Figura 2.1. Esquema geológico general del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda

La superficie total del acuífero jurásico es, aproximadamente, 880 Km². Presenta, en el Norte, un sector, de unos 250 Km², que funciona como acuífero libre y donde en su mayor parte afloran los carbonatos, si bien localmente quedan restos discontinuos de materiales margo-arenosos miocenos sobre el acuífero (Figura 2.1). Al Sur de este sector el acuífero se haya confinado por las margas del Mioceno, sobre las que se sitúa en el Suroeste el acuífero detrítico de Úbeda, constituido por calcarenitas del Mioceno superior. La extensión del sector confinado es de unos 630 Km². Los límites del sector libre lo definen los materiales triásicos. Respecto al sector confinado, hacia el oeste el acuífero desaparece progresivamente por acuñamiento; hacia el este lo limitan los cabalgamientos prebéticos que conforman el acuífero de Sierra de las Villas (Unidad de Cazorla) y hacia el sur el límite lo marcarían las Unidades Olistostromáticas de la Depresión del Guadalquivir.

La zona de estudio se sitúa justo al este de la confluencia de los ríos Guadalimar y Guadalquivir, siendo atravesada de este a oeste por la divisoria de aguas de dichos ríos.

El río Guadalquivir atraviesa la unidad por el sureste, en la zona de acuífero cautivo y sobre un potente recubrimiento de margas, mientras que el río Guadalimar atraviesa los afloramientos del acuífero Jurásico de NE a SO, a lo largo de unos 25 km, con entrada al mismo a cotas de unos 580 m.s.n.m por su extremo nororiental y salida al sur a una cota de unos 340 m.s.n.m (Figura 2.2). El sector libre se extiende en su mayor parte en la margen derecha del río Gualdalimar, donde alcanza cotas de 900 a 750 m.s.n.m., en el límite norte. En la margen izquierda de dicho río los afloramientos del Jurásico se extienden a lo largo de una franja paralela al trazado del río limitada al sur por el recubrimiento del mioceno. Estos afloramientos sur varían desde cotas próximas a 600-700 m.s.n.m., en su extremo noroeste, a 340 m.s.n.m. en el punto en que el río Gualdlimara abandona el acuífero, para volver a subir de cotas entre 400 y 550 m.s.n.m. en el extremo este de esta franja.

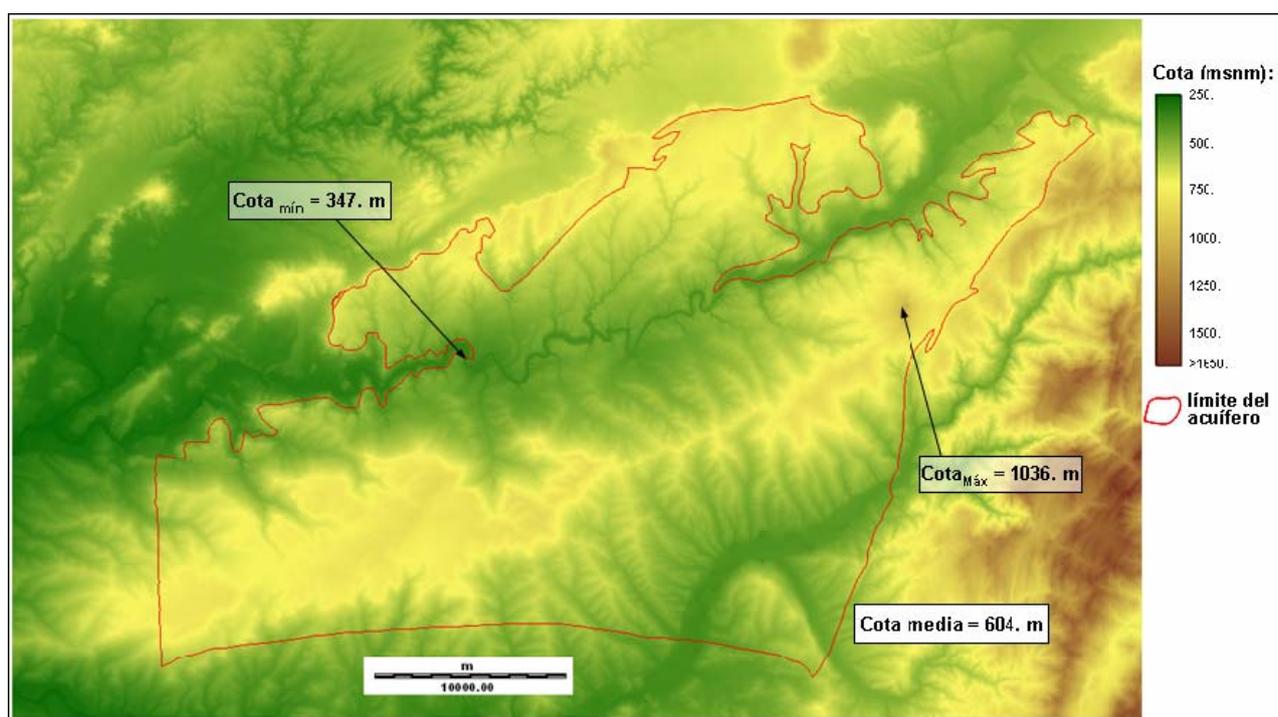


Figura 2.2. Modelo Digital del Terreno del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda

Los accidentes tectónicos que afectan al acuífero carbonatado, en algunos sectores, podrían provocar compartimentaciones internas del mismo, mientras que en otras zonas, dificultarían la conexión hidráulica en el acuífero confinado. Ello afectaría principalmente

al flujo en dirección NNO-SSE entre la franja que ocupa la mitad noroeste del sector donde empieza a estar confinado, en la que el acuífero se localiza a menos de 200 m de profundidad, y la franja que se extiende al sur, donde la profundidad del acuífero es de más de 400 m (Figura 2.3).

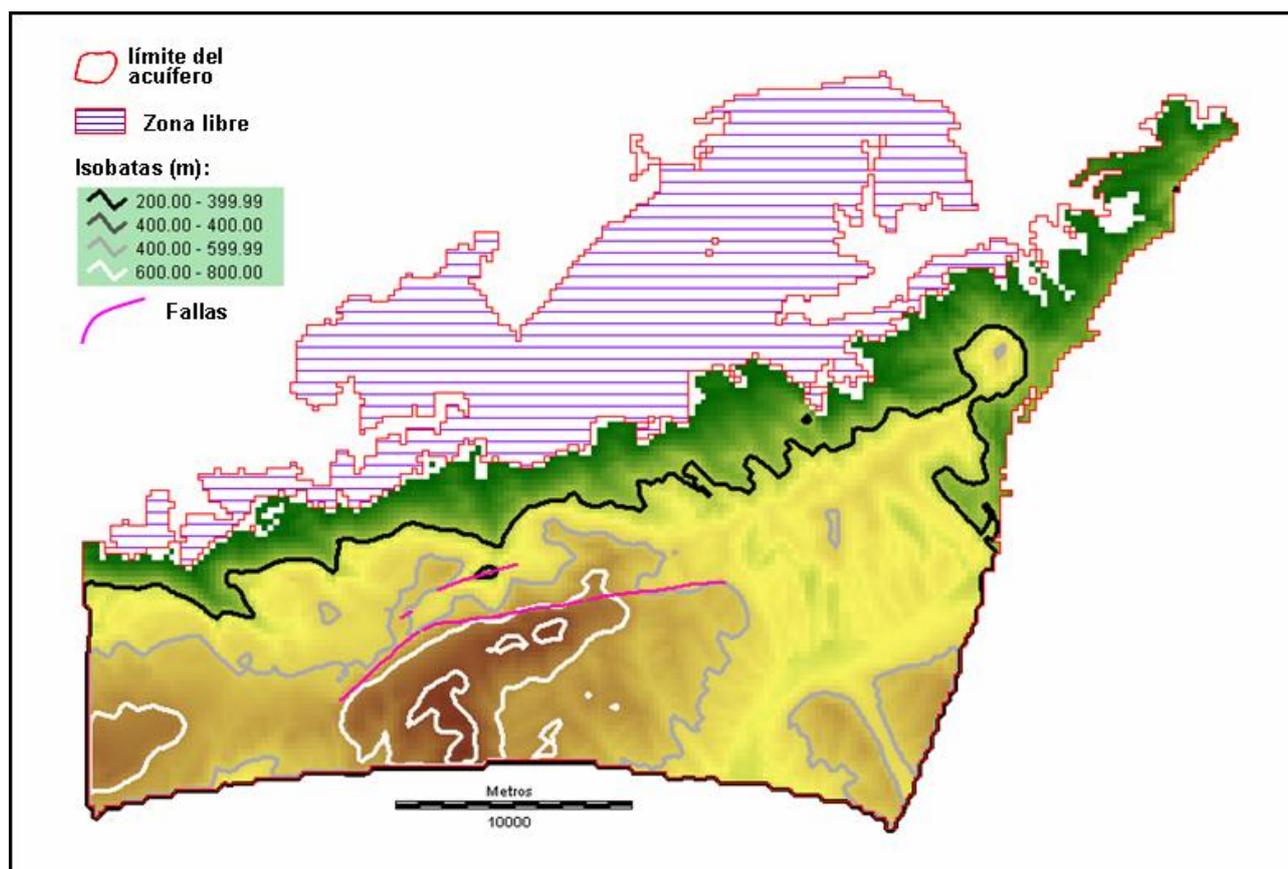


Figura 2.3. Isobatas y fracturas caracterizadas en el acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda

En una sucinta descripción de la estructura geológica del acuífero se observa que el mismo presenta un suave buzamiento, de 5° a 15° , hacia el sur-sureste, reposando directamente sobre los materiales triásicos. Sin embargo, información geofísica y sondeos mecánicos muestran que el jurásico posee una estructura compleja en sus afloramientos y sobre todo, en la zona en que está cubierto por el mioceno. Así, la profundidad a la que se sitúa el techo del jurásico aumenta desde unos 100 m a 1-2 km de sus afloramientos hasta superar los 700-800 metros en su límite Sur. (Figura 2.3). El contacto Jurásico-

Triásico define, en su corte con la topografía a ambos márgenes del río Guadalimar, un suave sinclinal con eje de dirección aproximada NNO-SSE, dando lugar a una depresión de unos 100 m de diferencia de cota en el sector central del acuífero Jurásico. Ello motiva que el Guadalimar atraviese materiales jurásicos en esa zona central, mientras que corta materiales triásicos aguas arriba y aguas abajo de la misma. Esta estructura suave en dirección NNE-SSO se hace más compleja hacia el Sur. En esta dirección los cambios estructurales son más bruscos, habiéndose identificado, ya bajo el recubrimiento de los materiales miocenos, una serie de fallas con saltos variables entre 30 y más de 100 m.

II.1.2. Definición geométrica del Acuífero Carbonatado

La compleja estructura geológica descrita en la sección anterior demandó un laborioso trabajo en la definición geométrica del acuífero, como paso previo para la elaboración del mallado del modelo numérico. No obstante, debido a su carácter discreto y a la profusión de accidentes tectónicos que afectan al acuífero carbonatado resulta extremadamente difícil la identificación y caracterización espacial exhaustiva de los mismos. Este hecho no es intrascendente, pues como se señaló en la sección anterior la magnitud de los saltos de las fracturas provocan tanto compartimentaciones internas del acuífero, como dificultades en la conexión hidráulica entre sectores del mismo. Ello distorsiona marcadamente el patrón de flujo, incide en el perfil hidroquímico e isotópico del acuífero y, en particular, debe ser considerado en la planificación de la gestión hídrica del acuífero.

Inicialmente, se contaban con 168 datos (Gollonet, 2006, comunicación personal) sobre la profundidad del techo y el muro del acuífero (Anexo I). Esta información procedía de 115 sondeos mecánicos, de los cuales 104 estaban emplazados en el sector confinado del acuífero y 11 en el libre, 47 sondeos eléctricos verticales (SEV) y 6 perfiles sísmicos. Una vez depurados estos datos se tuvo que 131 de ellos brindaban información sobre la profundidad del techo y 34 de la del muro (Anexo I). La extensión del acuífero, 880 km² aproximadamente, y la heterogénea distribución de los datos hace que los mismos resulten algo exiguos para caracterizar geoméricamente al acuífero (Figura 2.4). Sin embargo, estos datos no son el único soporte de información para la caracterización geométrica de las calizas jurásicas. El contacto de estas con los materiales miocenos suprayacentes brinda información sobre la cota del techo de los materiales carbonatados.

tuvieran un espesor mínimo para evitar su “secado indeseable”, o que celdas contiguas mantuvieran una continuidad geométrica con el fin de tener secciones comunes adecuadas o que los niveles prefijados asociados a distintas condiciones de contorno – ríos o drenes- fueran consistentes con la geometría tanto de sus respectivas celdas, como con la de las celdas vinculadas a la condición de contorno. Igualmente, se realizaron algunas modificaciones marginales de la geometría resultante de la interpolación para preservar la coherencia de esta con observaciones de campo.

La variable de interpolación fue la cota referida al nivel medio del mar ya sea del techo o del muro del acuífero. No se utilizó como variable la profundidad del techo o del muro, pues si bien la información primera que se posee es esta, si se la interpolara directamente la superficie resultante estaría en “términos de profundidad”. Debido a ello al restarse la misma a la superficie topográfica para obtener la superficie en “términos de cota”, que es como la requiere el modelo, la superficie final replicaría aproximadamente la morfología del terreno. Lo cual, si se tiene en cuenta la fuerte orografía de la región, probablemente no daría una geometría realista.

La interpolación se realizó mediante estimación con krigeado ordinario, si bien se realizó un contraste previo entre este método y el de la media de las distancias ponderadas. La interpolación obtenida con este último método no fue buena al estar muy condicionada por el emplazamiento de los datos, ello es debido a la densidad y heterogeneidad de la distribución de la información. Los pasos a seguir para la interpolación mediante kriging ordinario fueron los siguientes:

1. se investiga la existencia de ejes de anisotropía mediante variogramas superficiales muestrales, identificándose la longitud y número de intervalos adecuados.
2. se obtienen los variogramas experimentales direccionales acorde a los ejes de anisotropía. No obstante, se investigan otras direcciones posibles. Se selecciona la dirección y variograma pertinente.
3. al variograma experimental se le ajusta un variograma teórico; seleccionándose para ello un modelo teórico al que se le calibran el alcance, la meseta y la pepita.

4. se contrasta de la bondad del variograma teórico mediante la validación cruzada.
5. se interpola mediante la estimación con el variograma teórico calibrado.

Primeramente se obtuvo la superficie de del techo del acuífero sin considerar la existencia de las fracturas que se han caracterizado (Figura 2.3). La información considerada fueron tanto los 131 puntos en los que se podía estimar la cota de techo del acuífero (Figura 2.4, Anexo I), como el contacto entre este y la formación miocena suprayacente donde, de hecho, se puede medir directamente la cota del techo (Figura 2.5).

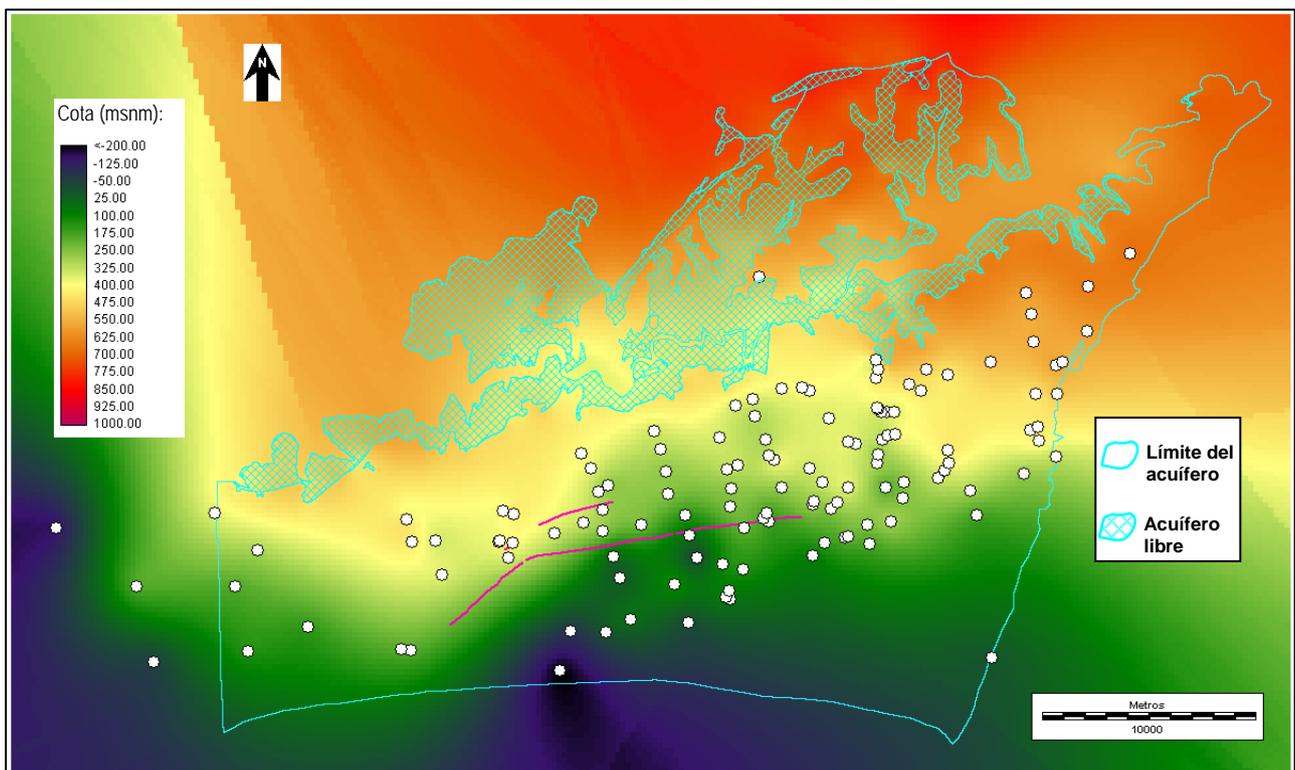
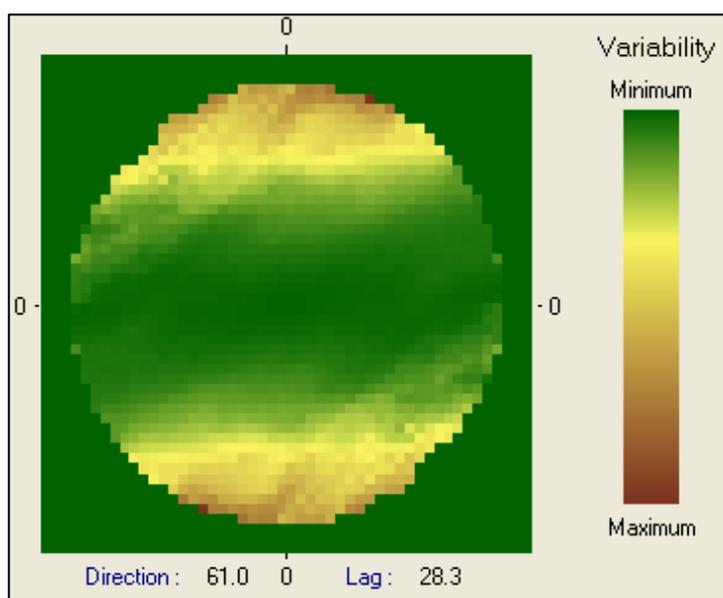


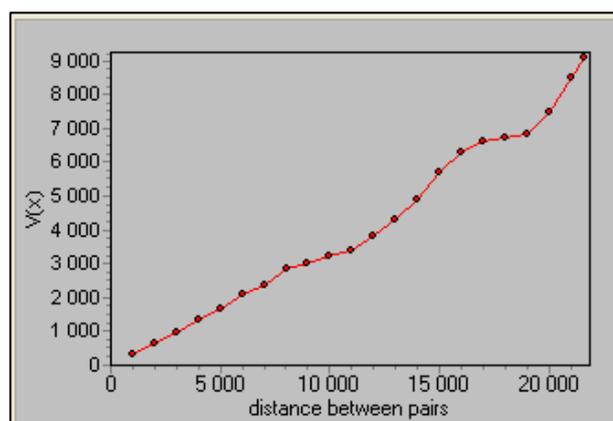
Figura 2.5. Puntos con información de cota del techo del acuífero carbonatado y superficie de techo interpolada sin considerar la existencia de fracturas y del proceso erosivo.
(Obs.: se indican las fallas interpretadas)

El variograma superficial con 20 pasos de una longitud de 1 km indica claramente una dirección de mínima varianza en torno a los 85° (Figura 2.6.a). El análisis de los variogramas experimentales direccionales permite identificar como dirección de anisotropía la de 86° (Figura 2.6.b). El variograma teórico que se ajusta es un modelo esférico con un alcance de 35 km y una meseta de 8400 m^2 . Sin embargo, resulta evidente que se puede

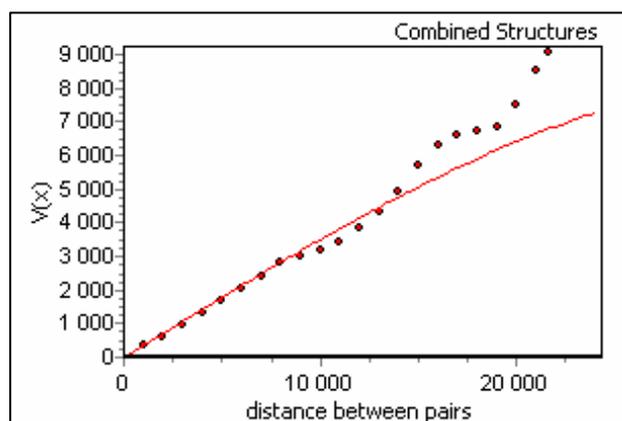
considerar que el variograma teórico sólo describe correctamente al variograma muestral hasta los 10 a 12 km. (Figura 2.6.c). Este hecho va a ser determinante al interpolar la superficie, pues al realizar la interpolación de la superficie del techo del acuífero, sin considerar existencia de fracturas ni de proceso erosivo alguno, se utilizaron datos que distaban menos de 10 km del punto a estimar. La superficie de techo resultante se aprecia en la Figura 2.5.



a. Variograma superficial



b. Variograma direccional 86° experimental



c. Variograma direccional 86° teórico

Figura 2.6. Krigin ordinario para interpolar la superficie de techo sin considerar fracturas

La escasez de datos (34 puntos) para abordar la interpolación de la superficie de muro demandó incrementar la información soporte de la interpolación del muro. Para ello, a partir de 32 sondeos que ofrecían datos sobre la potencia del acuífero se decidió restituir la misma para toda la superficie del acuífero, sin considerar que se hubiese producido proceso erosivo alguno. La restitución se realizó mediante una interpolación con krigin ordinario, se aplicó un variograma teórico esférico de alcance 6000 m, meseta 300 m² y pepita nula que fue resultante del ajuste del variograma experimental. La restitución de la potencia del paquete calizo permitió estimar la cota de muro del acuífero en los 109 puntos del sector confinado en los que sólo se conocía la cota del techo. Ver Figura 2.7. Debe observarse en esta figura que los datos situados, aproximadamente, en el cuartil más oriental del dominio indican un incremento de potencia del acuífero desde los 90 m hasta los 162 m, en el extremo este. Esta evolución de los datos se ve reflejada en la superficie interpolada. Sin embargo, se considera que no es correcto interpretar que las columnas litológicas de los sondeos indican una tendencia en el incremento de la potencia en el extremo oriental del acuífero. Antes bien, se interpreta que las columnas indican el espesor que atraviesan de las escamas situadas en esta zona de la formación, las cuales van incrementado su buzamiento hacia el este. Debido a ello los datos sugieren ese aparente incremento de la potencia de la formación. Sin embargo, estrictamente, se considera que la potencia del acuífero tabular en su sector confinado varía entre los 70 m y algo menos de los 100 m.

La información con la que se abordó la interpolación del muro fueron los 34 puntos y el contacto entre el Trías y las calizas jurásicas, que ofrecen una referencia directa de la cota de muro y la información auxiliar dada por los 109 puntos y el contacto entre el sector confinado y el libre del acuífero, donde la cota de muro se estimó a partir de una cota de techo conocida y la potencia resultante de la interpolación (Figura 2.8). La restitución del muro se realizó mediante interpolación por estimación krigado ordinario. No se optó restituir el muro por diferencia entre la superficie del techo y la potencia estimados por los motivos siguientes:

- La superficie de muro resultante en este caso sería dependiente de la superficie de techo interpolada, replicándola.

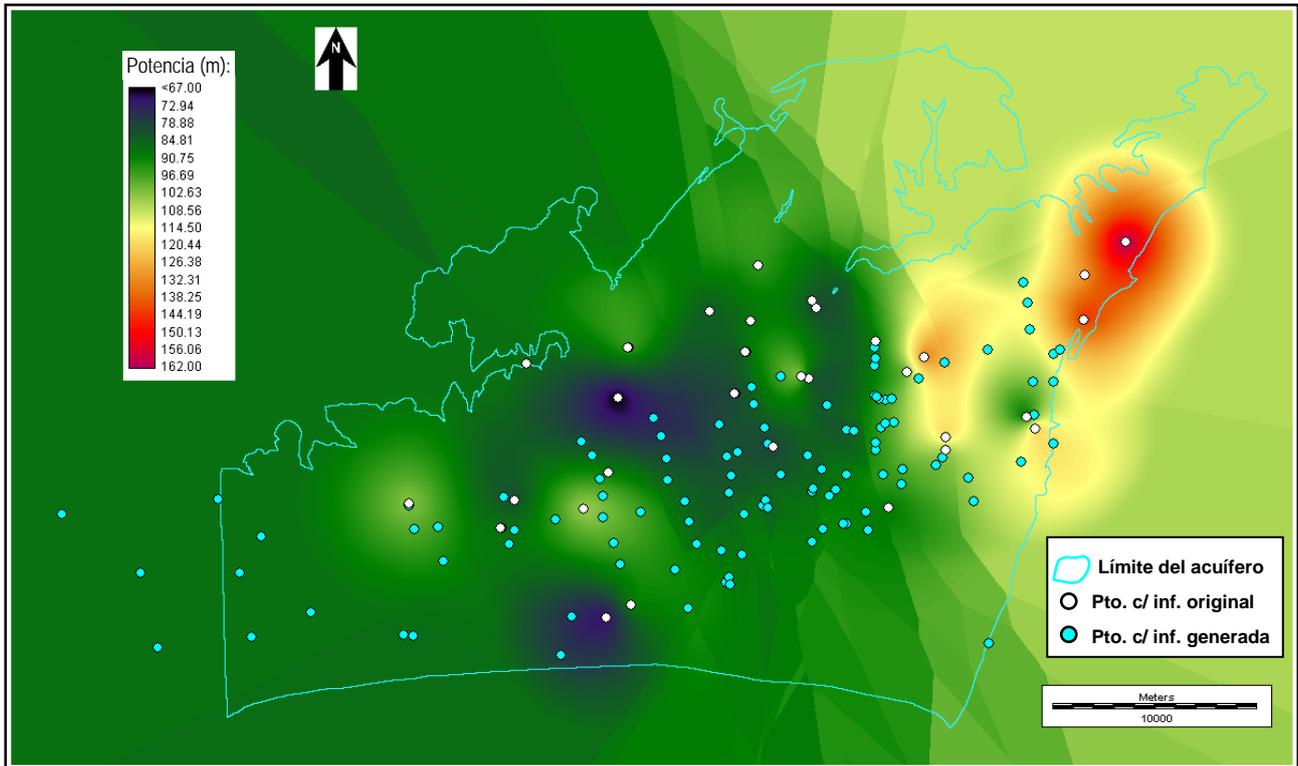


Figura 2.7. Potencia restituída del acuífero para generar información complementaria para la interpolación de la superficie de la cota de muro.

- Se desaprovecharía la importante referencia que ofrece respecto a la cota de muro el contacto entre las calizas jurásicas y el Trías, dado que este se encuentra a muro de aquellas.
- No se resolvería adecuadamente la definición del muro en el sector libre del acuífero.

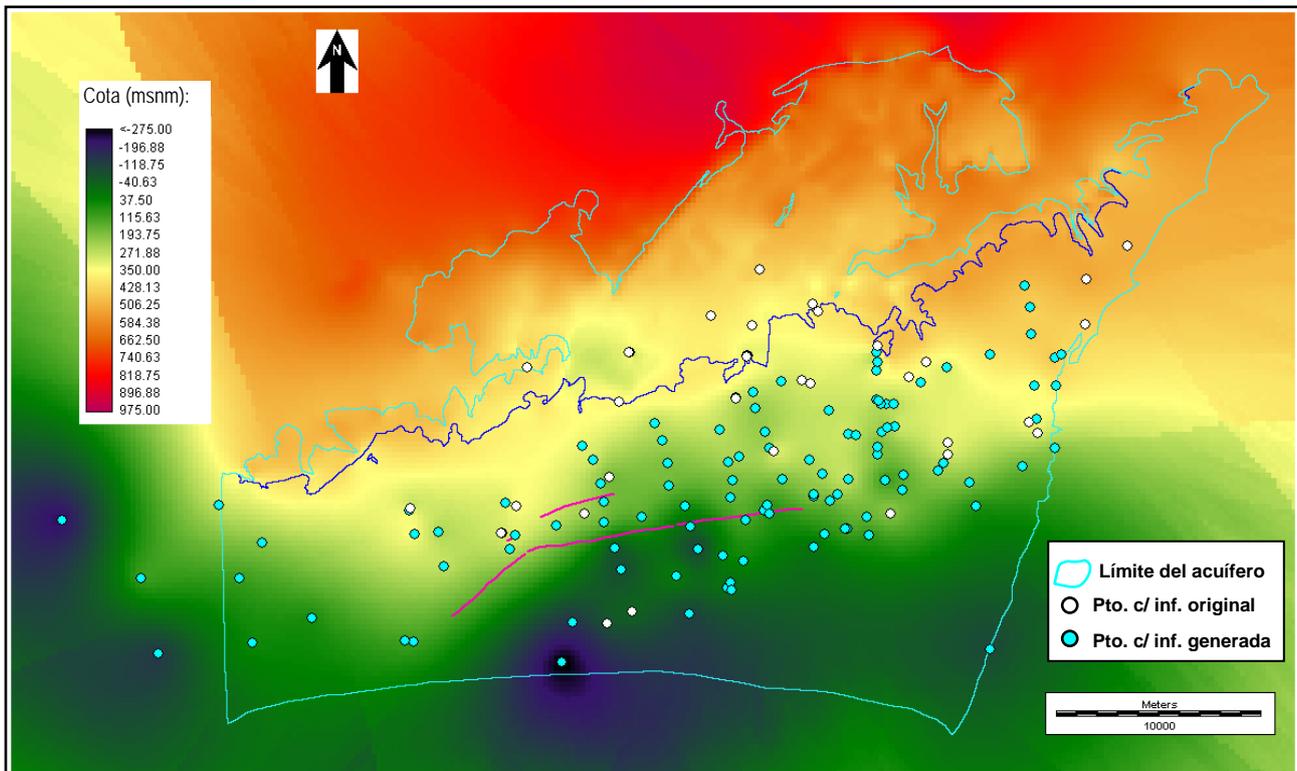
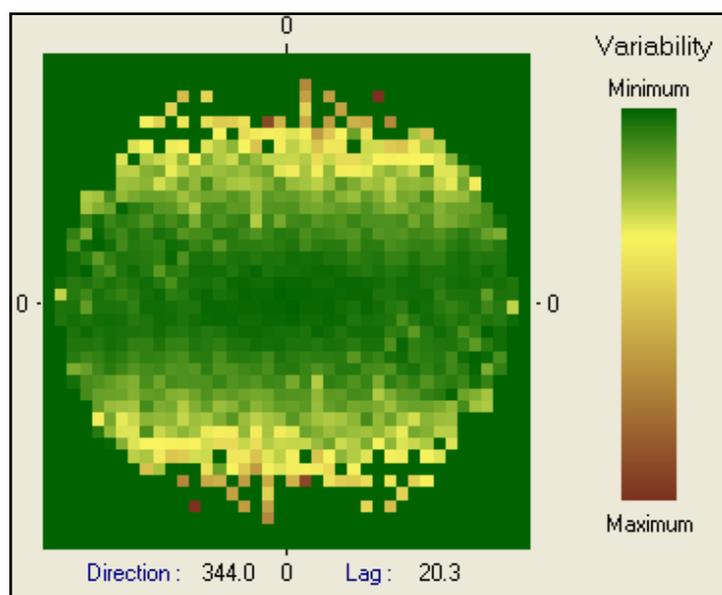
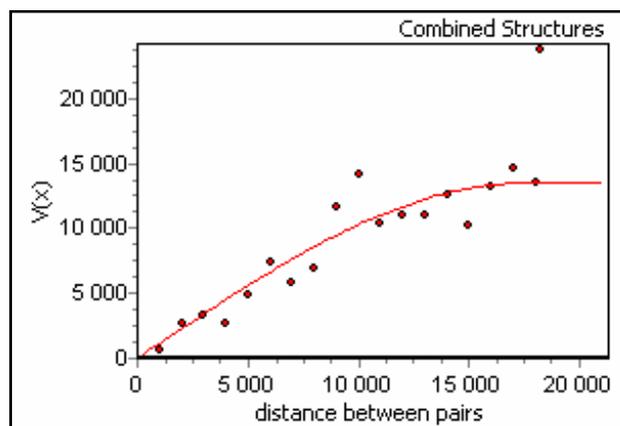
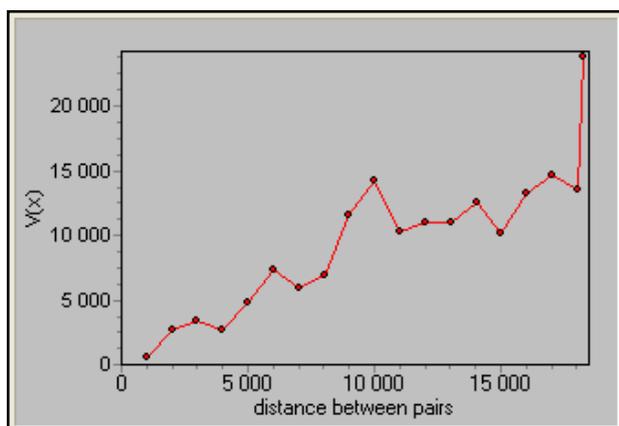


Figura 2.8. Puntos con información original y generada sobre la cota del techo del acuífero carbonatado y superficie de muro interpolada sin considerar la existencia de fracturas y del proceso erosivo.

La información con la se definió el variograma teórico con el que se realizó la interpolación fueron los 34 puntos que ofrecen una información directa y los 109 inferidos indirectamente. El variograma superficial con 20 pasos de una longitud de 1 km indica una dirección de mínima varianza entre los 80° y los 100° (Figura 2.9.a), aproximadamente. El análisis de los variogramas experimentales direccionales permite identificar como dirección de anisotropía la de 100° (Figura 2.9.b). El variograma teórico que se ajusta es un modelo esférico con un alcance de 17.5 km y una meseta de 13500 m^2 y pepita nula (Figura 2.9.c). La interpolación se realizó considerando toda la información, tanto de los puntos, como de los contactos ya descritos. Finalmente, la superficie de muro se modifica de forma tal que guarde coherencia con la superficie de techo interpolada y con espesores mínimos que garanticen aspectos de estabilidad numérica en el modelo (Figura 2.8).



a. Variograma superficial



b. Variograma direccional 100° experimental

c. Variograma direccional 100° teórico

Figura 2.9. Krigin ordinario para interpolar la superficie de muro sin considerar fracturas

La compleja estructura tectónica que afecta a las calizas jurásicas sólo ha podido ser representada en sus rasgos más relevantes, esto es en las grandes fallas cartografiadas (figuras 2.4) y en sectores del acuífero donde fortuitamente se pudieron identificar saltos de la formación atribuibles a fallas. Las grandes fallas cartografiadas permitieron redefinir la geometría del conjunto del acuífero mediante el proceso que se describe a continuación. Los saltos de la formación atribuibles a fallas llevaron a una modificación de la geometría restituida limitada estrictamente al ámbito espacial en que se observaron los

correspondientes saltos. Estas modificaciones específicas fueron las últimas actuaciones que se realizaron en el proceso de restitución geométrica del acuífero.

Acerca de las grandes fallas cartografiadas se conocía su buzamiento y salto. Este salto se impuso a la superficie restituida del techo del acuífero sin considerar la existencia de fallas (Figura 2.5). Al adoptarse la hipótesis que, en el sitio de las fallas, esta superficie restituida ofrecía una cota media del techo del acuífero, se pudieron presuponer cotas verosímiles para ambos labios de las fallas. Las cotas supuestas de los labios de las fallas se sumaron a la información con la que se restituyó la superficie del techo ya referida: los 131 puntos en donde se conocía la cota y el contacto entre las calizas y la formación miocena donde se puede medir directamente la cota del techo (Figura 2.10).

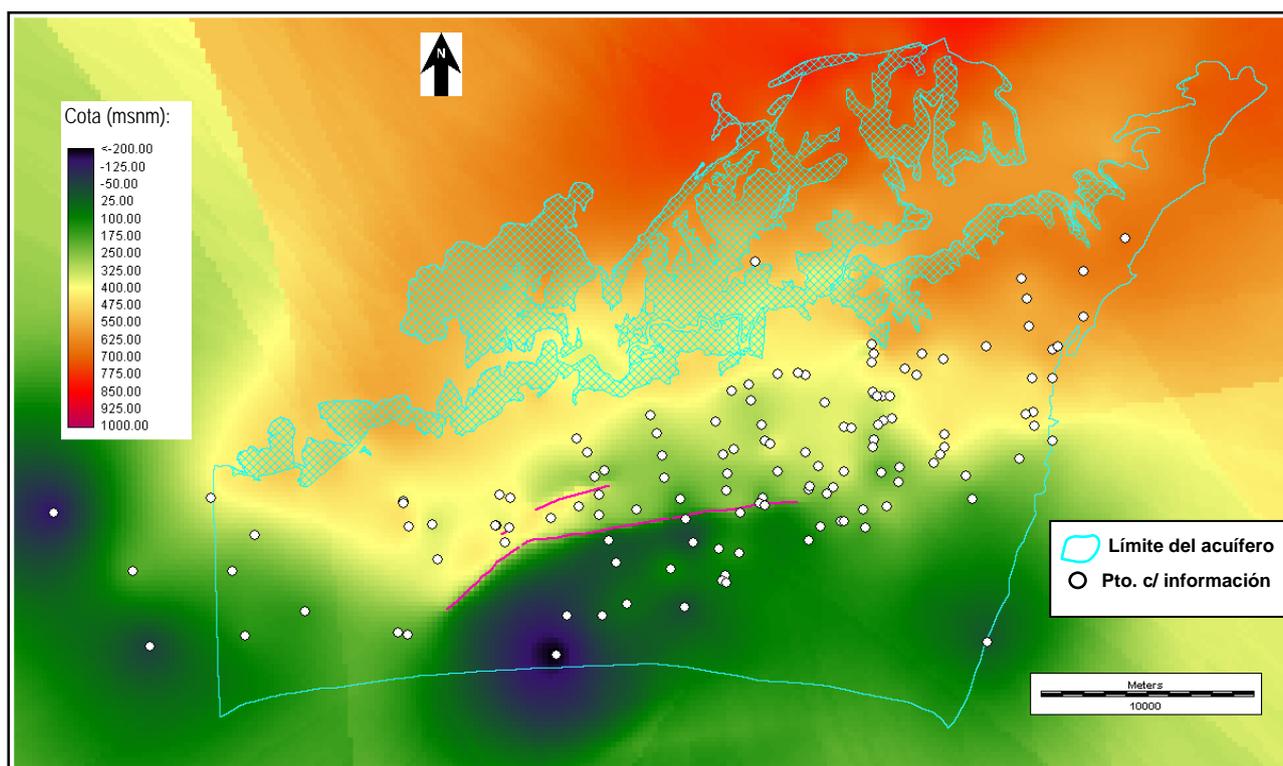
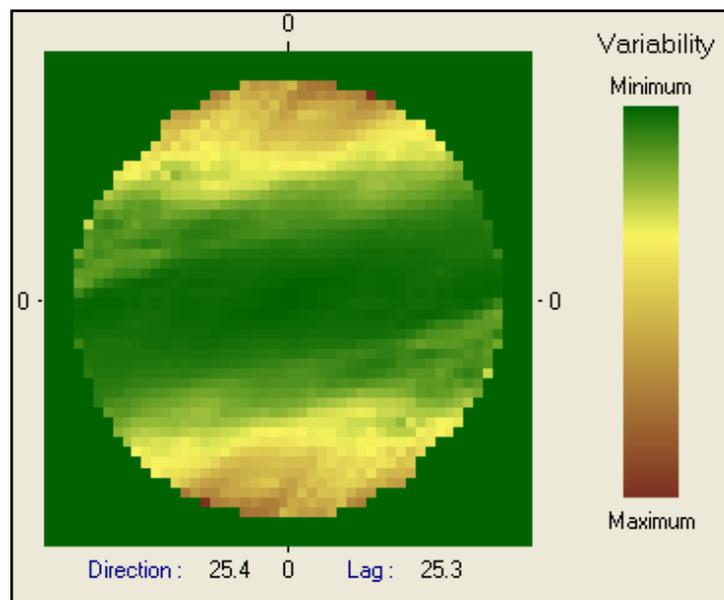


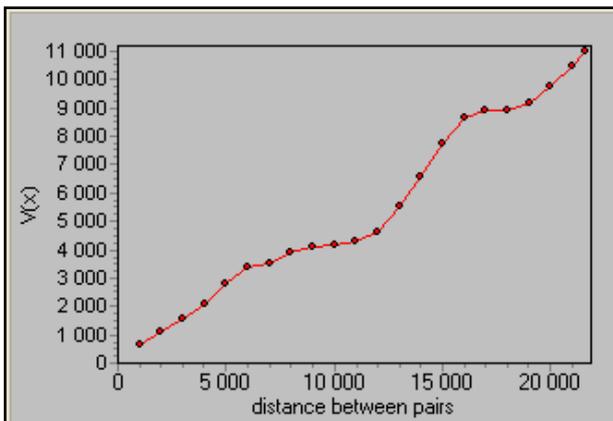
Figura 2.10. Información de la cota del techo del acuífero carbonatado y superficie de techo interpolada considerando la existencia de fracturas.

El variograma superficial con 22 pasos de una longitud de 1 km indica claramente una dirección de mínima varianza en torno a los 85° (Figura 2.11.a). Al analizar los variogramas experimentales direccionales se identifica como dirección de anisotropía la

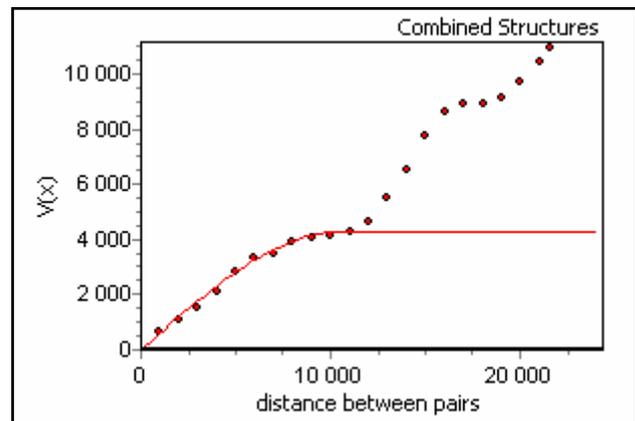
de $86^{\circ} 30'$ (Figura 2.11.b). El variograma teórico que se ajusta es un modelo esférico con un alcance de 10.55 km y una meseta de 4300 m^2 . Sin embargo, se considera que el variograma teórico sólo describe correctamente al variograma muestral hasta los 12 km. (Figura 2.11.c). Este hecho es determinante al interpolar la superficie, pues al realizar la nueva interpolación de la superficie del techo del acuífero considerando existencia de fallas se utilizan datos que distan menos de 10 km del punto a estimar. La superficie de techo resultante se expone en la Figura 2.10.



a. Variograma superficial



b. Variograma direccional 86.5° experimental



c. Variograma direccional 86.5° teórico

Figura 2.11. Krigin ordinario para interpolar la superficie de techo considerando fracturas

Finalmente, en el sector libre del acuífero, donde las calizas jurásicas no se encuentran cubiertas por la formación miocena se impone como techo del acuífero la cota del terreno natural (Figura 2.12). El muro se redefinió de forma que mantenga su coherencia con la superficie de techo que considera las fallas (Figura 13.a). La potencia final del acuífero se expone en la Figura 2.13.b.

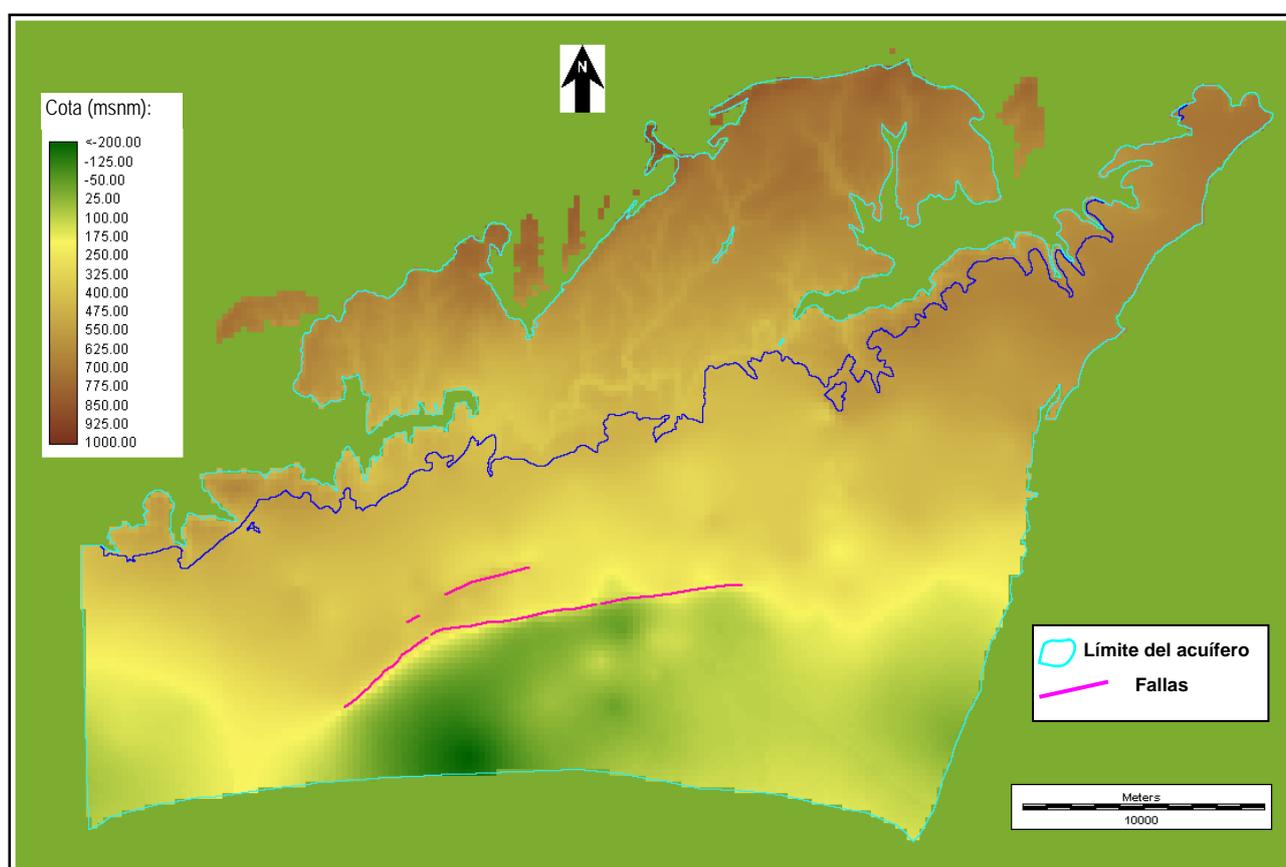


Figura 2.12. Superficie final del techo del acuífero

II.1.3. Definición del dominio y discretización espacial del modelo

Los límites del dominio del modelo vienen dados al norte por el contacto con los materiales triásicos, al sur por la presencia de las Unidades Olistroómicas de la

Depresión del Guadalquivir y al este por la desaparición progresiva de las calizas jurásicas por acuñamiento. Así, los límites meridional, septentrional y occidental del dominio coinciden con los del acuífero. El límite oriental del dominio no coincide con el del acuífero y se fija donde se estimaba que desaparecía la estructura tabular de las calizas jurásicas para dar paso a una estructura en escamas.

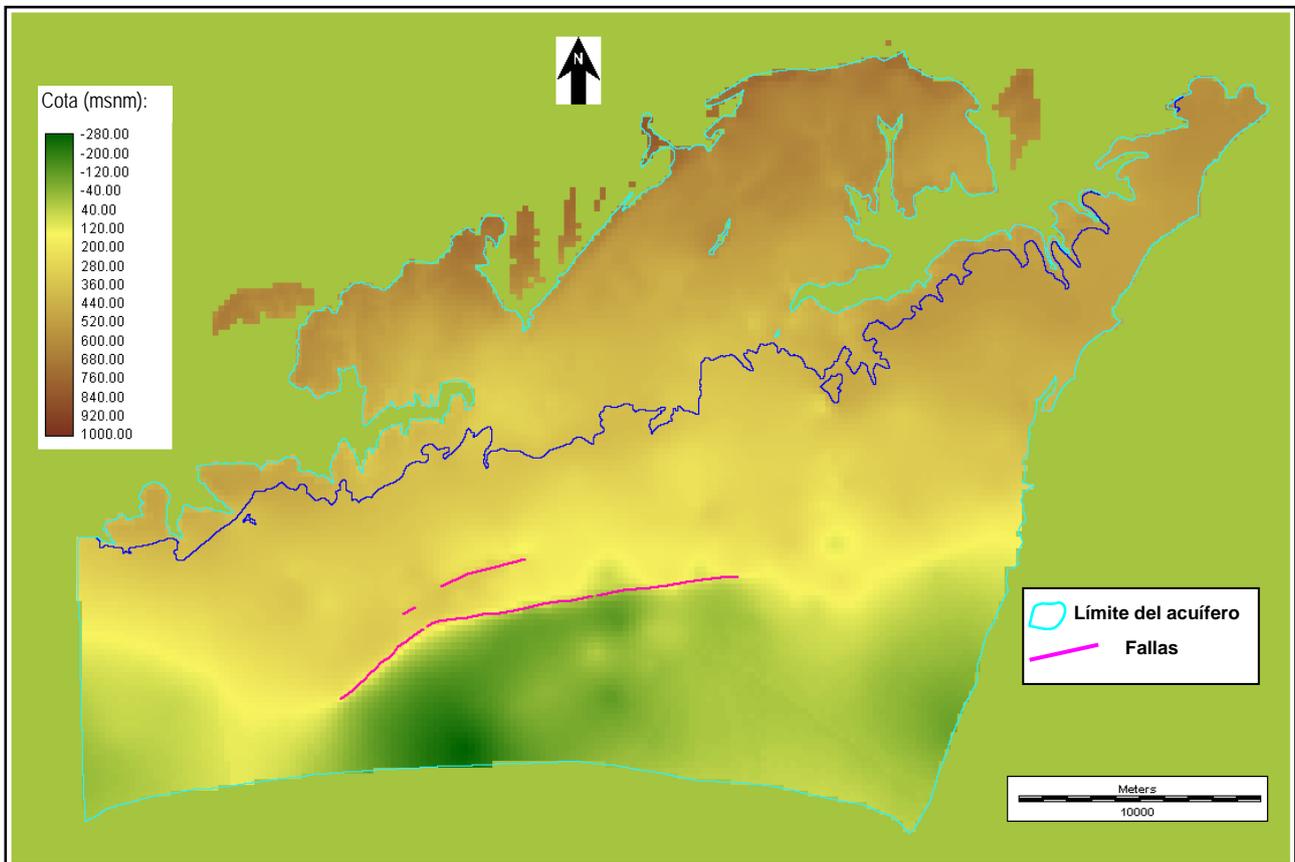


Figura 2.13.a. Superficie final del muro del acuífero

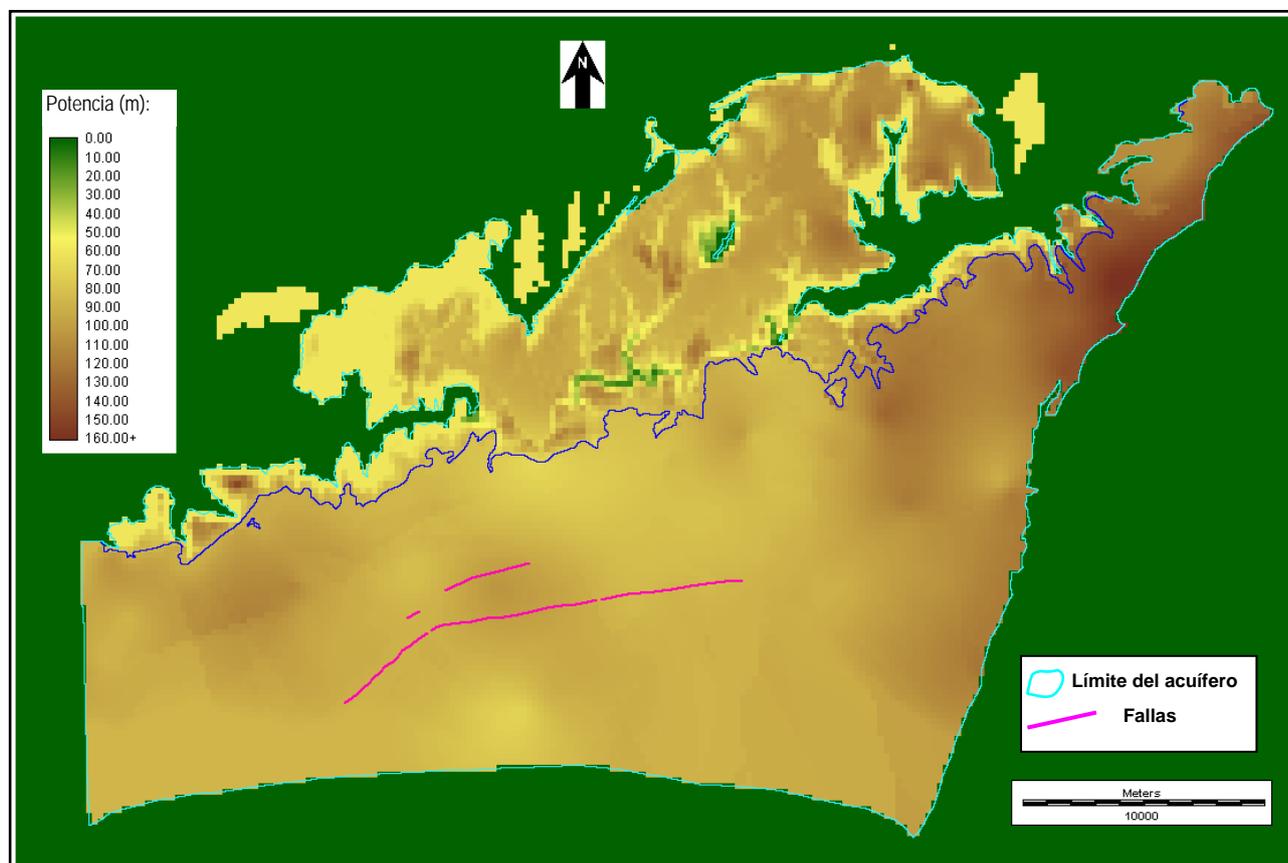


Figura 2.13.b. Potencia final del acuífero

La evolución de la discretización espacial del dominio es fiel reflejo de la evolución del modelo conceptual del acuífero, en la medida que se fue incrementado el conocimiento que se tenía del mismo y en particular de su geometría. Inicialmente, en un premodelo del mismo (IGME, 2005) cuando aún no se habían caracterizado las grandes fallas y los interrogantes del estudio estaban centrados en el ámbito del paso de libre a confinado del acuífero y en la relación de este con el río Guadalimar se trabajó con una malla que se refinaba progresivamente. En la cual las celdas variaban progresivamente, tanto en la dirección X como en la Y, desde 1 km, en las zonas periféricas del dominio hasta 250 m en las zonas de mayor interés de estudio (Figura 2.14).

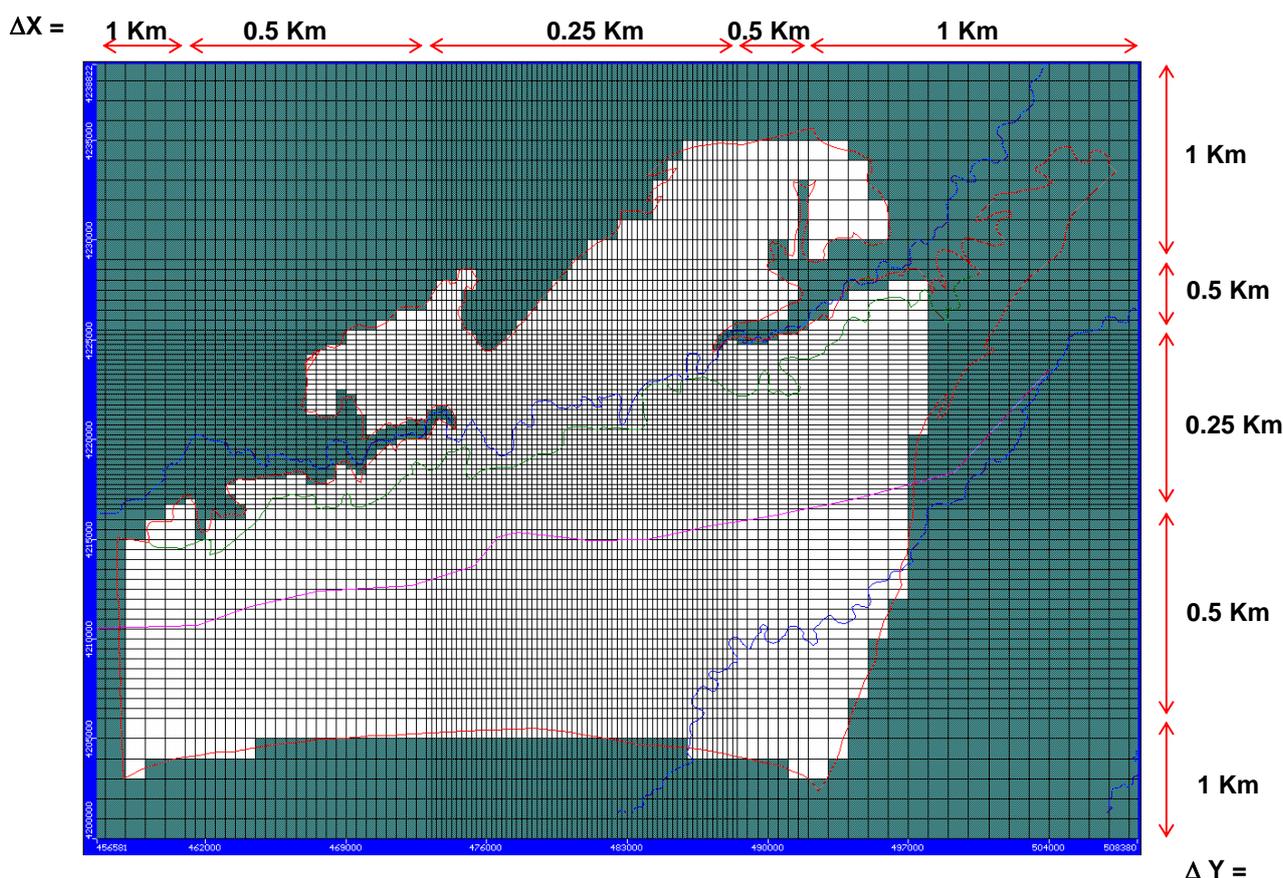


Figura 2.14. Discretización espacial del premodelo del acuífero carbonatado de Úbeda

Una mejor caracterización geométrica del acuífero y, en particular, de sus estructuras tectónicas más relevantes obligó, más que permitió, a realizar un mayor refinamiento de la malla. Así se adoptó para todo el dominio una celda de dimensión de 250. m x 250. m (Figura 2.15). En sucesivos cortes norte-sur (columnas 92, 124 y 156), ver Figura 2.16.a, y este-oeste (filas 87, 107 y 126), ver Figura 2.16.b, se puede apreciar la complejidad geométrica del acuífero, ya referida.

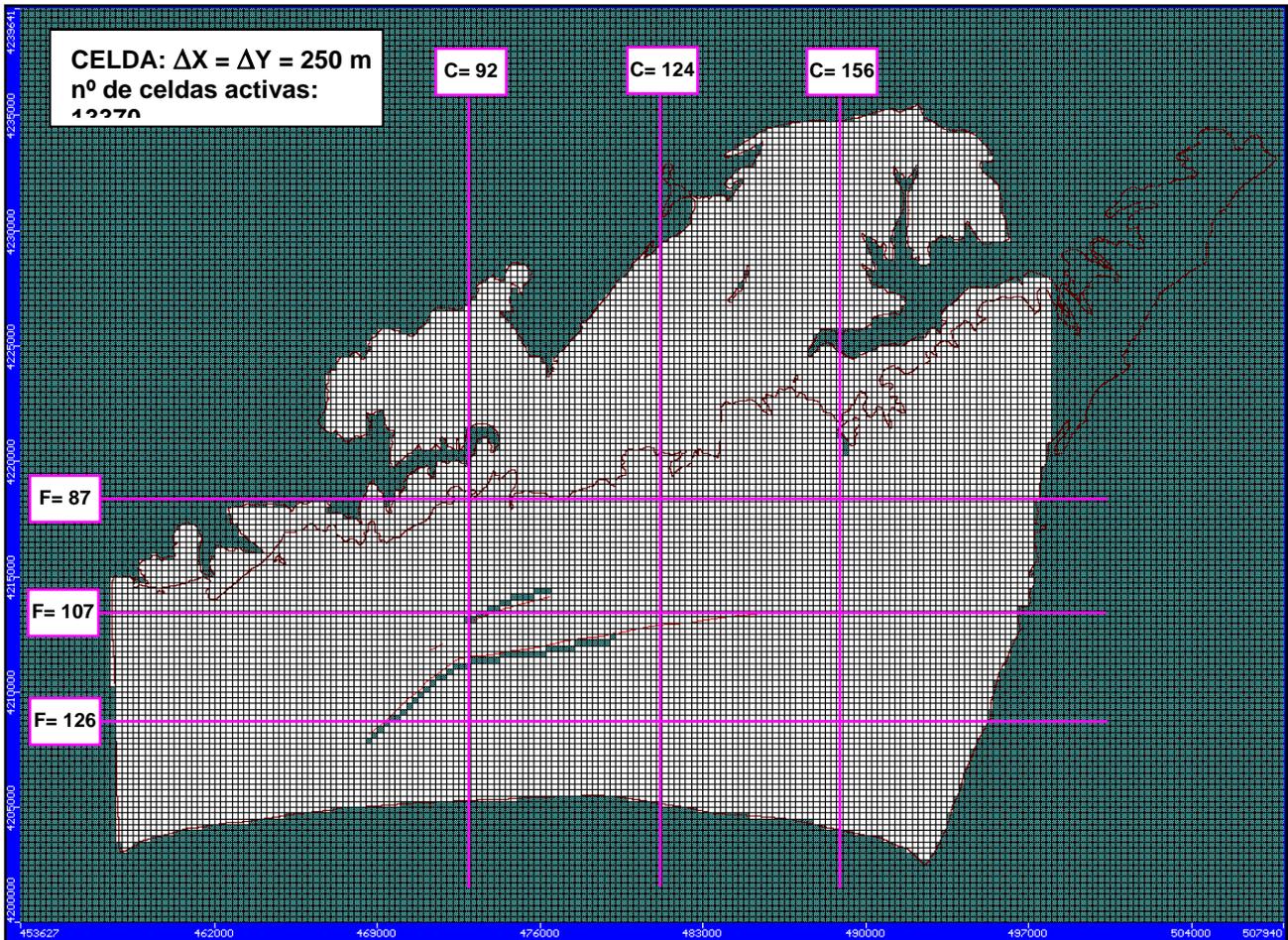


Figura 2.15. Discretización espacial del modelo del acuífero carbonatado de Úbeda

II.2. Definición del dominio temporal. Discretización

El régimen estacionario del modelo representa la situación media del período comprendido entre los años hidrológicos 1960/61 y 1994/95. Este período se supone representa una situación en régimen natural no influenciado. Debe observarse que la piezometría con la que se calibró el modelo estacionario corresponde al año 1996, por lo que implícitamente se asume que la explotación del acuífero en dicho año distaba mucho de ser relevante. No obstante, en la discusión de resultados del modelo en régimen estacionario comentaremos las limitaciones de la calibración bajo hipótesis de considerar que se representa un estado del acuífero “natural y no influenciado”.

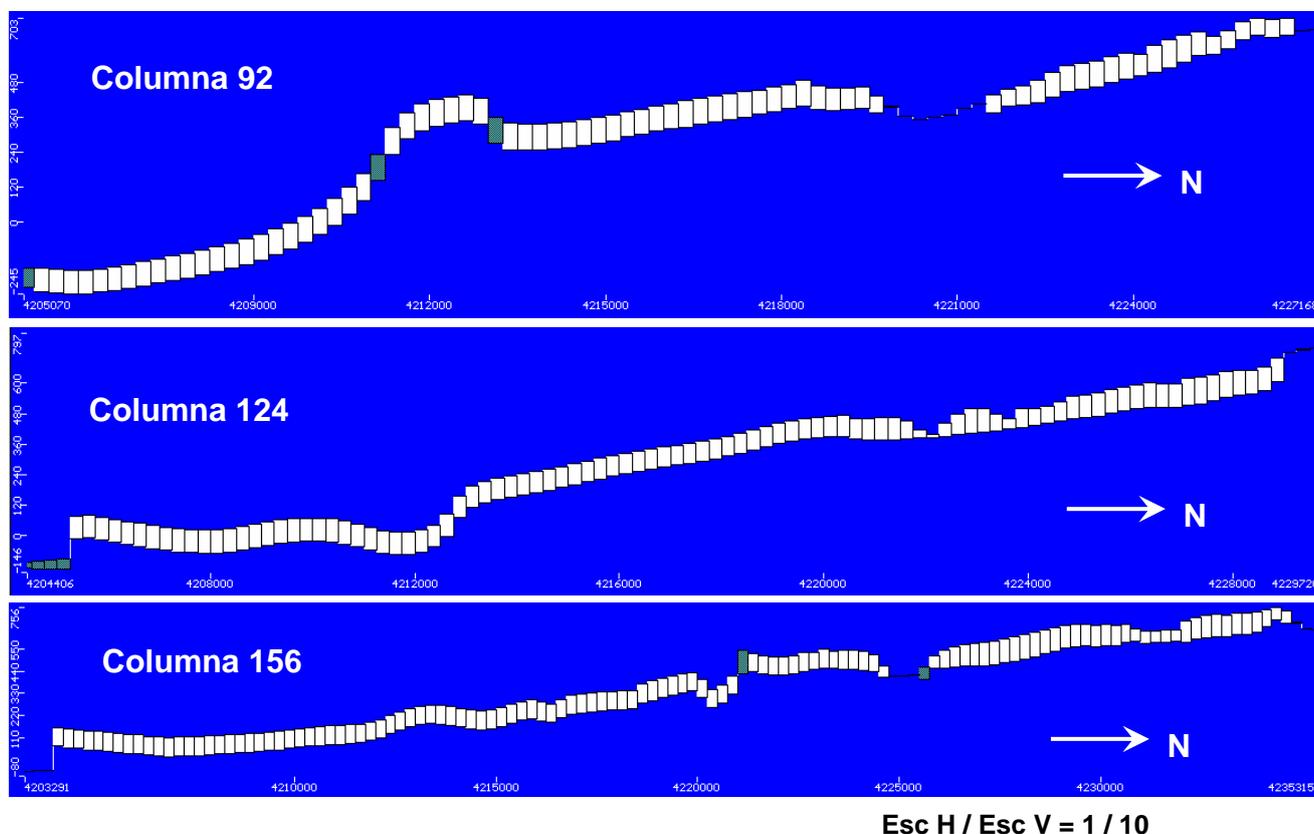


Figura 2.16.a. Discretización espacial: columnas, cortes N-S

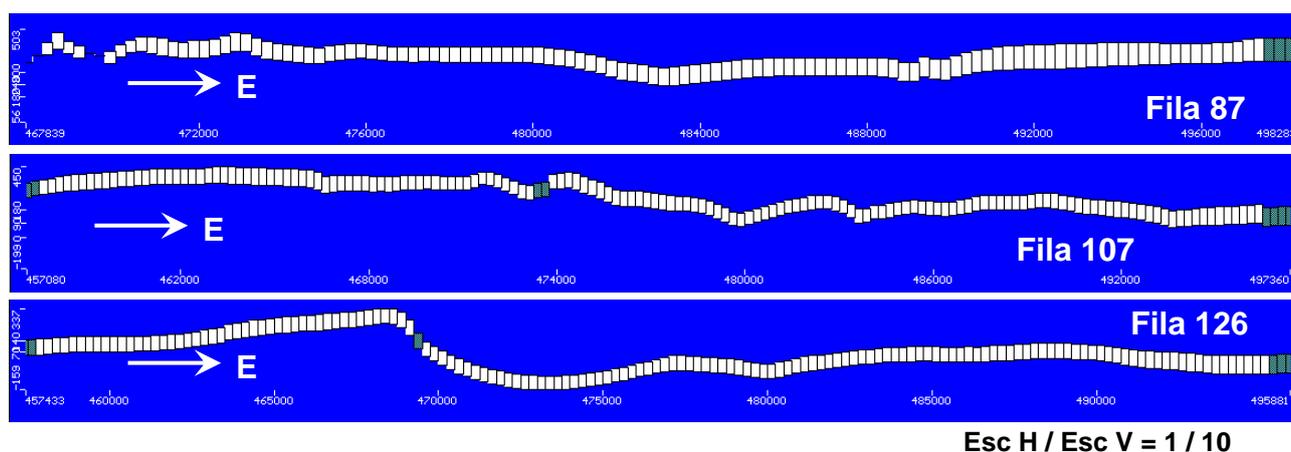


Figura 2.16.b. Discretización espacial: Filas, cortes E-O

El régimen transitorio del modelo representa el período comprendido entre los años hidrológicos 2000/01-2005/06. Período durante el cual la explotación del acuífero es

importante y durante el cual se evidencia un notorio descenso de niveles. La partición temporal se realiza en intervalos mensuales, durante los cuales las perturbaciones que sufre el acuífero -recargas y extracciones- y demás condiciones de contorno se definen constantes. Sin embargo, los intervalos de cálculo, esto es el intervalo de tiempo para el que se resuelve la ecuación de flujo, se definieron como la décima parte de los intervalos mensuales, con la excepción de la primera partición temporal que se definió de un día. Así, el período temporal entre la condiciones iniciales del modelo y el primer día se particionó en 10 intervalos de cálculo.

La piezometría inicial -condición inicial- para la modelar el régimen transitorio fue variando acorde se variaba la estructura de modelo a calibrar. Así, se fueron definiendo para cada estructura de modelo su respectiva condición inicial.

II.3. Condiciones de contorno

II.3.1. Límite perimetral del dominio del modelo: límite impermeable y nivel fijo, H

En la mayor parte del límite perimetral del acuífero se impuso una condición de contorno de borde impermeable (Figura 2.17). Esta condición de contorno es consistente con el conocimiento que se tiene en los límites norte, contacto con el triás, y oeste, donde el acuífero desaparece por su acuñamiento progresivo. Sin embargo, hacia el este donde la estructura tabular del acuífero da paso a una estructura de escamas, la definición de un borde impermeable como condición de contorno presenta una apreciable incertidumbre. Los trabajos de investigación realizados hasta el presente no han permitido caracterizar adecuadamente este límite, se especula plausiblemente con que exista una percolación desde las escamas hacia el acuífero. Sin embargo, ni la hidroquímica, ni los datos isotópicos ni la piezometría han permitido identificar flujo alguno procedente desde las escamas. Por todo ello, se optó por imponer una condición de contorno de borde impermeable, asumiendo la incertidumbre conceptual que ello implica. Debe observarse, que dentro del trabajo de modelación se realizaron estudios numéricos en procura de identificar la naturaleza de este límite este del acuífero, aunque no se obtuvo resultado alguno que permitiera revisar la condición de borde impermeable.

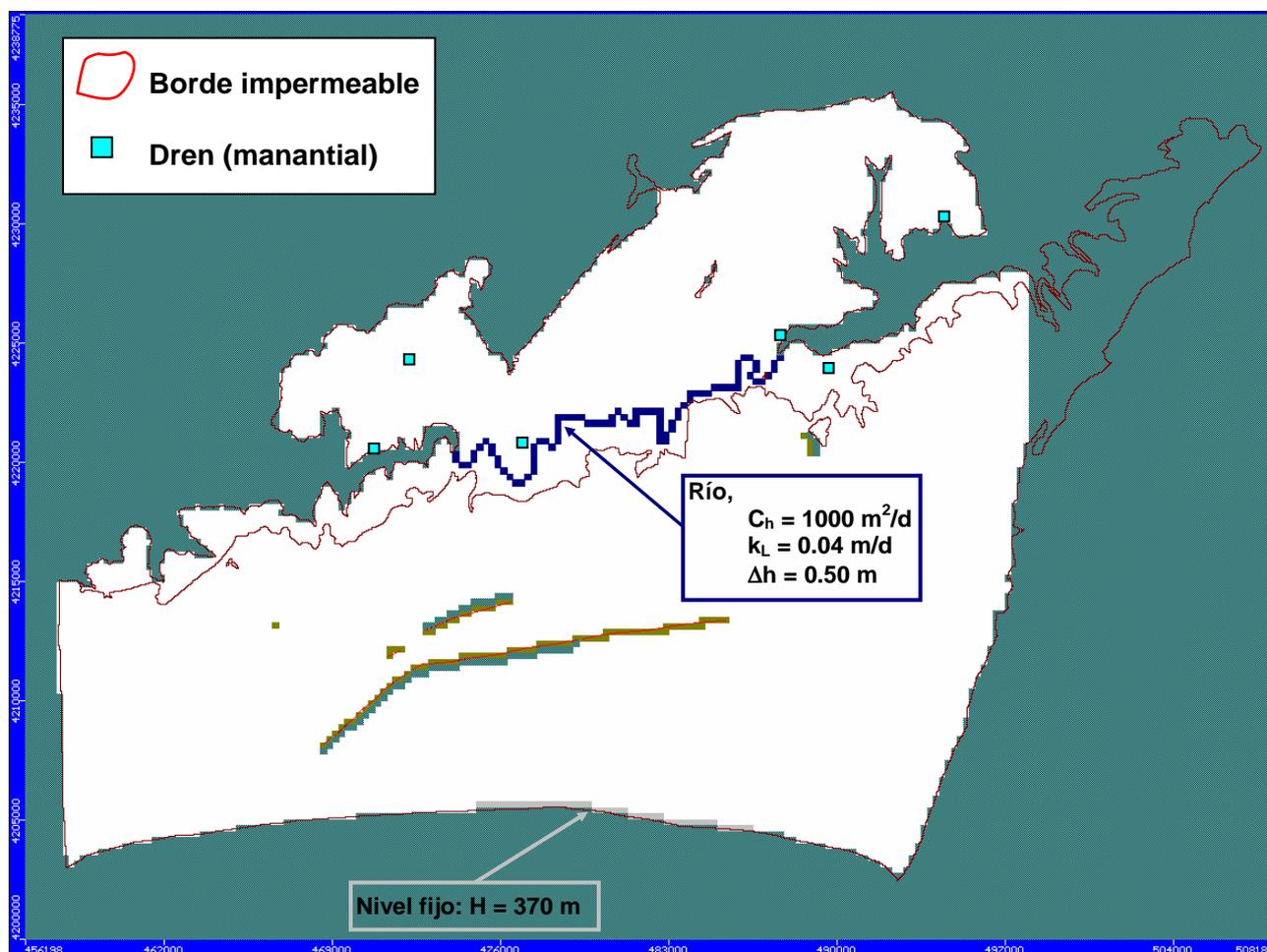


Figura 2.17. Condiciones de contorno en el perímetro del modelo

Respecto al límite sur, donde el acuífero gana en profundidad y sobre el que se sitúa la Unidad Olitostrómica de la Depresión del Guadalquivir, existe una situación análoga a la del límite este: a partir de cierta latitud no existen registros ni geofísicos, ni mecánicos de la profundidad que alcanza el acuífero y se desconoce la naturaleza del vínculo entre este y la unidad Olitostrómica. Sin embargo, en este caso existen tanto indicios en la datación de las aguas como en la piezometría que sugieren un flujo hacia el sur. Durante la modelación en régimen estacionario, se realizó un estudio numérico para investigar los modelos conceptuales plausibles del acuífero. Así, se identificó como el modelo más plausible entre los contrastados uno que consideraba en un sector del límite sur una condición de contorno de nivel fijo, con $H = 370 \text{ m}$. El valor de 370 m corresponde a la cota del río Guadalquivir al salir, aguas abajo, del dominio del modelo. Posteriormente de

analizar una serie de secciones de los ríos Guadalquivir y Guadalimar se considera, con cierta consistencia, que el nivel del río Guadalquivir es indicativo del nivel base regional. Así, al asumir esta condición de contorno se está asumiendo implícitamente que en régimen natural el acuífero en su límite sur se encuentra vinculado al nivel base regional. No obstante, debe puntualizarse, que no ha existido observación o indicio de campo que valide de forma clara esta condición de contorno, aunque la misma sea conceptualmente plausible. Bien puede que esta salida señalada por la modelación corresponda a una explotación temprana del acuífero no registrada en la información que se tiene del mismo. Estos aspectos serán discutidos debidamente más adelante en el informe.

II.3.2. Hidrografía de la zona de estudio: condiciones de río y dren

Los principales ríos que atraviesan la zona de estudio son el río Guadalimar, en el sector libre del acuífero, y el río Guadalquivir, en el sector confinado en su extremo sureste (Figura 2.18). El río Guadalimar se encuentra inequívocamente vinculado al acuífero. En régimen no influenciado, este río es la principal salida del acuífero, ello sin desestimar que en algunos tramos de sus meandros, este fuera perdedor aunque sus aportes al acuífero han sido irrelevantes. En los últimos años durante los cuales se ha desarrollado una intensa explotación del acuífero, el Guadalimar ha cedido a los bombeos su carácter de principal salida del acuífero pasando a segundo término. A su vez en este período, los bombeos han provocado una apreciable recarga inducida desde el río. La condición de contorno con la que se representa el río Guadalimar (Figura 2.17) en el modelo fue definida con los parámetros siguientes:

- Carga hidráulica, $\Delta H = 0.50 \text{ m} = H_{ag} - H_{lr}$

Donde: H_{ag} y H_{lr} son las cotas del pelo de agua de lecho del río.

- Conductancia hidráulica, $C_H = 1000 \text{ m}^2\text{d}^{-1}$

Donde si se supone un espesor de lecho y un perímetro mojado del cauce del río de 0.30 m y 30 m, respectivamente, da una permeabilidad del lecho es 0.4 m/d. La cual se corresponde a una permeabilidad de arena-arcillosa, característica del lecho de este tipo de cauce.

El río Guadalquivir entra en el ámbito del acuífero a una cota de 430 m.s.n.m. y sale a cota 370 m.s.n.m., aproximadamente (Figura 2.18). El acuífero en este sector se haya confinado y la profundidad a la que se encuentra, bajo el tramo del Guadalquivir que discurre sobre el mismo, varía entre los 170 m, en el extremo aguas arriba, y los 310 m, en el extremo aguas abajo la profundidad es de 240. Estas profundidades son estimadas a partir de la restitución que se realizó de la geometría del acuífero. La piezometría en régimen natural (piezometría 1996) indica que los niveles han estado al menos entre 20 m y 40 m por debajo de la cota del lecho del río. Todo ello hizo desestimar inicialmente cualquier vinculación entre el río Guadalquivir y el acuífero carbonatado. No obstante, en el estudio numérico para investigar los modelos conceptuales plausibles del acuífero, se trabajó sobre un esquema que contemplaba la vinculación entre el acuífero y las calizas carbonatadas.

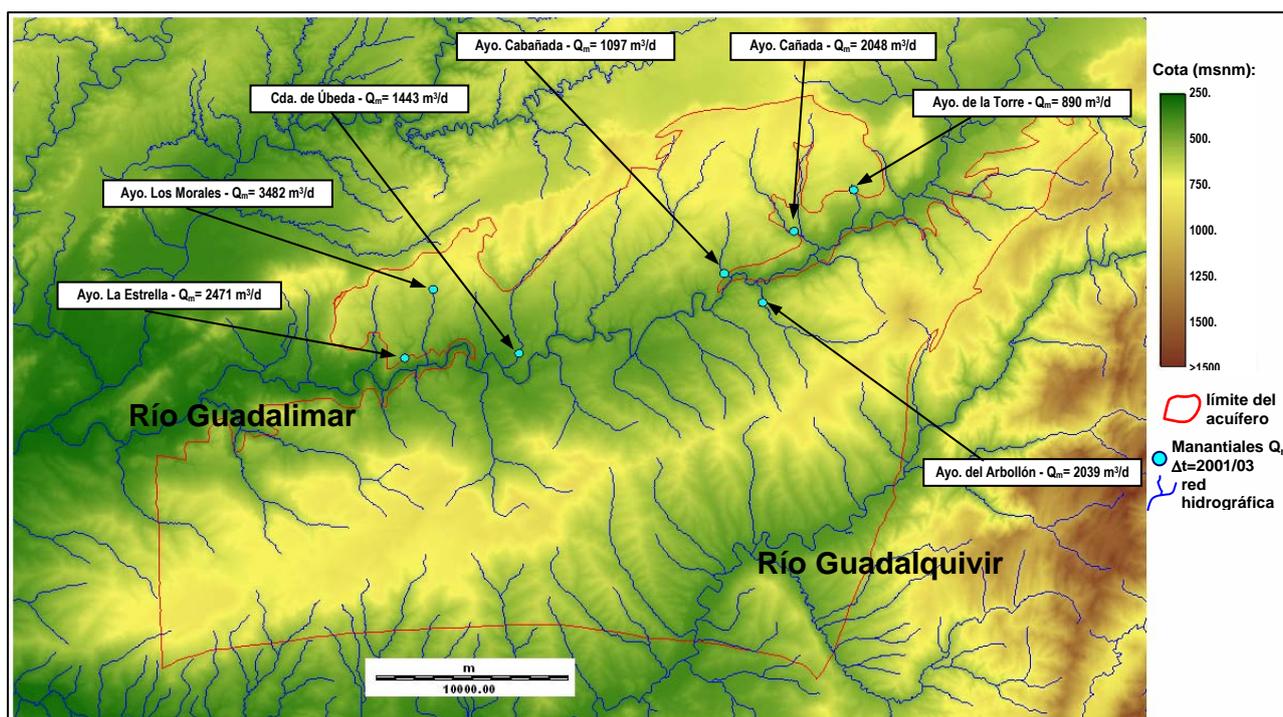


Figura 2.18. Red hidrográfica en el dominio del modelo

La hidrografía en el dominio del modelo se completa con una densa red de arroyos tributarios a los ríos Guadalquivir y Guadalimar. Red hidrográfica es particularmente densa sobre las margas miocenas, donde los arroyos se caracterizan por cauces

profundamente encajados. Ambos rasgos, alta densidad y encajamiento, son el resultado de una orografía abrupta y una litología fácilmente erosionable, como son las margas. Entre estos cursos de agua, ninguno de los tributarios al Guadalquivir se encuentra vinculado al acuífero. No sucede lo mismo, con los tributarios por margen izquierda del Guadalimar, que todos en su último tramo discurren sobre las calizas jurásicas, sin embargo las aportaciones del acuífero a estos arroyos no son relevantes con excepción del arroyo Arbolón. La mayor parte de los cursos de los tributarios por margen derecha del río Guadalquivir discurren sobre las calizas desnudas o han erosionado los niveles miocenos alcanzando el Jurásico. Mucho de estos arroyos drenan a las calizas, existe dificultad para caracterizar si son descargas procedentes de niveles colgados o del acuífero propiamente dicho.

Algunas aportaciones a los arroyos se han identificado como drenes del acuífero, la práctica totalidad de los mismos se sitúan sobre los tributarios de la margen derecha del río Guadalimar. En el año 2004 se realizaron 5 campañas de aforo, ver Tabla 2.1. Si se exceptúa al arroyo de La Cañada que queda fuera del dominio modelado, las restantes descargas fueron representadas como drenes en el modelo y se adoptaron sus descargas medias anuales como referencias para contrastar el balance hídrico resultante de la calibración.

NOMBRE	X UTM (m)	Y UTM (m)	Cota descarga (m snm)	Tipo de aforo	Caudal medio 5 campañas (l/s)	Caudal (m ³ /día)	Caudal (hm ³ /año)	Margen
Ayo. de Los Morales (en Navas)	472260	4224477	569	Estimado	40.3	3,482	1.271	Dcha
Cañada de Úbeda (tb. GPS 210)	476800	4220870	411	Molinete	16.7	1,443	0.527	Dcha
Ayo. de la Estrella (aguas abajo 193)	470748	4220602	399	Molinete	28.6	2,471	0.902	Dcha
Ayo del Arbolón (en camino Cjo. St ^a . Marina)	489704	4223767	458	Estimado	23.6	2,039	0.744	Izda
Ayo. de la Cabañada	487647	4225433	447	Molinete	12.7	1,097	0.401	Dcha
Ayo. de la Torre	494475	4230155	559	Estimado	10.3	890	0.325	Dcha
Ayo. de la Cañada	491313	4227784	485	Molinete	23.7	2,048	0.747	Dcha
TOTAL MARGEN DERECHA					132.3	11,431	4.172	
TOTAL MARGEN IZQUIERDA					23.6	2,039	0.744	
TOTAL GENERAL					155.9	13,470	4.916	
TOTAL GENERAL CONSIDERADO PARA EL MODELO					145.6	12,580	4.592	

Tabla 2.1. Manantiales en la zona de estudio (de Gollonet, 2005)

II.3.3. Fracturas regionales: celdas inactivas y pantallas

La interpretación de la campaña de investigación geofísica (IGME, CHG, DGAC, 2001) ha permitido identificar y caracterizar las estructuras tectónicas regionales más relevantes existentes en el acuífero (Figura 2.19). La caracterización espacial de estas estructuras se tuvo en cuenta de forma particular en la restitución geométrica del acuífero que se realizó en el marco de este trabajo. La relevancia de la tectónica en la hidrología de este acuífero radica que los saltos de estas fracturas regionales provocan tanto compartimentaciones internas por desconexión, como dificultades en la conexión hidráulica entre sectores del acuífero, incidiendo en su patrón de flujo. Por otro lado, la inspección de columnas litológicas de sondeos vecinos permitió identificar y caracterizar fracturas locales, con un grado de certidumbre aceptable

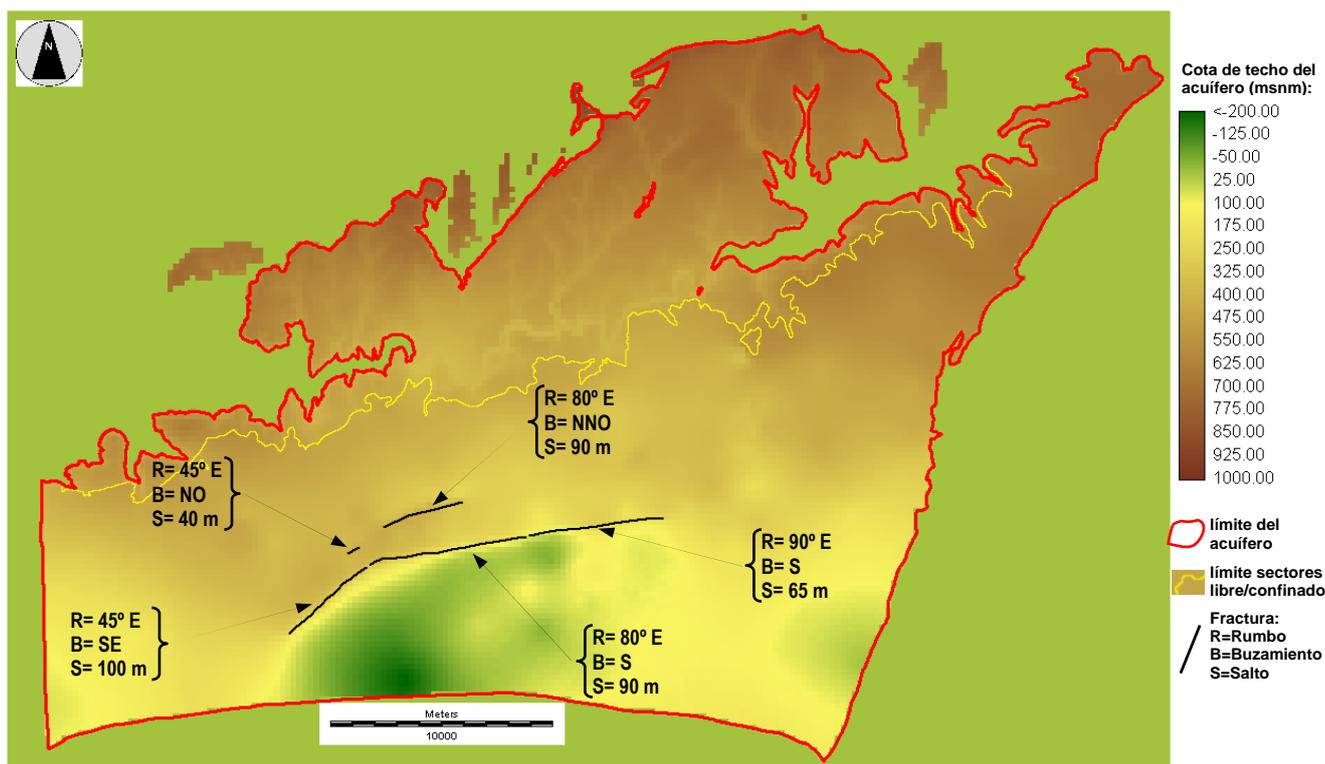


Figura 2.19. Caracterización geométrica de las fracturas regionales

La representación numérica en el modelo de las fracturas tanto regionales, como locales, se realizó de dos formas. En el caso de las fracturas cuyo salto, dada la potencia del acuífero, implicaba la desconexión del mismo se intercalando celdas inactivas a los largo

del desarrollo de las fracturas (Figura 2.21). Las restantes fracturas, se representaron mediante el recurso numérico de “pared” de Modflow, con el que se pueden definir en los modelos diques o pantallas delgadas cuyas permeabilidades presentan un contraste apreciable con la del medio, sin tener que recurrir al recurso de refinar el mallado. En este caso se definieron las permeabilidades de estas “paredes” que representan a las fracturas con el siguiente criterio:

$$k_p = [1 - S_f \times (P_{acf})^{-1}] \times k_{acf}$$

Donde: k_p es la permeabilidad de la pared; S_f es el salto de la fractura, P_{acf} es la potencia del acuífero del emplazamiento de la fractura y k_{acf} es la permeabilidad del acuífero. Este criterio representa la disminución que sufre la transmisividad del acuífero debido a la reducción en su sección que produce el salto de la fractura, ver esquema Figura 2.20. Se adoptó $k_{acf} = 20.45 \text{ m d}^{-1} = 2.3 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, que es la resultante de la interpretación del ensayo de bombeo ejecutado en La Imagen. En la Figura 2.21 se indican las k_p , S_f y P_{acf} correspondientes a las distintas fracturas representadas.

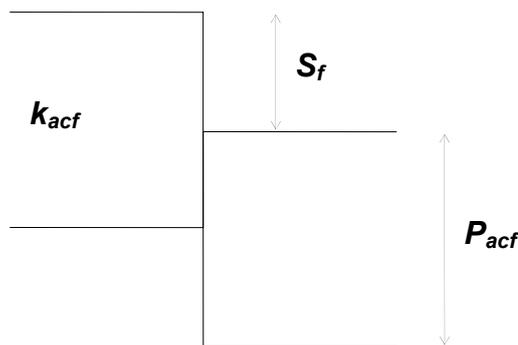


Figura 2.20. Esquema para la estimación de k_p

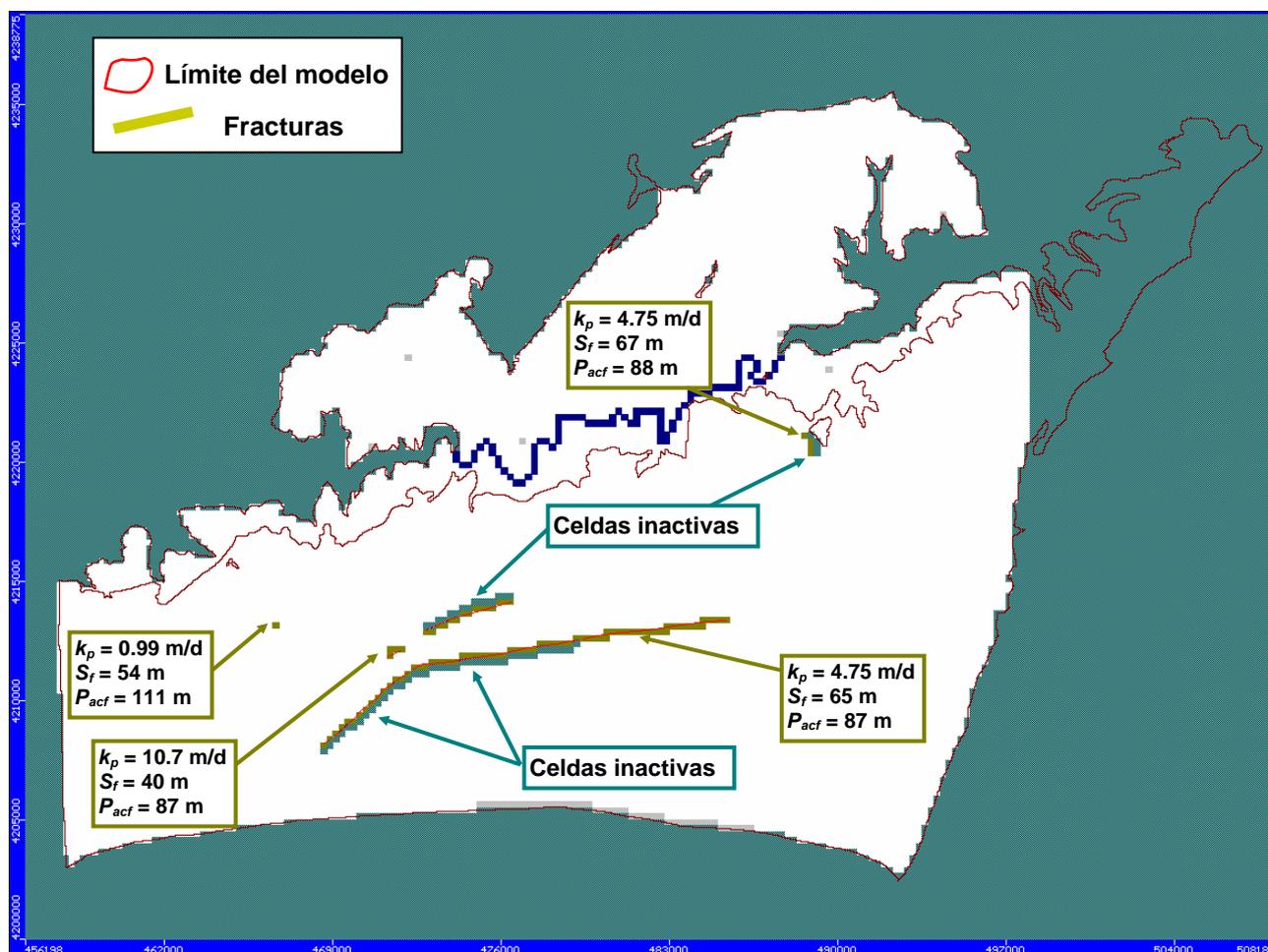


Figura 2.21. Representación en el modelo de fracturas regionales y locales

II.3.4. Recarga del acuífero

En régimen no influenciado, se ha considerado tradicionalmente que la recarga del acuífero se producía, casi en su totalidad en el sector libre del mismo y su origen era la infiltración de la precipitación. Sin embargo, en la conceptualización que se realizó para la modelación numérica, el área de recarga en esta sector se restringió al afloramiento de las calizas jurásicas y donde estas se encuentran cubiertas por brechas y conglomerados, calizos del Mioceno Superior. Se consideró que no se producía recarga en el sector libre del acuífero, donde este se encuentra cubierto por margas y margo-calizas del Mioceno Superior (Figura 2.22).

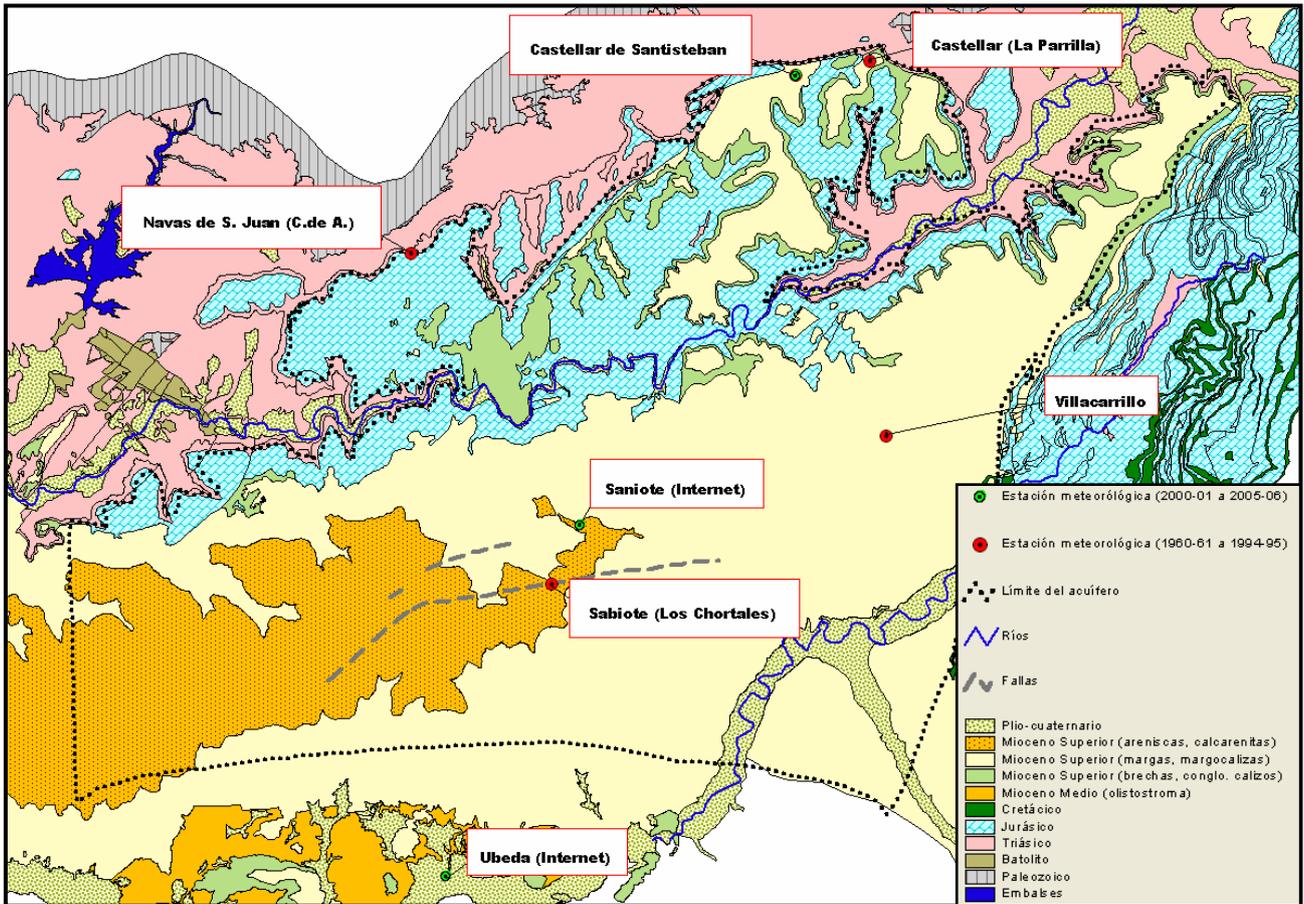


Figura 2.22. Estaciones meteorológicas en el dominio del modelo.

Inicialmente, se consideró que en los afloramientos de las calizas jurásicas se infiltraba el 60 % de la lluvia útil (LLU) correspondiente a la media de las resultantes de para unas reserva útil (RU) de 25 mm y 125 mm (Gollonet, 2007, comunicación personal) y que en los conglomerados miocenos se infiltraba el 40 % de dicha lluvia útil. El origen de la recarga en los conglomerados miocenos era tanto la precipitación directa sobre los mismos como la recarga de borde generada por la escorrentía superficial laminar sobre la margas miocenas.

El cálculo de la recarga se basó en los datos de la estación de Castellar de Santisteban, por ser la única entre las estaciones meteorológicas del la zona de estudio que posee series completas para el período octubre de 1960 y septiembre de 2006. Se realizó una corrección de la serie de la estación por un factor de 0.915. Este factor es la relación entre las medias de la lluvia útil para RU = 25 mm y RU =50 mm en el período 1960/61-1994/95 calculadas para de Castellar de Santiesteban y las correspondientes a la media sobre el

acuífero. Para estas últimas se consideraron las estaciones de: Castellar (La Parrilla), Castellar de Santiesteban, Villacarrillo, Navas de San Juan y Sabiote (Los Chortales). Toda ellas en la zona del acuífero (Figura 2.22) (Gollonet, 2007, comunicación personal). En el Anexo II se presentan los cálculos correspondientes.

La revisión del modelo conceptual, realizada en este proceso de modelación numérico, llevó a identificar como posible recarga al acuífero la infiltración procedente de las areniscas y calcarenitas que conforman el acuífero detrítico de Úbeda (Figura 2.22). La recarga se produciría, en régimen natural por una percolación a través de las margas miocenas y ya en régimen influenciado por esta percolación y la través de los múltiples sondeos que conectan ambos acuíferos. Se supuso inicialmente que la recarga desde el detrítico mioceno era de 100 mm/a (Figura 2.23). Esta hipótesis se corresponde con una permeabilidad de las margas de 2.5×10^{-8} m/s, una potencia media de estas bajo el detrítico mioceno de 400 m y una carga hidráulica del acuífero detrítico en el año 1996 de 50 m. La potencia media de las margas se estimó con la información litológica existente y realizando un análisis con el auxilio del SIG *raster* Idrisi. Análogamente, con el auxilio de esta herramienta, se estimó la carga media del acuífero detrítico para el año 1996. Se consideró que la recarga no se producía en toda la superficie del acuífero detrítico, pues se desestimó el sector al sur de las fracturas cartografiadas, donde la potencia de las margas miocenas ve incrementada notablemente su potencia al hundirse bruscamente las calizas jurásicas. En la Figura 2.23 se presenta la zonificación de recarga utilizada en la modelación.

La recarga al acuífero desde el río Guadalimar en régimen natural fue estudiada durante la modelación del régimen estacionario, al analizar el comportamiento de la condición de contorno río-acuífero. La misma se produce en un corto tramo de meandros, apenas ingresa el río en el acuífero y estrictamente no debería considerarse una recarga al acuífero pues el flujo discurre dentro del ámbito de los meandros. En régimen influenciado, ya durante el escenario de explotación del acuífero, se produce una recarga inducida por los bombeos en ciertos tramos del río. Ambos casos se de recarga se discutirán en los capítulos correspondientes.

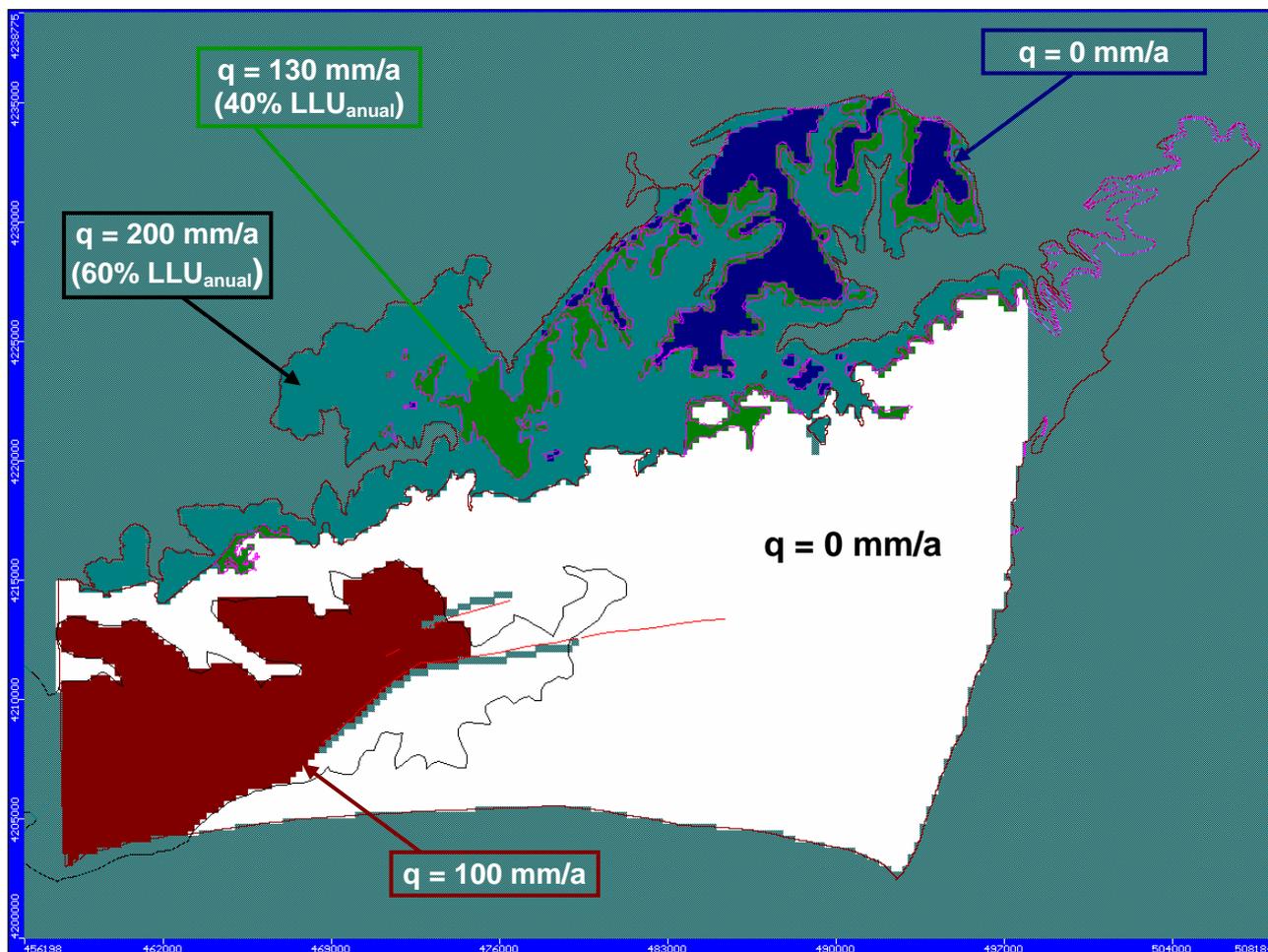


Figura 2.23. Zonificación de la recarga en el modelo.

II.4. Permeabilidad, k , y coeficiente de almacenamiento, S .

En el modelo se han tomado como referencia para los valores de permeabilidad y coeficiente de almacenamiento varios ensayos de bombeo que se realizaron en distintos ambientes del acuífero. El primero de ellos se ejecutó en las inmediaciones de los sondeos La Imagen I y II, en el sector confinado del acuífero próximo al límite Sur del acuífero (Figura 2.24), en Marzo de 2003. Posteriormente, en febrero del 2006 en los sondeos recientemente perforados por el IGME se realizaron dos ensayos de bombeo, ambos en el sector libre del acuífero. Uno de ellos próximo a la afluencia del Arroyo

Mostazar al río Guadalimar y límite entre los sectores confinado y libre del acuífero y el otro ensayo se realizó en la vecindad del embalse de Olvera (Figura 2.24).

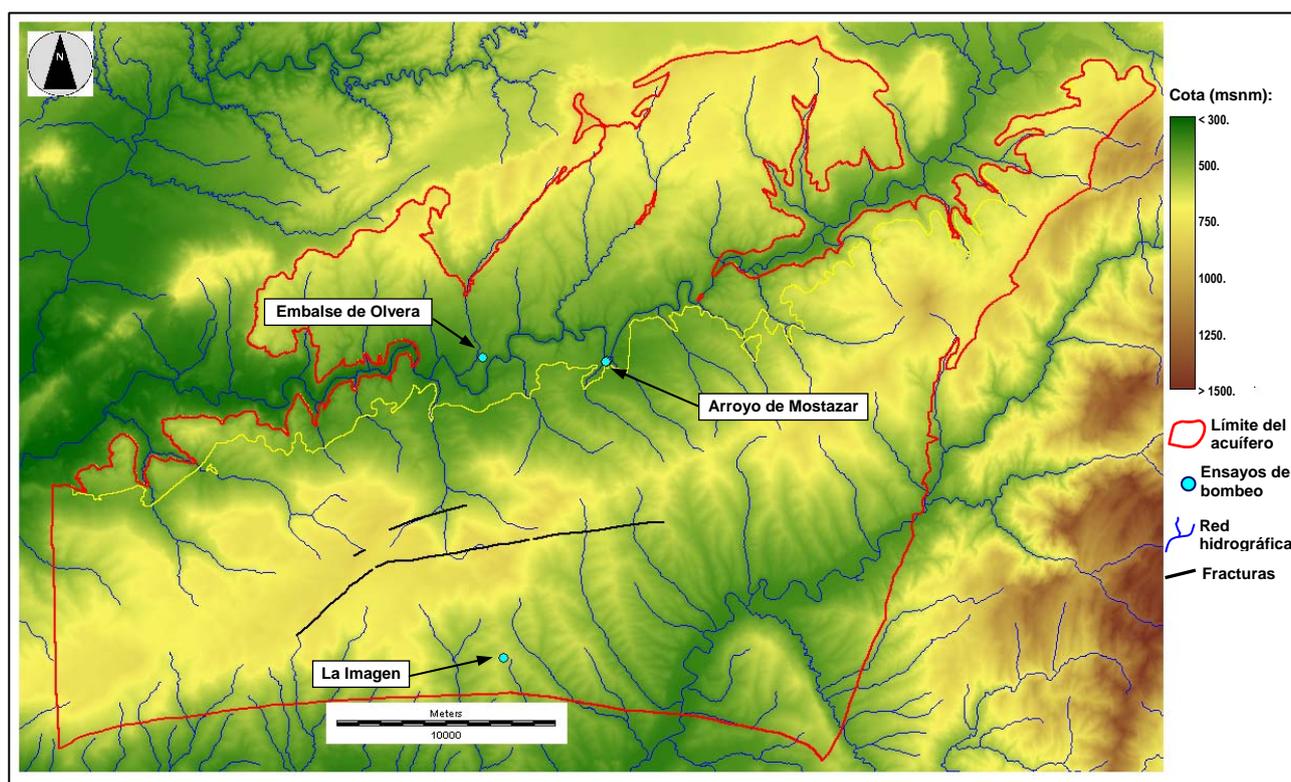


Figura 2.24. Emplazamiento de los ensayos de bombeo.

El ensayo en el paraje de La imagen se ejecutó bombeando simultáneamente en los sondeos La Mina y Camino del Cerro, situados a unos 430 metros de distancia entre sí. Los puntos de observación fueron los sondeos Imagen I y II, situados a unos 175 m de distancia entre sí y a de 2365 y 2290 metros, respectivamente, del centro geométrico de los pozos de bombeo. La duración de este ensayo fue de 750 minutos (0,52 días) en el bombeo con un caudal constante de 81 l/s (6.998 m³/día), y de 675 minutos en la recuperación. El descenso que se alcanzó en los pozos de observación fue algo menos de 1.20 m. La potencia de acuífero jurásico en la zona del ensayo de bombeo es 92 m.

Se realizaron tres interpretaciones de este ensayo. Dos de ellas se resolvieron aplicando la solución analítica de Theis. Una, comprendió sólo el período de bombeo, se resolvió mediante ajuste gráfico (Figura 2.25 a). La otra comprendió conjuntamente los períodos

de bombeo y recuperación y abordó la resolución matemática de Theis. La desviación estándar del error -diferencia entre los niveles observados y calculados- fue 0.0290 cm, lo cual es indicativa de la bondad del ajuste alcanzado (Figura 2.25.b). Para ambas interpretaciones se usó el programa EPHEBO 1.1 rev 2 (Grupo de Hidrogeología – UPC, 2003). Por otro lado, se realizó para el período conjunto de bombeo y recuperación una interpretación numérica mediante diferencias finitas del ensayo utilizando el premodelo desarrollado del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda (IGME, 2005). Para ello se aplicó el código MODFLOW (USGS, 1988) en la versión implementada en el paquete informático Visual MODFLOW 2.8.1.105 (WH, Inc,1998). En la Figura 2.26 se expone la discretización espacial del ensayo y en la Figura 2.27 se expone el ajuste alcanzado, así como los criterios de ajuste. En la Tabla 2.2 se indican los valores de la transmisividad obtenidos para las interpretaciones realizadas, pudiéndose observar el pequeño rango de variación entre las mismas. Por lo tanto, dada la potencia del acuífero estimada en la zona del ensayo (92 m) se considera que la permeabilidad es de 20 m/d y el coeficiente de almacenamiento es $1.05 \cdot 10^{-5}$, aproximadamente.

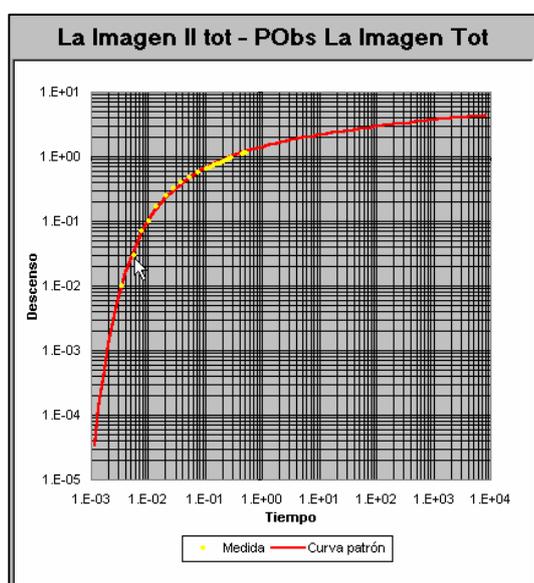


Figura 2.25 a. Método de Theis: ajuste gráfico. Período: bombeo

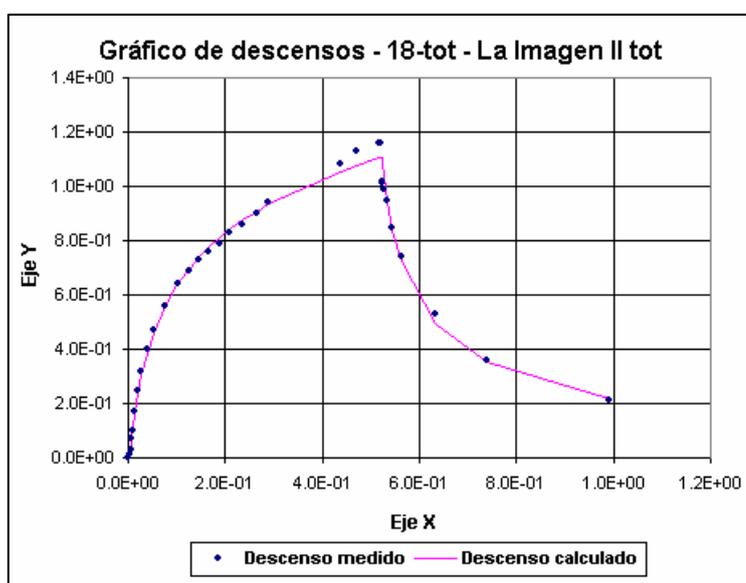


Figura 2.25 b. Método de Theis: resolución matemática. Período: bombeo y recuperación

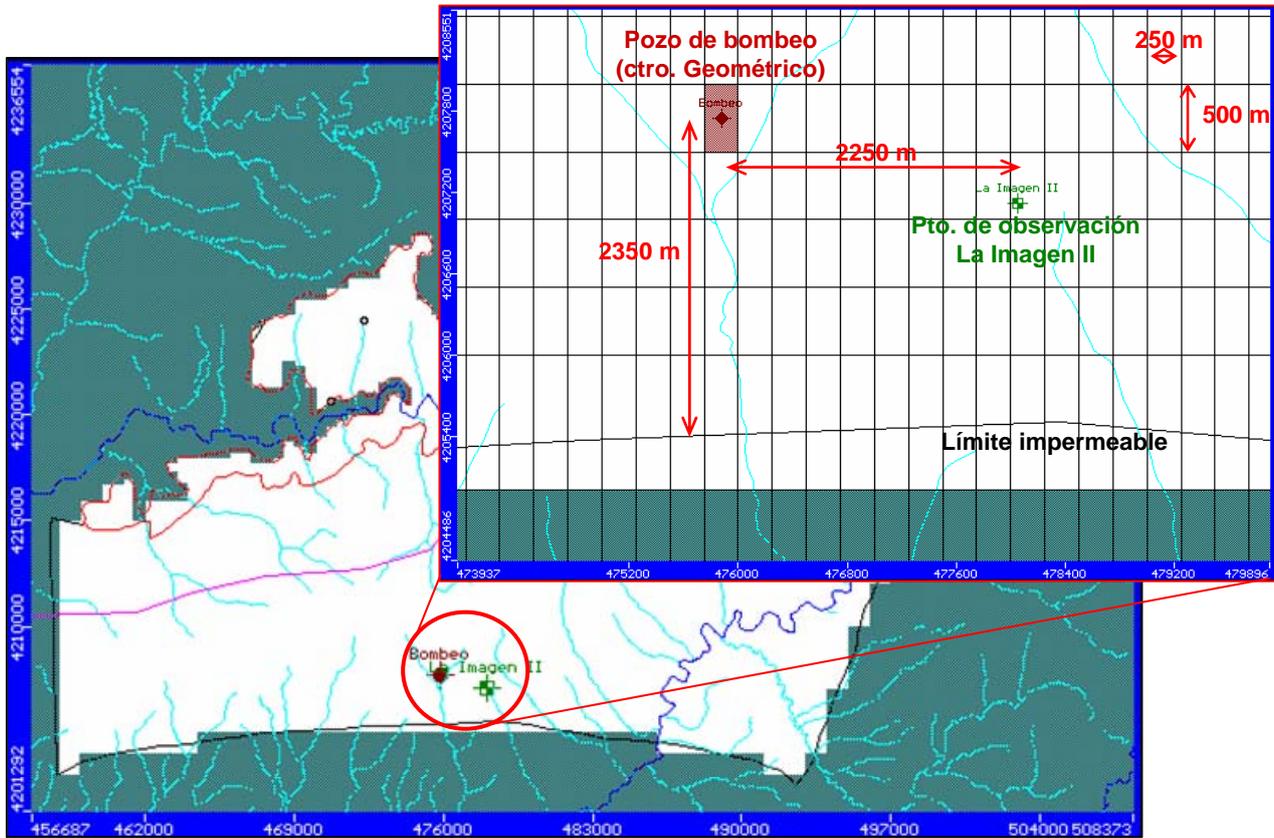


Figura 2.26. Discretización espacial del ensayo en la zona de La Imagen II para su interpretación numérica (MDF)

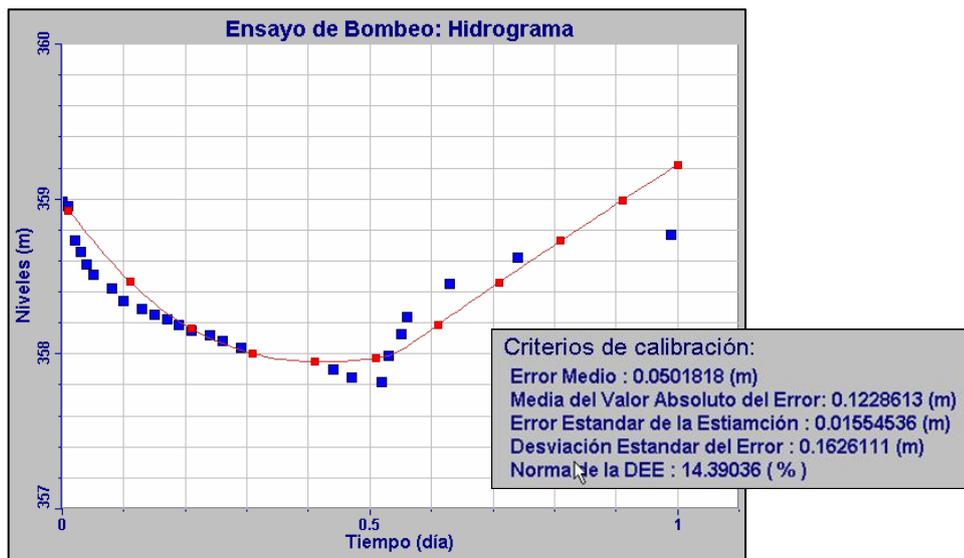


Figura 2.27. Resolución numérica (MDF) del ensayo en zona de La Imagen II

Parámetro hidrogeológico	Solución analítica de Theis		Resolución numérica: Diferencias Finitas
	Ajuste gráfico	Resolución matemática	
	Período: bombeo	Período: bombeo + recuperación	Período: bombeo + recuperación
T (m ² /d)	1670	1880	1945
K (m/d) *	18.16	20.45	21.12
S	1.07 10 ⁻⁵	1.05 10 ⁻⁵	7.47 10 ⁻⁵

*: Potencia del acuífero estimada en la zona del ensayo, P = 92 m

Tabla 2.2: Parámetros hidrogeológicos interpretados en la zona de la Imagen II

El IGME, en febrero del 2006, ejecutó ensayos de bombeo en dos emplazamientos en el sector libre del acuífero (Figura 2.24). Los ensayos en ambos emplazamientos se caracterizaron por la existencia de niveles colgados que dificultaron la interpretación de los mismos, por lo que la evaluación de los parámetros hidrogeológicos poseía una incertidumbre importante. El diseño, ejecución e interpretación de estos ensayos la realizó J. Gollonet (2006), a continuación se presenta una sucinta revisión de este trabajo y, en el Anexo III, se adjuntan las tablas con la información de la ejecución de dichas pruebas hidráulica y la interpretación gráfica elaboradas oportunamente (Gollonet, 2006).

Uno de los ensayos se ejecutó cercano a la confluencia del arroyo Mostazar y el río Gualdilamar (Figura 2.28). Se bombeó en el sondeo S-10 durante 23 horas un caudal constante de 21 l/s y se observó la recuperación durante 13.5 horas. El nivel estático en el sondeo era 349.13 m, al finalizar bombeo se había producido un descenso de 3.92 m, que al término de la recuperación observada se había reducido a 0.36 m. El sondeo se sitúa a 55 m y 65 m del arroyo Mostazar y del río Guadalimar, respectivamente. El arroyo posee un régimen estacional y es de escasa entidad. Sin embargo, el cauce del río Guadalimar, que es permanente, tiene una cota de 389 m, por lo que el nivel estático del sondeo S-10 evidencia que el río se encuentra desconectado. Pero además sugiere que durante el ensayo se podría haber producido una recarga desde el río al acuífero aunque dificultado por niveles menos permeables, los cuales dan lugar a niveles colgados (Gollonet, 2006).

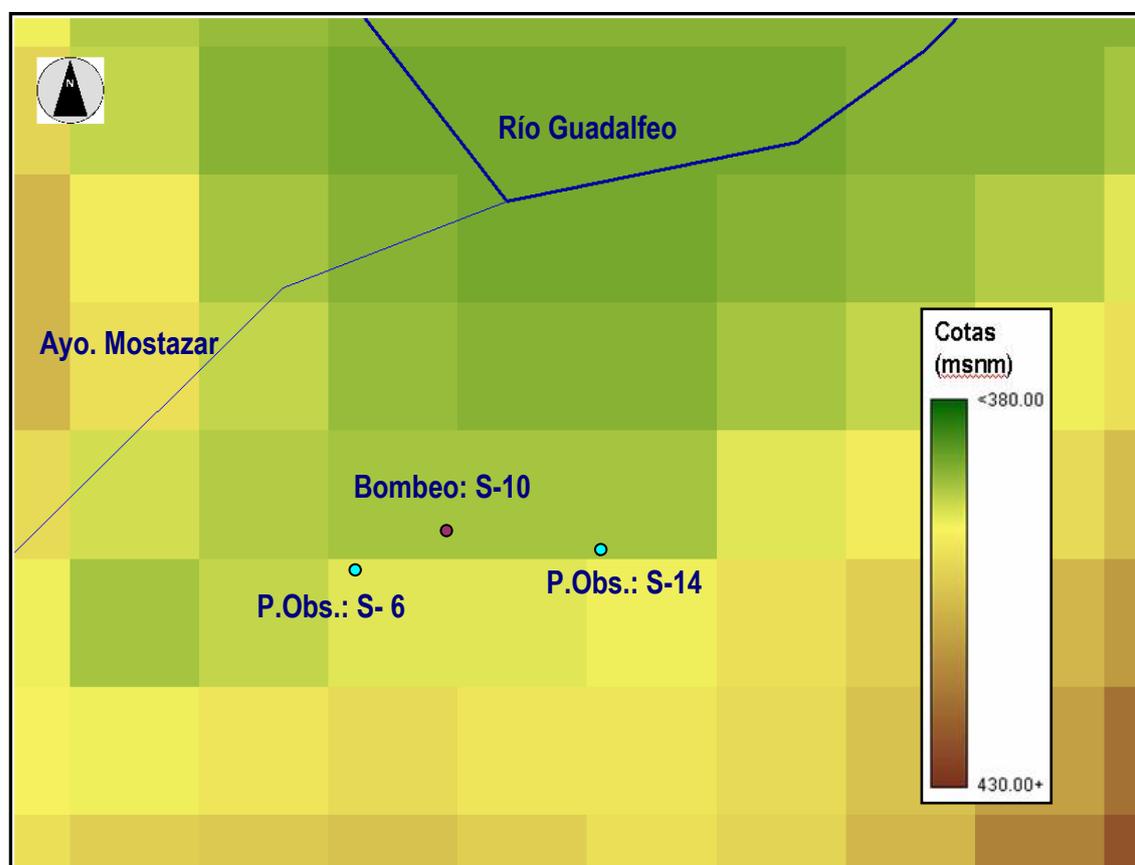


Figura 2.28. Esquema de situación del ensayo de bombeo en el sondeo S-10

Principalmente, la existencia de estos niveles colgados y, en menor medida, la recarga desde el río Guadalimar dificultan la interpretación de este ensayo. Las transmisividades varían entre $500 \text{ m}^2/\text{d}$ y $1000 \text{ m}^2/\text{d}$ y dado que el espesor saturado durante el ensayo se evaluó entre los 37 m y los 43 m, los valores de permeabilidad más probables en el entorno del sondeo S-10 varían entre 11.6 m/d y 27 m/d , aproximadamente. La porosidad eficaz se valoró entre 0.02 y 0.05, aproximadamente.

El otro ensayo referenciado como “ensayo en Embalse de Olvera” se ejecutó bombeando el sondeo S-11 y teniendo como punto de observación al S-7. Este ensayo se emplazó donde el sector libre del acuífero se encuentra bajo una cobertura de materiales margo-arenosos y calcarenitas del mioceno superior (Figuras 2.24 y 2.29). Los sondeos S11 y S-7 distan entre sí 36.3 m y se encuentran en el interfluvio de un barranco de régimen torrencial y del río Guadalimar a 280 m y 380 m, respectivamente, de estos cursos de

agua. Los niveles estáticos del pozo de bombeo (402.43 m) y de observación (401.23 m) se encuentran muy por encima de la cota del cauce del río Guadlimar (365 m), por ello y por la evolución de los niveles piezométricos a lo largo de los ensayos (ver Anexo III) se desestimó que exista un aporte desde el río

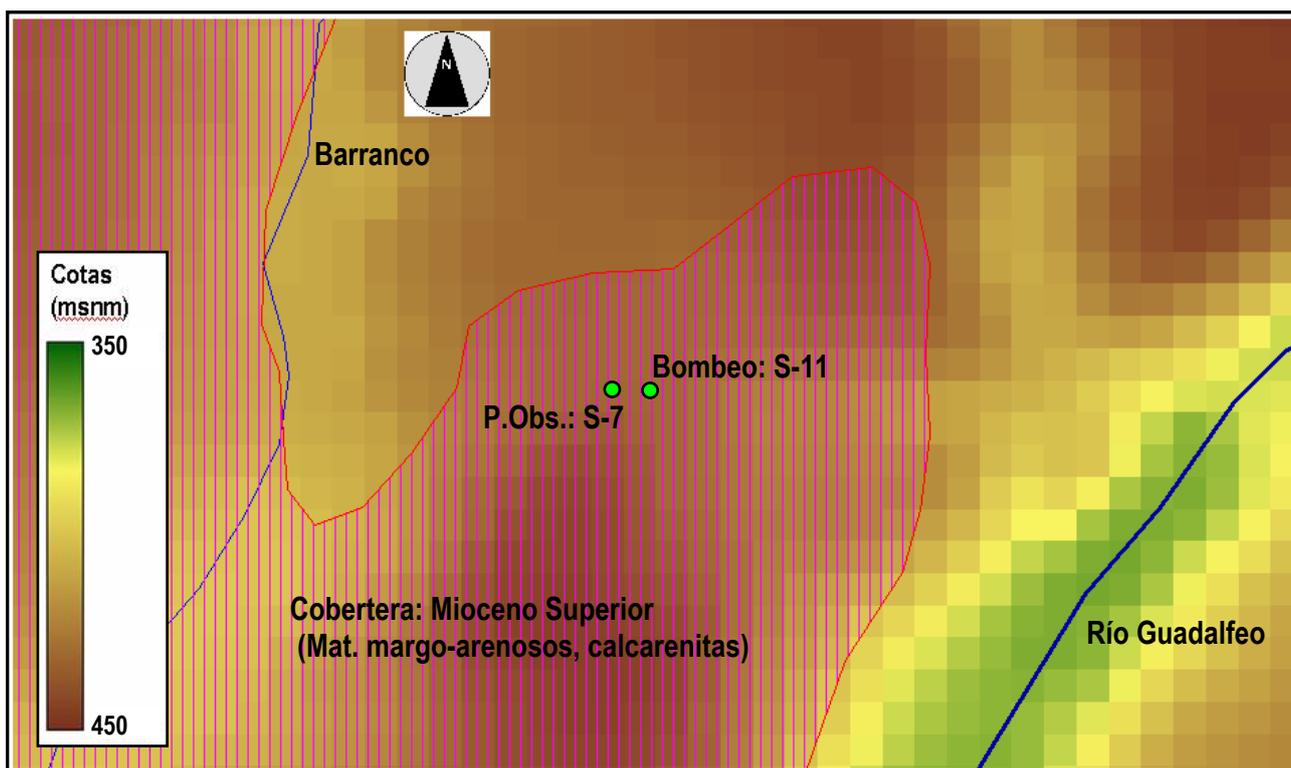


Figura 2.29. Esquema de situación del ensayo de bombeo en el sondeo S-11

La prueba hidráulica realizada estrictamente estuvo compuesta por dos ensayos de bombeo consecutivos. En el primer ensayo se bombeó durante 12 horas 40 minutos un caudal constante de 6 l/s, alcanzándose descensos de 81.43 m en el S-11 y de 0.09 m en el S-6. La recuperación se observó durante 40 minutos siendo el descenso al final de este período de 1.59 m, en el S-11, y de 0.05 m, en el S-6. Inmediatamente, se continuó con un bombeo escalonado con caudales de 5 l/s, 4.5 l/s y 4 l/s en escalones consecutivos de 80 minutos, 4 horas y 3 horas respectivamente. Respecto al nivel en el comienzo de este ensayo escalonado, los descensos alcanzados durante el bombeo fueron 28.44 m, en el S-11, y 0.05 m, en el S-6. El sondeo S-11 se recuperó nivel inicial de este segundo ensayo a los 60 minutos de la recuperación y el S-6 a los 40 minutos. Se dejó de observar la recuperación a las 4 horas de comenzada esta, el descenso respecto al nivel inicial

correspondiente al primer ensayo era en el S-11 de 0.20 m y en el S6 de 0.03 m. Una descripción más detallada de los ensayos se presenta en el Anexo III.

La interpretación de estos ensayos se vio dificultada por la posible obturación de los filtros del sondeo (Gollonet, 2006). Asimismo es factible la existencia de niveles colgados. Las transmisividades varían entre 50 m²/d y 80 m²/d y dado que el espesor saturado durante el ensayo se evaluó 65 m, los valores de permeabilidad varían entre 0.77 m/d y 1.23 m/d, aproximadamente. La porosidad eficaz se valoró entre 0.01 y 0.05, aproximadamente.

Las zonificaciones de permeabilidad y del coeficiente de almacenamiento definidas en el modelo son coincidentes (Figura 2.30). Las zonas definidas coinciden con los sectores libres y confinados del acuífero. Ambos parámetros fueron objeto de calibración.

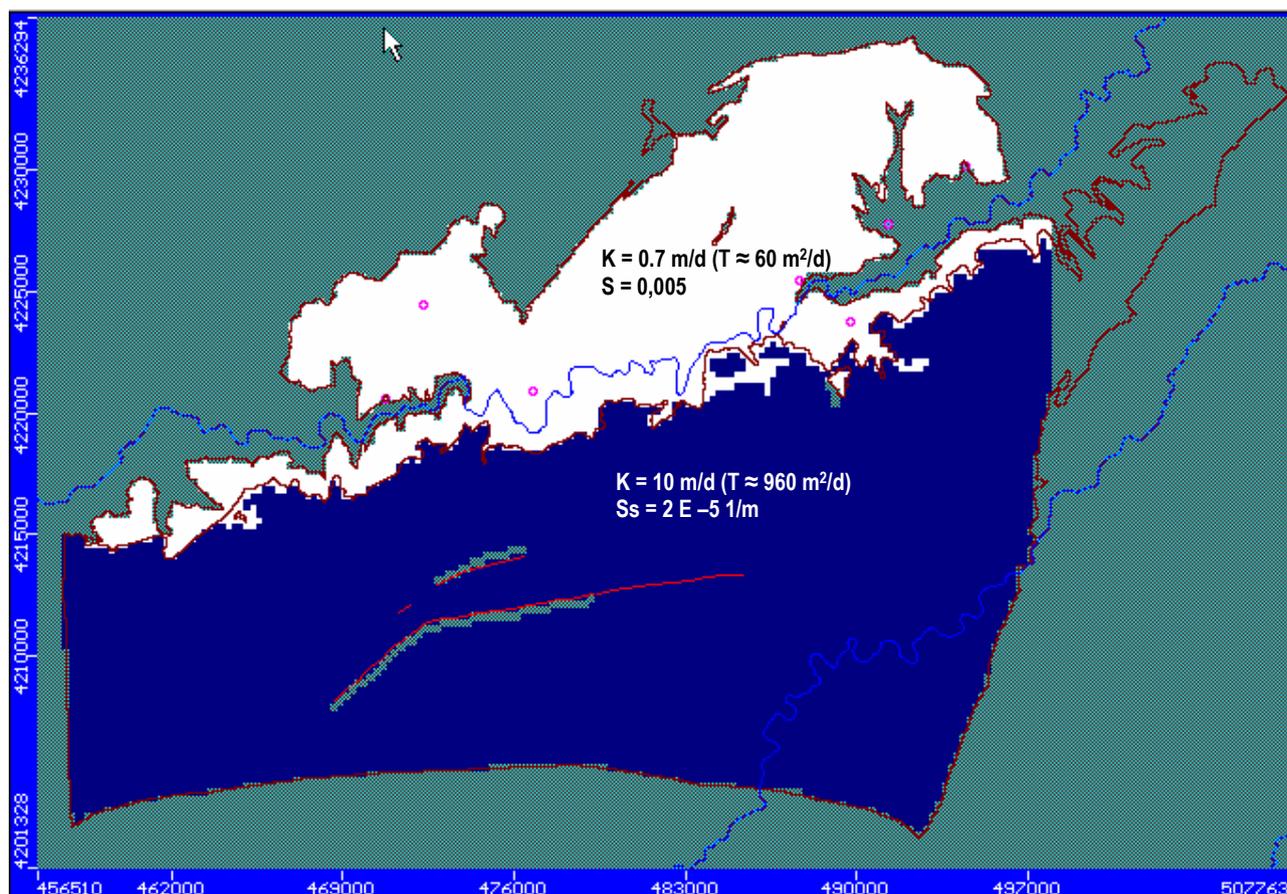


Figura 2.30. Zonificación de permeabilidad, k, y coeficiente de almacenamiento, S

II.5. Explotación del acuífero: bombeos

Los puntos de bombeo en el acuífero son numerosos, los distintos inventarios no los recogen a todos, ni todos los sondeos se encuentran registrados administrativamente de forma debida. Por otro lado, la mayor parte de los sondeos se caracterizan por tener un conocimiento poco riguroso de su régimen de extracciones. Estos aspectos dificultaban enormemente la definición de los bombeos para la modelación en régimen transitorio, que se comprende los años hidrológicos 2000/01-2005/06. Período en el que se desarrolla de forma acelerada la explotación del acuífero, produciendo un notorio descenso de niveles. Esta dificultad en la modelación no es menor, antes bien, atenta directamente a la consecución del principal objetivo de este modelo: realizar una primera aproximación en la definición de volúmenes sostenibles de explotación del acuífero. Sin embargo, mal se pueden definir estos si se desconoce la magnitud de la explotación que actualmente impacta en el acuífero. En respuesta a ello se ha realizado una encomiable tarea de premodelación (Gollonet, 2006), que comprendió dos actuaciones: un inventario exhaustivo de explotaciones y la modulación de las extracciones para el período 2000/01-2005/06. En el Anexo IV se presenta la totalidad del trabajo de gabinete desarrollado.

El inventario se realizó en durante el año 2005 y se registraron 233 sondeos que se consideró explotaban el acuífero, estimándose su extracción anual en 35. 574 hm³. El 47% de estos, 110 sondeos, se encontraban inventariados, teniéndose registro de su régimen de explotación. Las extracciones del conjunto de estos sondeos, 23 hm³ representaban el 65 % del total de las estimadas. Acerca de 85 sondeos, el 37 % del total, sólo se tenía registro del caudal medio declarado al inventariarse en el 2005, con ello y basado en el tiempo medio de extracción anual para riego del olivo en la comarca (2520 horas), se estimó la extracción anual de estos sondeos. La cual en su conjunto es 8.61 hm³ y representan el 24 % de la explotación estimada. Sobre los 38 sondeos restantes, un 16 % del total, no se conoce ningún dato de explotación. Debido a las características de estos sondeos se asumió que su respectivo caudal medio de bombeo era aproximadamente el caudal medio del conjunto de los sondeos de los que sólo se conocía este dato, 11.5 l/s. A partir de esta hipótesis y adoptando el tiempo medio de extracción anual para el riego del olivo en la comarca (2520 horas) se estimó la extracción anual de

estos sondeos. Así en conjunto bombearían 3.96 hm^3 , siendo el 24 % de la explotación total estimada.

La estimación de las extracciones se ha basado en el inventario de punto de bombeos ejecutado en el año 2005. Esta evaluación fue realizada por expertos que conocen fehacientemente la zona de estudio, por ello se considera que es una evaluación realizada con criterios consistentes. Sin embargo, estos mismos expertos asumen la incertidumbre de esta evaluación podría ser algo mayor al 30 % (Gollonet, comunicación personal, 2006), debido a que sólo dos 2/3 del total estimado de las extracciones se basan en datos de inventario. Dentro del rango de esta incertidumbre se realizó un estudio con el modelo numérico, concluyéndose que la estimación para el año 2005 infravaloraba el volumen extraído en torno a un 10 %.

Un criterio realista para definir las extracciones durante el período modelado, debe contemplar la variación de la dotación de riego en función de la climatología del año correspondiente. Así, tanto el volumen agua aplicada como los meses en que se regará dependerán de las características hidroclimáticas del año y, de forma más estricta, de la del período de riego usual. Desde este punto de vista, en rigor, la estimación de las estaciones hechas para el año hidrológico 2005/06 no puede “replicarse” en todos los años del período modelado. Debido a ello se modularon las extracciones siguiendo la metodología desarrollada en el estudio "Superficie de los cultivos de regadío y sus necesidades de riego, en demarcación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir" (CHG, Mayo 2005). Las dotaciones y necesidades máximas de riego del olivo (Tabla 2.3), así como los meses de aplicación (Tabla 2.4) para los años muy húmedos, húmedos, medios, secos y muy secos identificados para distintas zonas olivareras de la provincia de Jaen y del conjunto de la cuenca del Guadalquivir se tomaron del estudio citado (CHG, 2005 en Gollonet, 2006).

ÁMBITO	Superficie (has)	Dotación (m ³ /ha/a)	Necesidades max (m ³ /ha/a)		
			Seco	Normal	Húmedo
Sist. Explot. 05105 (Jaén)	19734	2554	5701	4221	2833
Origen subterráneo-Jaén	3582	1843	5054	3630	2373
Olivar-Jaén	17816	2213	5554	4032	2569
Olivar-Guadalquivir	322257	2281	5654	3678	2807
Sist. Explot. 05105 (Jaén) (%)			135.1	100	67.1
Origen subterráneo Jaén (%)			139.2	100	65.4
Olivar Jaén (%)			137.8	100	63.7
Olivar Guadalquivir (%)			153.7	100	76.3
MEDIA GLOBAL Y % RELATIVO		2223	141.4	100	68.1

Tabla 2.3. Dotaciones y necesidades máximas de riego del olivar (CHG, 2005)

	Criterios años	% Vol r.s.m.	Época de riego
a	Años muy húmedos	64	Mayo-Septiembre (5 m)
b	Años húmedos	68	Abril-Septiembre (6 m)
c	Años medios	100	Abril-Octubre (7 m)
d	Años secos	141	Marzo-Octubre (8 m)
e	Año extremo seco	154	Marzo-Noviembre (9 m)

Tabla 2.4. Coeficiente porcentual respecto al año medio del volumen de riego del olivar y período de aplicación (CHG, 2005)

En una sucinta descripción metodológica:

1. Se adoptó la estimación de las extracciones para el año 2005/06 como primera aproximación de la extracción media anual.
2. Se definen el coeficiente porcentual de variación del volumen de riego para cada tipo de año hidroclimático contrastando las necesidades máximas de cada año tipo respecto a la necesidad máxima del año medio (coeficiente porcentual = 100%).
3. Se contrastó para cada año la precipitación durante la época de riego (Abril-Octubre) con la correspondiente al año medio (1960/61-2005/06), clasificándose hidroclimáticamente el período comparado.

4. Acorde a la caracterización hidroclimática del período de riego (Tabla 2.5), se definen para cada año:

- El período de riego o, lo que es lo mismo, el período de extracciones en cada punto de bombeo (Anexo IV).
- El volumen de riego mediante el producto entre la extracción media anual estimada en primera aproximación y el coeficiente porcentual correspondiente a la caracterización hidroclimática (Tablas 2.4y 2.5). Análogamente, las series de bombeo anuales se afectarán por este coeficiente porcentual (Anexo IV).

Deben observarse los siguientes aspectos:

- La caracterización hidroclimática del período de riego y la de su correspondiente año coinciden necesariamente.
- Un primer criterio de modulación es la caracterización hidroclimática del período de riego. Un segundo criterio de modulación es la caracterización hidroclimática anual.
- La media del volumen de riego anual una vez modulado el riego no coincide con la estimada en primera aproximación. Ello es lógico pues es un proceso iterativo de convergencia asintótica. El valor estimado en primera aproximación es fundamental pues sitúa el orden de los volúmenes de riego.

Los sondeos que explotan en el acuífero que quedan dentro del dominio del modelo son 208 y la extracción anual media de los mismos es de 38.892 hm³ (Figura 2.31).

II.6. Información piezométrica

La información piezométrica utilizada para la modelación en régimen estacionario correspondía a una campaña del año 1996 (Figura 2.32). Esta información es de pobre calidad, pues la toma de datos adoleció de falta de rigor. En algunos puntos, debido a la



PRECIPITACIONES EN ESTACIÓN 5029 (Castellar de Santistéban)

CÁLCULOS PARA MODULACION ANUAL RIEGOS LOMA

N	D	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	TOTAL	% Pa/ Pm (46 años) (A)	P anual en época riego (Paer ; mm)	% Paer sobre Pmer (46 años) (B)	% Vol riego sobre media	Vol Riego (hm3/a)	Observaciones
95.2	123.6	140.6	49.4	143.8	1.1	45.1	2.6	0.0	2.8	46.7	737.4	115.2	184.8	72.8	141.4	50.318	Año seco
50.6	57.5	28.9	2.1	93.8	110.4	43.2	16.3	0.0	0.0	29.0	549.5	85.8	316.6	124.7	68.1	24.237	Año húmedo
112.9	87.4	101.7	90.9	72.3	50.8	28.8	0.0	0.0	14.8	20.7	658.6	102.9	193.4	76.2	141.4	50.318	Año seco
78.6	38.8	64.4	48.8	86.2	81.6	147.7	4.5	1.2	0.0	3.3	730.9	114.2	414.1	163.0	63.7	22.666	Año muy húmedo
3.9	32.6	0.2	22.9	27.6	17.7	15.1	2.4	0.0	0.0	40.6	228.2	35.6	141.0	55.5	153.7	54.687	Año extremo seco
22.4	64.8	51.4	70.8	71.1	66.8	24.9	11.3	7.6	16.9	38.1	530.3	82.8	249.8	98.4	100.0	35.575	Año medio
60.6	67.5	64.5	47.5	82.5	54.7	50.8	6.2	1.5	5.8	29.7	572.5	89.4	250.0	98.4	100.0	35.575	11,1 % más seco que PAIH
72.4	91.4	77.5	81.0	63.9	67.1	49.7	27.6	5.0	7.6	28.9	640.1	100.0	254.0	100.0	sd	sd	0'6 % más seco que PAIH
												2º Criterio		1º Criterio	Media real>>>	39.633	11,1 % MAYOR QUE LA MEDIA

Tabla 2.5. Caracterización hidroclimática de los años modelados y de sus respectivos períodos de riego

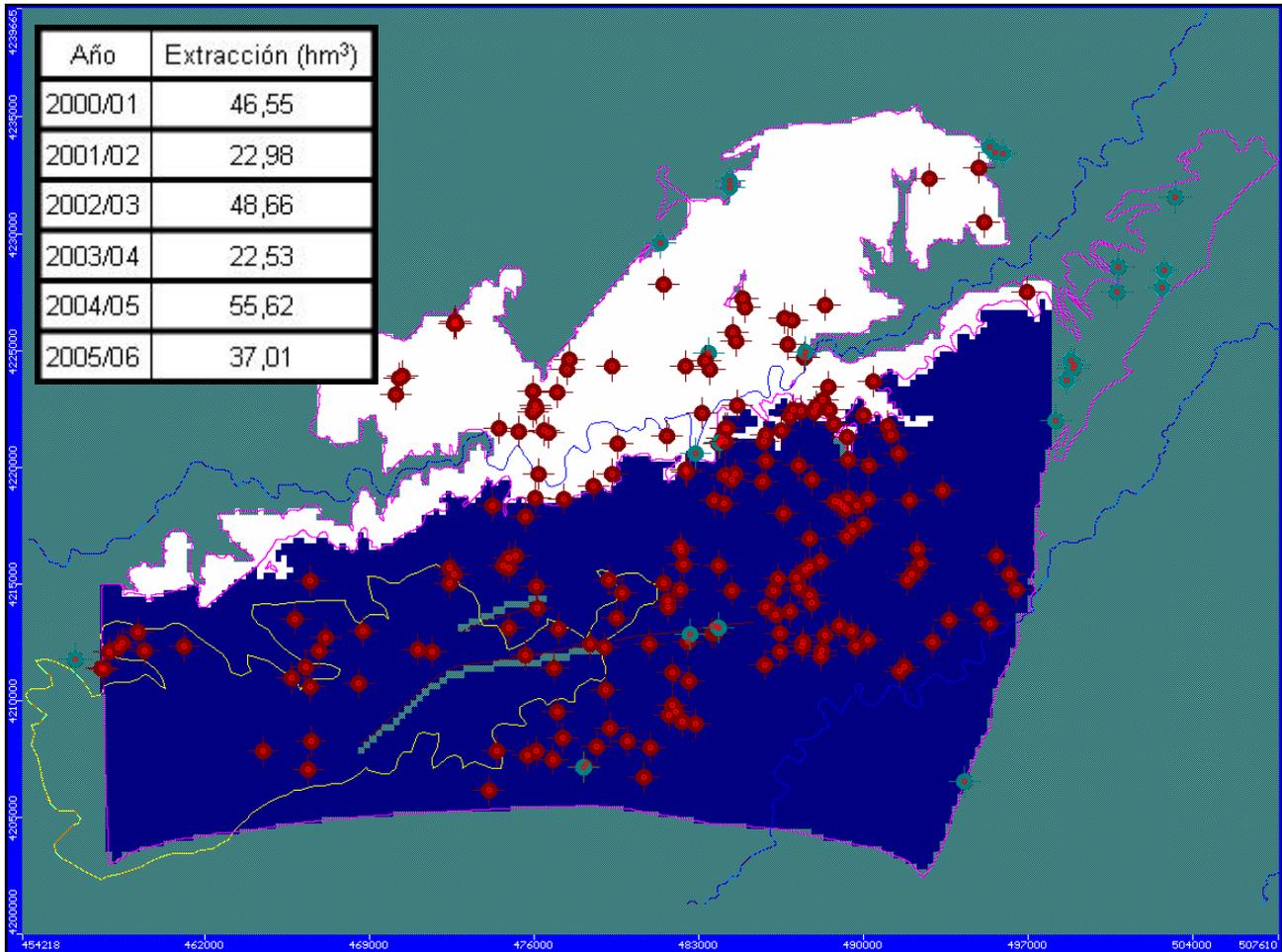


Figura 2.31. Explotación del acuífero: 208 puntos de bombeo

profundidad del agua y a la falta de medios de medición adecuados, el nivel fue estimado por la posición de la bomba; en otros no se discriminó, o no se registró, si los niveles eran dinámicos o no. Sin embargo, si estos datos se analizan críticamente y depuran adecuadamente, tienen el atractivo de ser la única información que ofrece una visión de la piezometría del acuífero en un momento, 1996, lo suficientemente distante del escenario de fuerte explotación que se comienza a desarrollar a partir del año 2000. Así, en los distintos sectores del acuífero se pueden identificar tanto los puntos que presentan una cierta consistencia con la mayor parte de pozos de los respectivos conjuntos, como aquellos que presentan un registro anómalo. Resulta obvio observar que el carácter

subjetivo que encierra esta valoración de la información piezométrica, conllevará una incertidumbre nada desdeñable en la calibración del régimen estacionario.

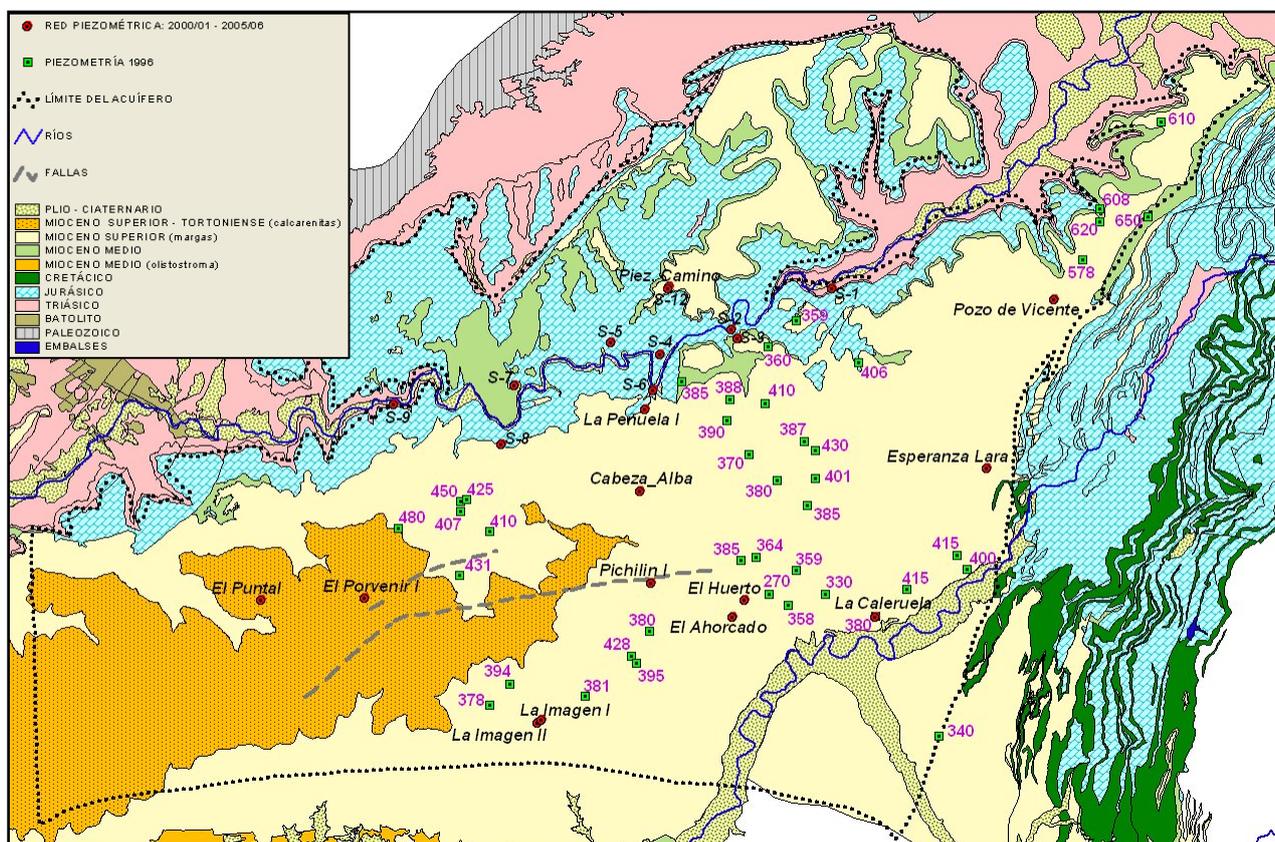


Figura 2.32. Niveles piezométricos en el acuífero en 1996 y red piezométrica 2000/01-2005/06

En régimen transitorio se modeló el período 2000/01–2005/06, en el cual se desarrolla y establece la fuerte explotación que hoy sufre el acuífero. La información piezométrica con que se calibró el modelo fueron 200 datos de 22 sondeos, 18 de ellos integran la red de 25 puntos de observación que controla el IGME (Figura 2.31 y Tabla 2.6). En el Anexo V se presenta la información piezométrica completa.

Los puntos de la red de observación del IGME se desecharon por: situarse fuera del dominio a modelar (S-1, S-9 y Pozo Vicente, emplazado en las escamas del acuífero), registrar niveles colgados (S-6, S14), tener indicios que registra niveles de escama del acuífero (Esperanza Lara) o como el Piezómetro Camino situado en el sector libre del

acuífero, en el cual casi el 50 % de los registros de nivel corresponden a los niveles en el Trías. Vecino a este sondeo se hayan los sondeos S-12/S-13, enteramente en el acuífero.

nº IGME	Nombre	X (UTM)	Y (UTM)	Z(m)	Prof (m)	Metodo de medida	Observaciones
213630051	Pozo de Vicente	498939	4224370	708	195	Con sensor	<i>Fuera de dominio del modelo. Red IGME</i>
203670066	El Porvenir I	471082	4212195	791		Compresor	Red IGME
203580029	Piezómetro Camino	483383	4224899	560			<i>Mide niveles en trias. Red IGME</i>
203640038	Cabeza Alba	482215	4216563	544	220		Red IGME
	Pichilín I viejo	482637	4212843	641	480		
	Pichilín II	483784	4213157	551	480	Con sensor en Pichilín II	Red IGME
203680043	La Imagen II	478049	4207118	631	680	Compresor	Red IGME
203680045	La Imagen I	478196	4207245	621		compresor	Red IGME
203640014	La Peñuela I	482417	4219906	434	150	Sondeo desistalado	Red IGME
203660084	El Puntal	466870	4212140	745		Compresor	Red IGME
	La Caleruela	491709	4211450	472			Red IGME
213620058	Esperanza Lara	496191	4217490	608			Red IGME
	El Huerto	486435	4212124	551			<i>Registra escama. Red IGME</i>
	El Ahorcado	485914	4211456	510		sonda	Actualmente desaparecido
203650083	Los Carrizales	461118	4212320	662			
	Ctjo Herrera	483900	4221050	420			
	S-1	489941	4224823	426	156		<i>Fuera de dominio del modelo. Red IGME</i>
213610096	S-2	485886	4223158	424	67		Red IGME
213610097	S-3	486123	4222785	473	93		Red IGME
203640058	S-4	482997	4222145	458	125		Red IGME
203640059	S-5	481028	4222619	483	87		Red IGME
203640060	S-6	482718	4220660	395	135		<i>Registra niveles colagado. Red IGME</i>
203640061	S-7	477106	4220856	431	118		Red IGME
203640062	S-8	476604	4218457	420	94		Red IGME
203630026	S-9	472248	4220112	375	104		<i>Fuera de dominio del modelo. Red IGME</i>
203640063	S-10	482735	4220668	391	127		Red IGME
203640064	S-11	477135	4220855	431	150		Red IGME
203580040	S-12 / S-13	483350	4224815	549	139		Red IGME
203640043	S-14	482765	4220664	391			<i>Registra niveles colagado. Red IGME</i>

Tabla 2.6. Sondeo con registros piezométricos durante el período 2000/01-2005/06

La compartimentación del acuífero por fracturas es un rasgo conocido que dista de haberse caracterizado exhaustivamente. Más aproximado, pero lejos ser exacto, es el conocimiento sobre la situación de los sondeos, régimen de bombeo y radio de influencia. Ambos aspectos, fracturas y extracciones, influyen en la piezometría y su conocimiento deficiente impide un ajuste riguroso de forma conjunta de cada una de las series de niveles observadas. Por otro lado, la extensión de las series es desigual, un 60 % de los sondeos poseen 4 datos, o menos, mientras que el 30 % tiene series de 20 a 30 datos. Todo lo expuesto dificulta la calibración de un modelo, no sólo por la incertidumbre que les inherente a los datos, sino que introduce un “cierto ruido” en la consecución del ajuste

entre niveles observados y calculados. Debido a ello, con el objetivo de acrecentar la consistencia de la calibración se ajustaron las series observadas agrupadas en cinco ambientes hidrogeológicos (Tabla 2.7, Figura 2.33). Valida esta estrategia, observar que en cada grupo las series tienen tendencias y amplitudes de oscilación similares. Sin embargo, la escasez de datos de ciertos grupos incrementa la incertidumbre en la caracterización numérica de algunos rasgos del acuífero. Por otro lado, a partir de Julio del 2005, con la incorporación a la red los sondeos ejecutados en el sector libre (S-1 a S-14) el IGME comienza a controlar con una regularidad mensual a la red, con lo cual masa de información se ve sensiblemente incrementada para próximos trabajos de modelación.

Nº GRUPO	DESCRIPCIÓN		Nº Sondeos	Nº datos
1	Sector Confinado	Entorno del Tortoniense	3	34
2		Zona central	8	114
3	Sector libre	Margen derecha Guadalimar, confluencia A. Mostazar	3	28
4		Margen derecha Guadalimar	3	10
5		Margen izquierda Guadalimar	5	14
TOTAL			22	200

Tabla 2.7. Modelo transito: agrupamiento de puntos de observación

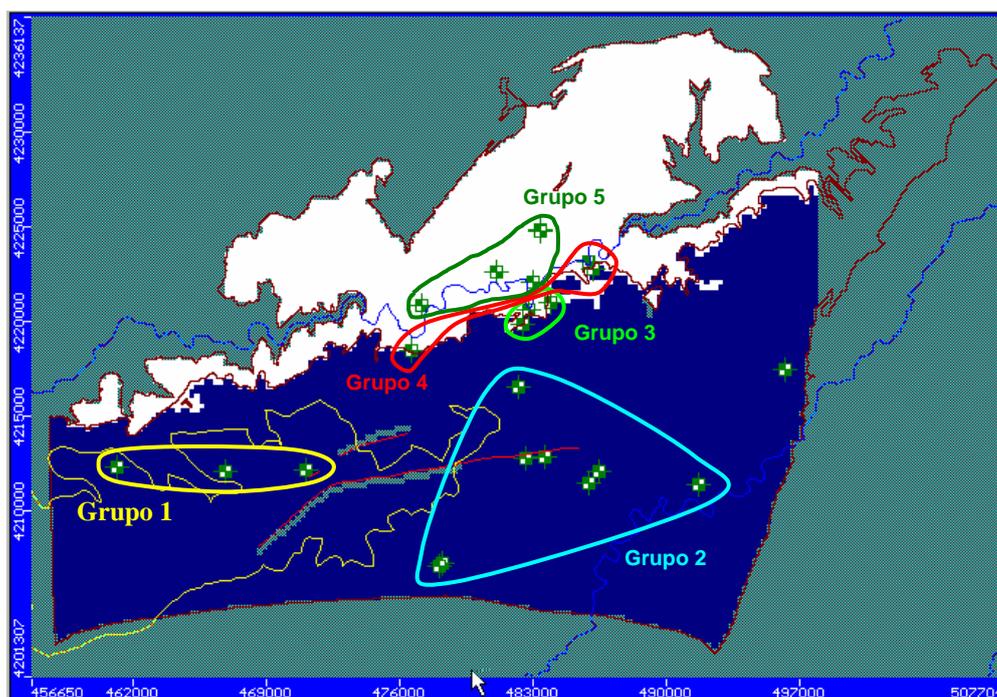


Figura 2.33. Modelo transito: agrupamiento de puntos de observación

Finalmente, es interesante observar que el promedio del descenso medio anual de los niveles en los sondeos situados en el sector confinado es 9.15 m. Variando el descenso medio anual para 5 de estos 9 sondeos entre los 10.5 m y los 13 m. Los hidrogramas de estos puntos se pueden apreciar en la Figura 2.34. En el sector libre, el Piezómetro Camino tiene un descenso medio anual de 7 m, con descensos y recuperaciones estacionales acusadas, propio de este tipo de medio. En contraste con lo descrito anteriormente, los sondeos cercanos al Guadalimar no acusan descensos de niveles relevantes (Figura 2.35).

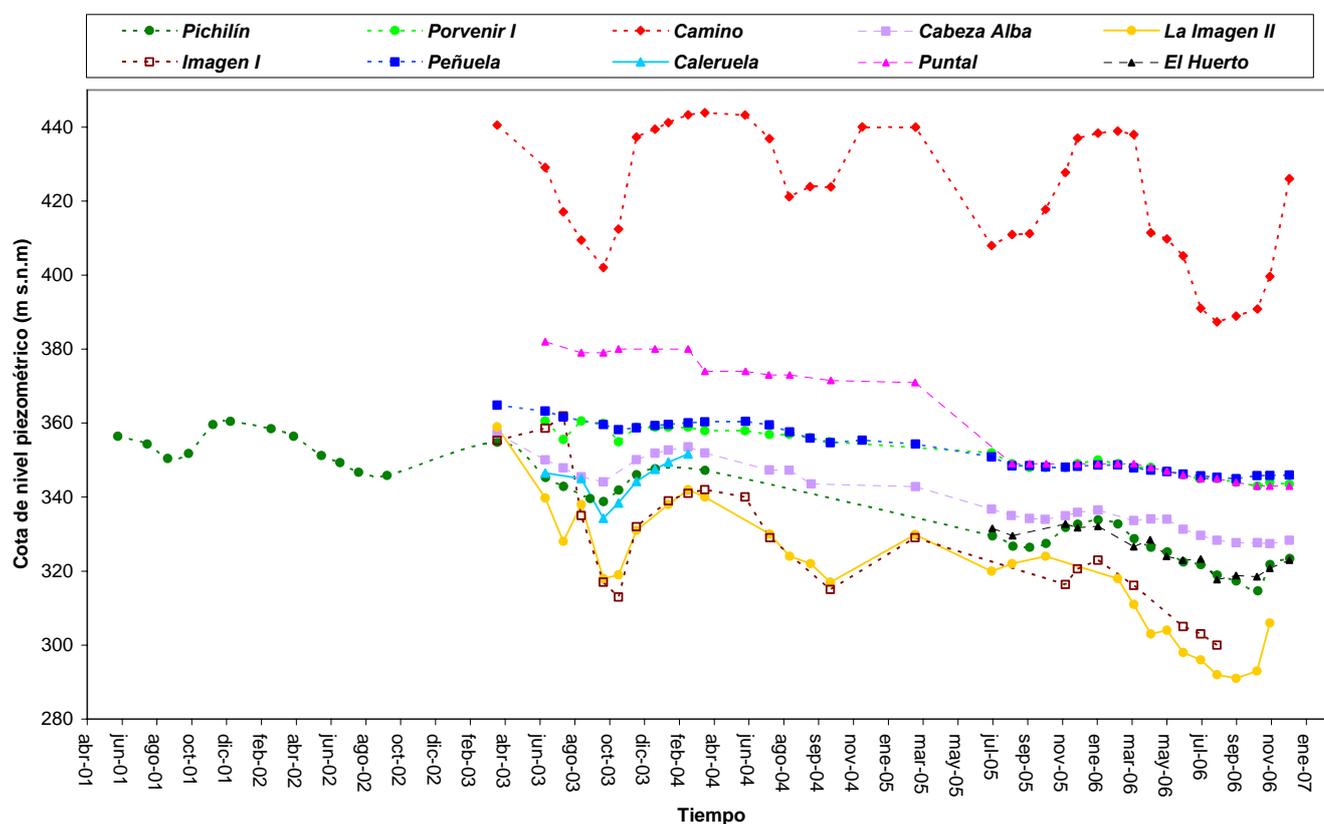


Figura 2.34. Hidrogramas de los sondeos del sector confinado del acuífero y del piezómetro Camino en el sector libre.

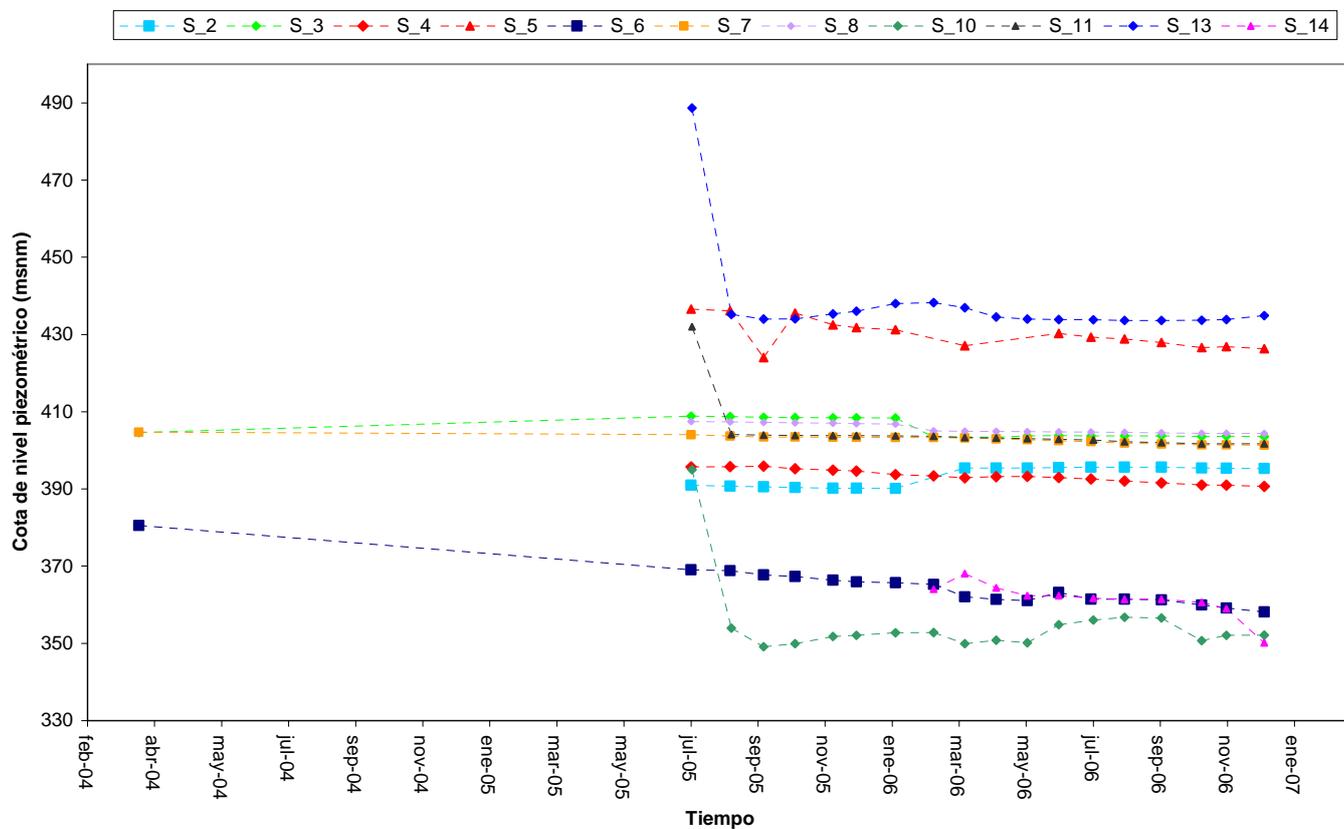


Figura 2.35. Hidrogramas de los sondeos próximos al río Guadlimar.

III. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN ESTACIONARIO.

El modelo estacionario procuró representar la situación media del período 1960/62–1994/95. Este escenario correspondería al estado en régimen natural del acuífero, previo a su explotación. Esta modelación tuvo un doble objetivo: identificar un modelo conceptual plausible y establecer un balance hídrico en un escenario no influenciado. Los modelos correspondientes a las conceptualizaciones del acuífero que se contrastaron se calibraron con la piezometría del año 1996 (Figuras 2.32 y 3.1). Esta información es de pobre calidad, pues la toma de datos adoleció de falta de rigor. En algunos puntos, dada la profundidad del agua y la falta de medios de medición adecuados, el nivel fue estimado por la posición de la bomba; en otros no se discriminó, o no se registró, si los niveles eran dinámicos o no. Sin embargo, si estos datos se analizan críticamente y depuran, tienen el atractivo de ser la única información que ofrece una visión de la piezometría del acuífero en un momento, 1996, lo suficientemente distante del escenario de fuerte explotación que se comienza a desarrollar a partir del año 2000.

III.1. Identificación de un modelo conceptual plausible

La identificación de un modelo conceptual consistente, esto es que no presente contradicciones con la descripción que propone del funcionamiento del sistema hidrogeológico, y coherente con las observaciones realizadas del sistema es un requisito necesario de un modelo numérico. En particular se debe ser más exigente en este requerimiento si el modelo numérico tiene como objetivo ser una herramienta de apoyo en la gestión de los recursos hídricos. La identificación del modelo conceptual se basó en la información piezométrica de 1996 y en la información hidroquímica e isotópica correspondientes a los trabajos realizados por el laboratorio virtual de hidrología isotópica CEDEX-IGME (CEDEX, 2006, Rodríguez et al. ,2007).

III.1.1. Análisis de la información piezométrica

Como ya se expuesto anteriormente, la información piezométrica de 1996, a pesar de su pobre calidad, en principio ofrecerían un “bosquejo” de la situación del acuífero en un estado muy próximo al natural. Debido a ello si se tiene como objetivo la identificación del modelo conceptual del acuífero resulta más adecuado realizarlo con esta información y en régimen estacionario, que en régimen transitorio en un escenario de explotación. Pues para este escenario los niveles dinámicos resultantes de la influencia de los bombeos dificultarían una interpretación correcta de los patrones de flujo, si se está procurando conocer el funcionamiento del acuífero.

Para un análisis a grandes rasgos de la piezometría de 1996, se agruparon con un criterio espacial los puntos con datos de nivel, definiéndose 5 grupos. En cada uno de ellos se

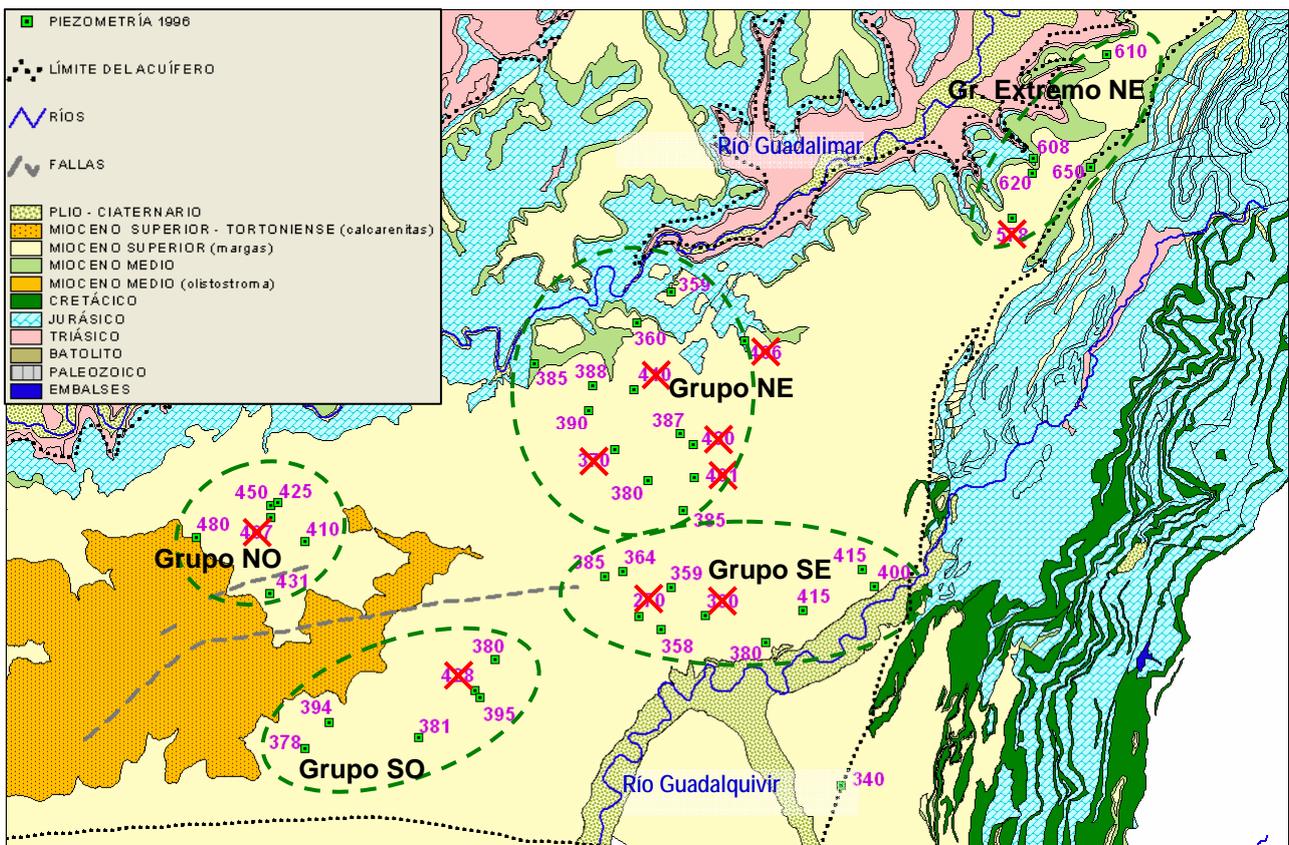


Figura 3.1. Piezometría de 1996. Agrupamiento de los datos

desestimaron aquellos datos que al diferir de manera notoria con la tendencia de los niveles vecinos sugerían que eran registros no representativos, debido a que podrían corresponder a niveles colgados, o a niveles dinámicos o, simplemente, a una toma de datos incorrecta (Figura 3.1). Una vez depurados los datos se observó que el grupo situado en el extremo noreste (Gr Extremo NE), se situaba fuera del dominio del modelo, sus niveles piezométricos varían entre los 610 m y los 650 m y, probablemente, son representativos de las escamas del acuífero. Dentro del dominio del modelo, los registros mayores se encuentran en el grupo noroeste (grupo NO) cuyos niveles varían de 480 m a 410 m, decreciendo según se alejan los puntos de la proyección en planta de las calcarenitas miocenas (acuífero detrítico de Úbeda). Estos datos parecen definir un domo de recarga. En el grupo situado en el suroeste del acuífero los niveles entre los 395 m y 380 m. En el agrupamiento de los sondeos situados en el sureste del acuífero se observa que los niveles decrecen desde los 415 m en el borde este del dominio del modelo, donde probablemente los puntos se emplacen en escamas del acuífero, hasta los 360 m en el sector central del acuífero. Esto sugeriría una posible recarga desde las escamas del acuífero. Finalmente, en el agrupamiento de puntos del sector noreste del acuífero, en la zona del contacto entre los sectores confinado y libre del acuífero los niveles son del orden los 360 m y en el sector confinado, alejado del borde los niveles varían entre los 390 m y los 385 m (Figura 3.2).

Un análisis de la información piezométrica sugeriría en el sector confinado del acuífero las recargas siguientes: desde el río Guadalimar en los extremos occidental y oriental del acuífero; por percolación a través de las margas miocenas procedente de los niveles calcareníticos del acuífero detrítico superior y otra desde las escamas del acuífero y/o de las formaciones vecinas –jurásico de Cazorla-. Y, por otro lado, esta piezometría indicaría una descarga hacia el río Guadalimar, en el norte, y otra salida en el centro del acuífero hacia el sur.

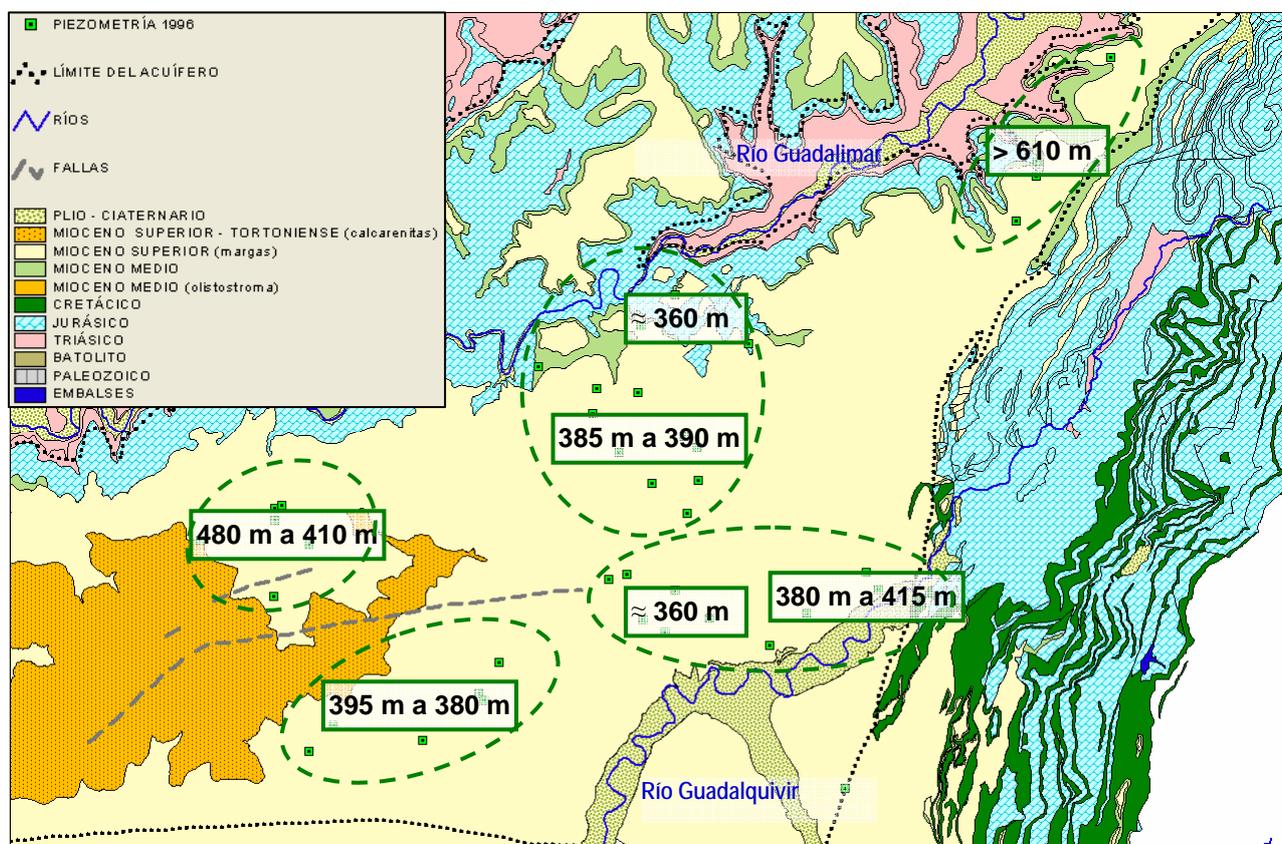


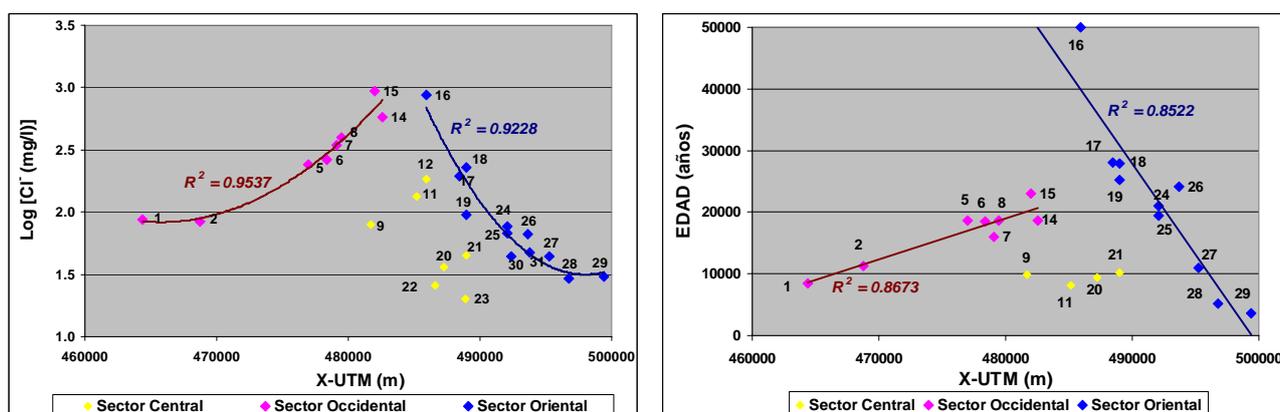
Figura 3.2. Análisis de tendencias en la piezometría de 1996.

III.1.2. Análisis de la información hidroquímica e isotópica

Este análisis se basa en los trabajos realizados por el laboratorio virtual de hidrología isotópica CEDEX-IGME (CEDEX, 2006) y fueron presentados parcialmente en el trabajo de Rodríguez et al. (2007).

En estos trabajos se analizan la evolución espacial del ión Cl^- y la datación de las aguas con ^{14}C . Las gráficas tanto del logaritmo de la concentración de Cl^- , como de la edad del agua, con relación a la coordenada X-UTM (Fig 3.3 a y b) permiten, mediante las correlaciones pertinentes, apreciar una clara estructuración espacial de las muestras. Se identifican dos grupos de puntos muestreados, uno en el sector oriental y otro en el occidental de las calizas. En las gráficas de la Figura 3.3, se observa como las muestras de ambos grupos acorde se sitúan más cerca del sector central del acuífero (X UTM-30N- \approx 483000 m) se cargan en Cl^- y sus aguas tienen mayor edad. Hidroquímicamente, se identifican orígenes distintos para cada grupo. Ello y el emplazamiento de los puntos

muestreados les llevó a proponer un patrón de flujo en el acuífero (Figura 3.4): en el sector oriental, el flujo tiene una dirección ENE a OSO y su recarga se produciría en los afloramientos cercanos al río Guadalimar y, eventualmente, desde el jurásico de Cazorla y, en el sector occidental, el flujo tiene una dirección ONO a ESE y su recarga se produciría en los afloramientos jurásicos cercanos al río Guadalimar y, por percolación, desde las calcarenitas miocenas del acuífero detrítico de Úbeda.



a. Relación Log 10 (Cl-(mg/l)) vs X-UTM (m) (modificado de Rodriguez et al. 2007) b. Edad de las aguas (años) vs X-UTM (m) (de Rodriguez et al. 2007)

Figura 3.3. Estructuración espacial de los datos hidroquímicos e isotópicos

A grandes rasgos, el patrón de flujo propuesto es coherente con la piezometría de 1996 (Fig. 3.2). En ésta, se aprecia en su extremo noroccidental un domo piezométrico en la vecindad del detrítico de Úbeda, que bien puede interpretarse como un domo de recarga. Igualmente en el sector central se aprecia una divisoria de aguas, con un sentido de flujo hacia el Sur y otro hacia el río Guadalimar.

III.1.3. Contraste de los distintos modelos conceptuales

El patrón de flujo en el sector confinado del acuífero y con ello sus posibles recargas y descargas que indican los análisis piezométricos e hidroquímico e isotópico son coincidentes y difieren del modelo conceptual del acuífero que se ha aceptado hasta el presente. El estudio numérico para identificar el modelo conceptual más coherente con el

conocimiento sobre el acuífero siguió el principio de parsimonia: se calibraron sucesivos modelos numéricos que se correspondían con modelos conceptuales de complejidad progresiva en su estructura, acorde incorporaban rasgos plausibles a interpretaciones u observaciones realizadas. El modelo inicial fue el más simple y correspondía a la conceptualización aceptada hasta el presente. A continuación se presentarán los resultados de los modelos contrastados más relevantes.

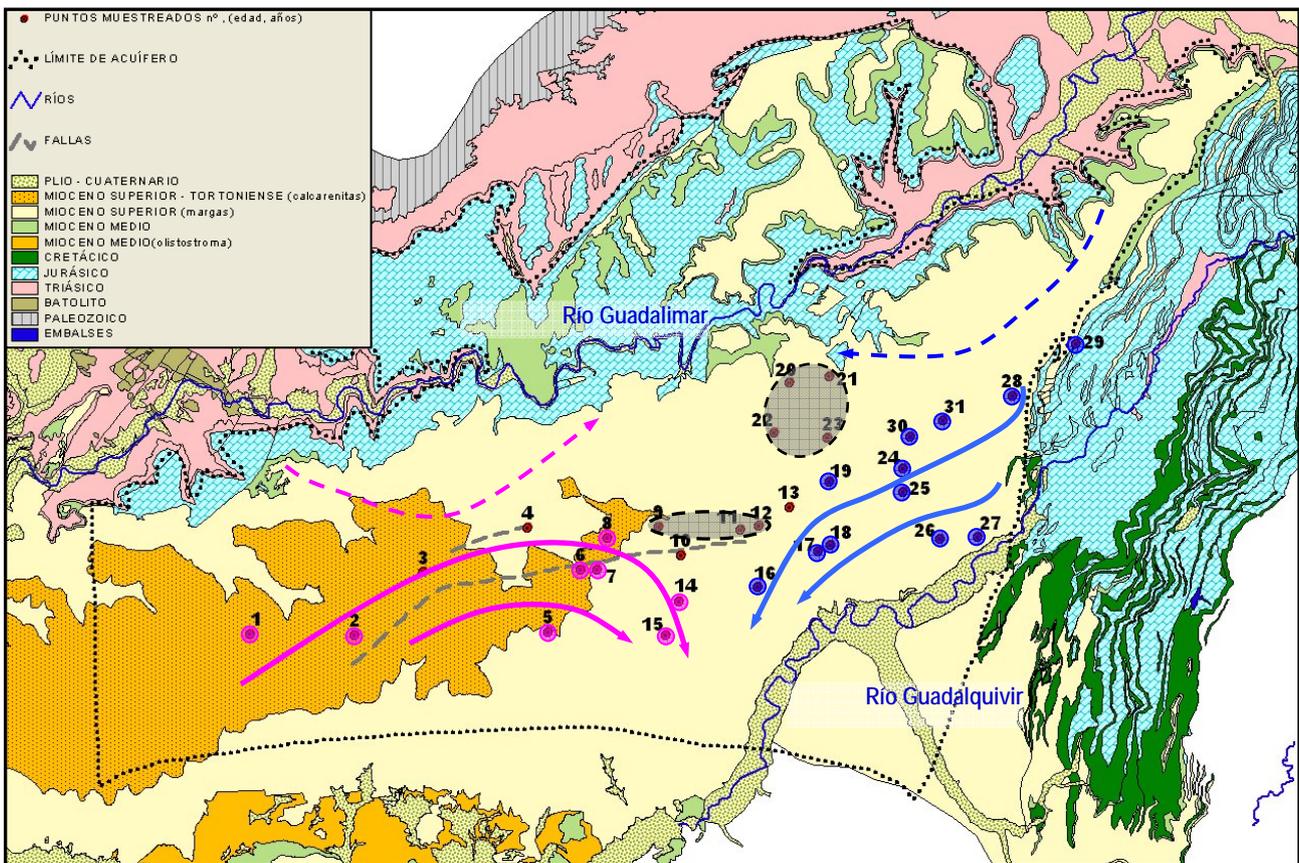


Figura 3.4. Puntos muestreados en campaña 2006 hidroquímica e isotópica.
Patrón de flujo en régimen natural

- Modelo conceptual 1: la recarga sólo se produce en el afloramiento de las calizas y su origen es la infiltración de la precipitación. La salida del acuífero es sólo por descarga al río Guadalquivir y la totalidad de su perímetro es un borde impermeable.
- Modelo conceptual 2: la recarga se produce por infiltración de la precipitación en el afloramiento de las calizas y por percolación desde las calcarenitas miocenas del acuífero detrítico de Úbeda, a través de las margas miocenas. La salida del acuífero

es sólo por descarga al río Guadalimar y la totalidad de su perímetro es un borde impermeable.

- Modelo conceptual 3: la recarga se produce por infiltración de la precipitación en el afloramiento de las calizas y por percolación desde las calcarenitas miocenas del acuífero detrítico de Úbeda, a través de las margas miocenas. La salida del acuífero es sólo por descarga a los ríos Guadalimar y Guadalquivir, el resto del perímetro del acuífero es un borde impermeable.
- Modelo conceptual 4: la recarga se produce por infiltración de la precipitación en el afloramiento de las calizas, por percolación desde las calcarenitas miocenas del acuífero detrítico de Úbeda, a través de las margas miocenas, y desde las escamas orientales de este acuífero, así como desde la unidad de Cazorla. La salida del acuífero es por descarga al río Guadalimar y en dirección sur hacia la Unidad Olistostrómica. El resto del perímetro del acuífero es un borde impermeable.
- Modelo conceptual 5: la recarga se produce por infiltración de la precipitación en el afloramiento de las calizas y por percolación desde las calcarenitas miocenas del acuífero detrítico de Úbeda, a través de las margas miocenas. La salida del acuífero es por descarga al río Guadalimar y en dirección sur hacia la Unidad Olistostrómica. El resto del perímetro del acuífero es un borde impermeable.

Deben realizarse las siguientes observaciones:

- La descarga en dirección Sur hacia la Unidad Olistostrómica, en los modelos numéricos correspondientes a los modelos conceptuales 4 y 5 se representó con una condición de contorno de dren. A esta condición de contorno se le asignó una cota de descarga 370 m que corresponde a la cota del Guadalquivir al salir aguas abajo del dominio del modelo. Se considera, con cierta consistencia, que el nivel del río Guadalquivir es indicativo del nivel base regional. Así, al asumir esta condición de contorno se asume implícitamente que en régimen natural el acuífero en su límite Sur se encuentra vinculado al nivel base regional, o, lo que es lo mismo se encuentra integrado en el sistema regional de flujo

- En el estudio numérico se caracterizó esta condición en situación espacial y en frente de extensión. No obstante, debe considerarse, que no ha existido indicio u observación que valide esta condición de contorno, aunque conceptualmente sea plausible. Eventualmente, esta salida identificada en la modelación puede corresponder a una explotación temprana del acuífero no registrada en la información existente.
- En algunos modelos se estudió como variante eliminar el sector del acuífero en la otra margen del Guadalquivir, por no existir un conocimiento fehaciente de este. En ningún caso ello produjo una mejora apreciable, desestimándose. No obstante, esto debería estudiarse.

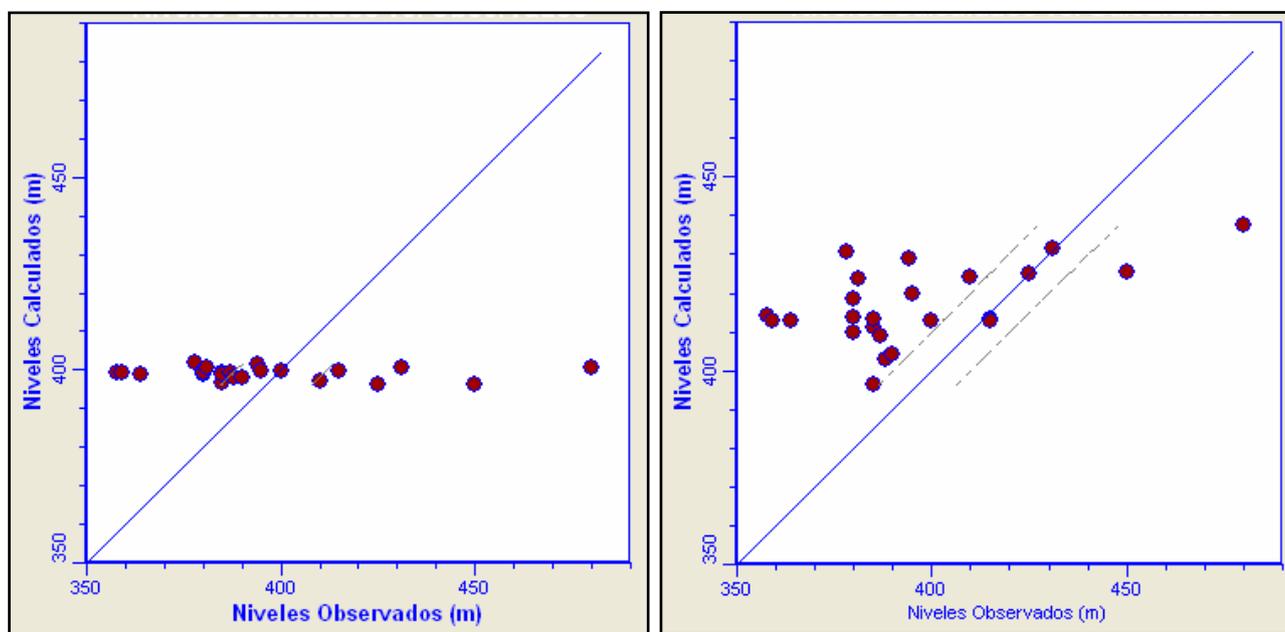
Se adoptaron los criterios de calibración siguientes:

- Media del valor absoluto de los residuos de nivel = $(1/n) \sum |r_h|$
- Desviación estándar de los residuos de nivel = $[(1/n) \sum r_h^2]^{1/2}$

Donde el residuo de nivel, r_h , es la diferencia entre los niveles calculado, h_c , y observado, h_o , en un punto y un tiempo de observación dado, $r_h = (h_c - h_o)$, y n es el número total de observaciones realizadas. En la Tabla 3.1 se presentan los valores de los criterios de calibración y en la Figura 3.5 los gráficos entre los niveles calculados y observados resultantes de la calibración de los modelos numéricos correspondientes a los modelos conceptuales anteriormente descritos. El modelo que se representó la conceptualización 5 fue el que alcanzó, de forma notoria un mejor ajuste con la piezometría de 1996 (Tabla 3.1 y Figura 3.5.e) y, a su vez, fue el que reprodujo mejor el patrón de flujo (Figura 3.6) que sugería la información piezométrica (Figura 3.2) e hidroquímica e isotópica (Figura 3.4). Debido a ello se considera que este modelo conceptual es consistente y es el más coherente con la información que actualmente se tiene sobre el acuífero. Por lo tanto, los comentarios acerca de los parámetros calibrados y sobre el balance hídrico para el régimen estacionario se corresponden a los resultados de la calibración de este modelo. Asimismo, este es el modelo que se calibró en el régimen transitorio.

MODELO CONCEPTUAL -descripción-	CRITERIOS DE CALIBRACIÓN	
	Media del valor absoluto de residuos	Desviación estándar de los residuos
1- Recarga: afloramiento calizas. Salida: río Guadalimar. -Modelo conceptual "histórico"-	22,357	28,239
2- Recarga: afloramiento calizas + desde acuífero tortoniense Salida: río Guadalimar	26,281	31,651
3- Recarga: afloramiento calizas + desde acuífero tortoniense Salida: río Guadalimar + río Guadalquivir	21,824	25,907
4- Recarga: afloramiento calizas + desde acuífero tortoniense + escamas orientales. Salida: río Guadalimar + U. Olistost. (?)	15,749	20,688
5- Recarga: afloramiento calizas + desde acuífero tortoniense. Salida: río Guadalimar + U. Olistost./explotación temprana (?)	14,117	16,799

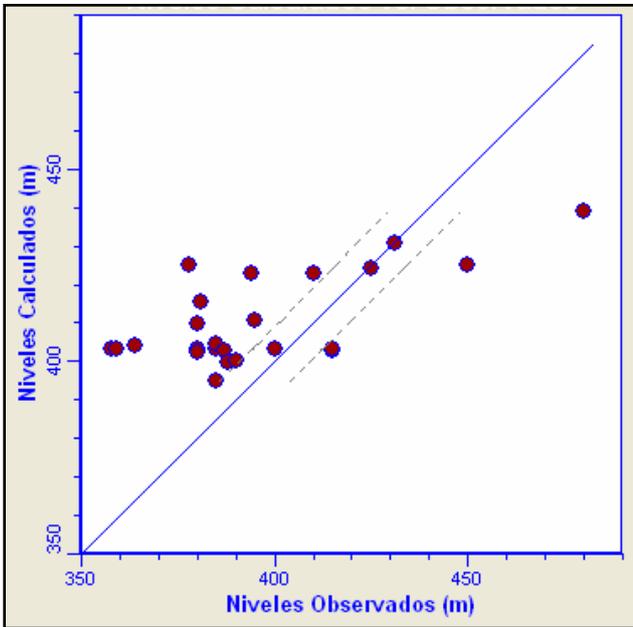
Tabla 3.1. Criterios de calibración para los modelos contrastados



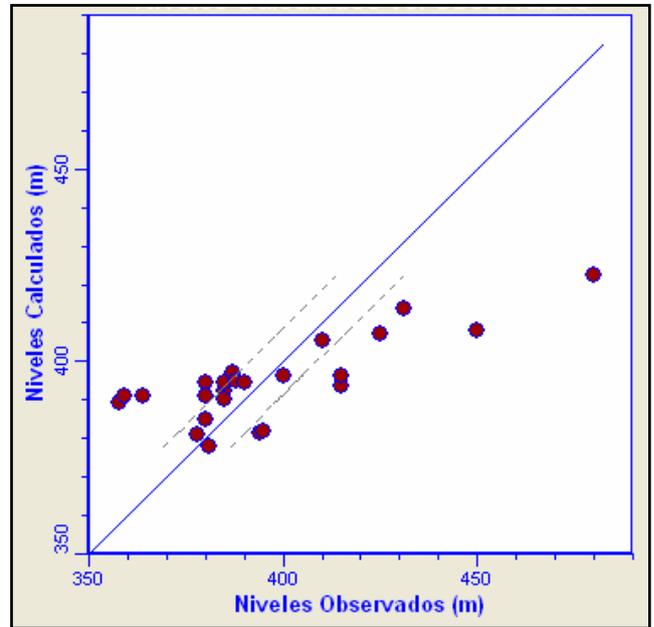
a- Modelo numérico: conceptualización 1

b- Modelo numérico: conceptualización 2

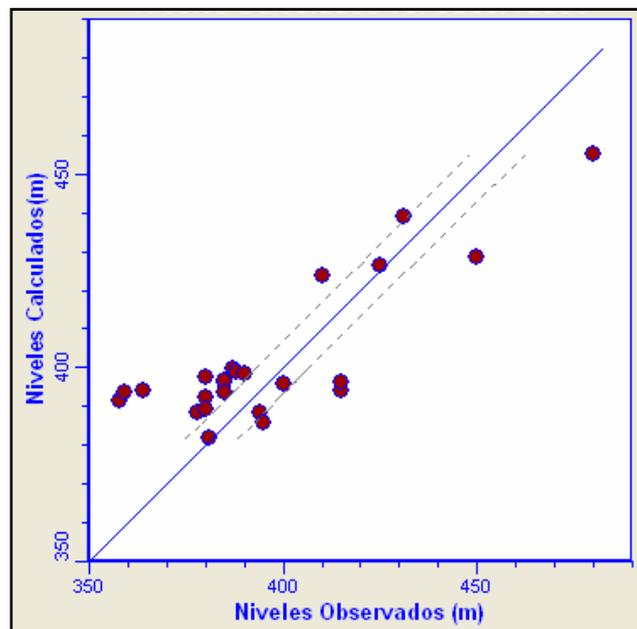
Figura 3.5. Calibración de los modelos contrastados: niveles medidos vs. calculados



c- Modelo numérico: conceptualización 3



d- Modelo numérico: conceptualización 4



e- Modelo numérico: conceptualización 5

Figura 3.5. Calibración de los modelos contrastados: niveles medidos vs. Calculados (continuación)

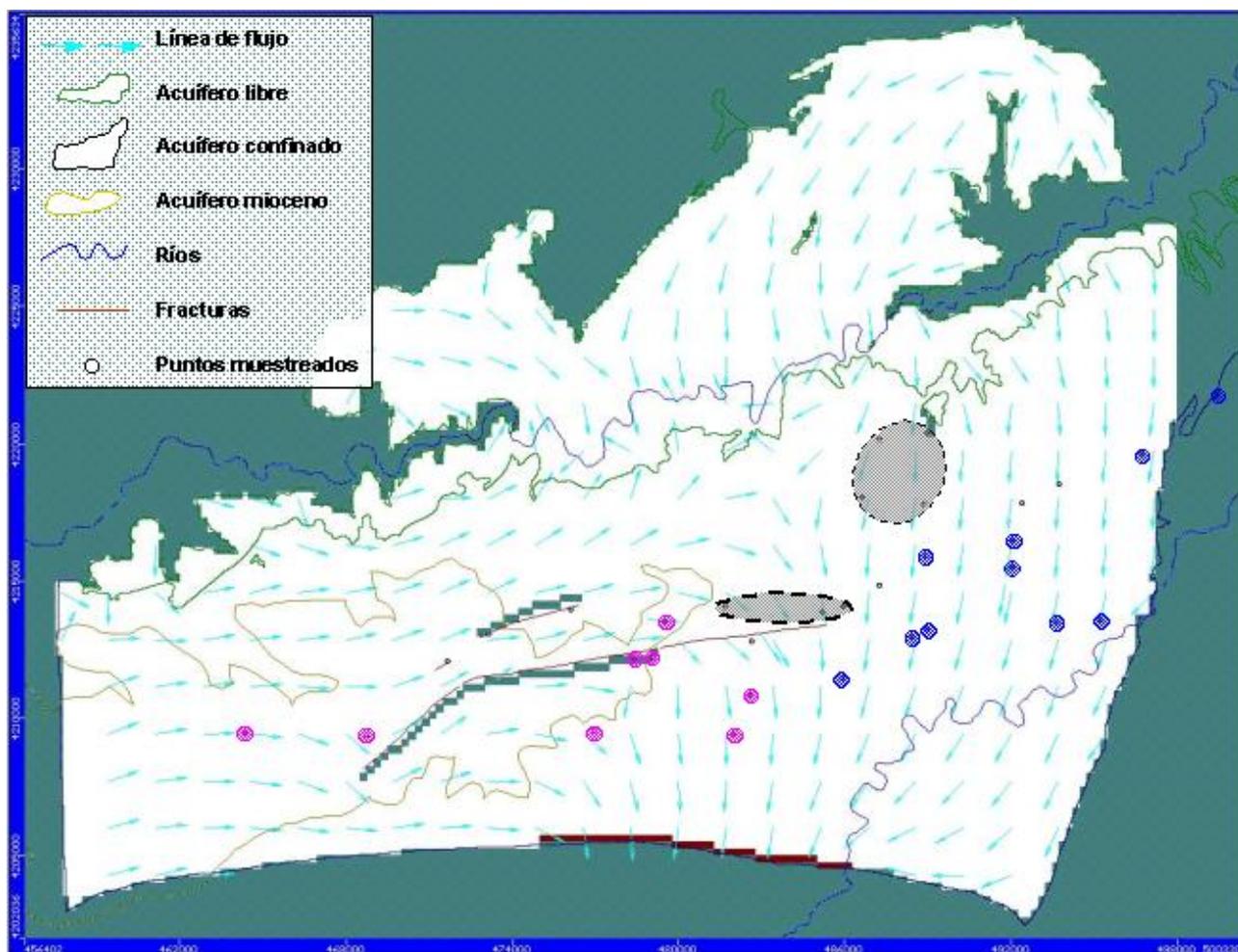


Figura 3.6. Calibración modelo de la conceptualización 5: patrón de flujo resultante

III.2. Parámetros calibrados

La calibración simultánea de la recarga, q , y la permeabilidad, k , en un modelo estacionario es matemáticamente una indeterminación, al existir infinitos pares de valores que serían solución de la ecuación de flujo. Sin embargo, conocer el sistema real restringe las soluciones válidas y permite identificar valores plausibles para dichos parámetros. Los parámetros resultantes de la calibración se dan en la Tabla 3.2. La recarga en el sector libre representa respecto a la precipitación media en el acuífero para el período 1960/61-1994/95 (611 mm/a) el 16,5 % y el 28,5 % según estén cubiertos por conglomerados miocenos o aflore. Inicialmente, la recarga en el afloramiento se estimó en un 32,5 % de

la precipitación. Los valores de permeabilidad son del orden de los obtenidos en los ensayos.

PARÁMETRO			VALOR
RECARGA (mm/a)	Sector libre	Cubierto por conglomerados miocenos	100
		Afloramiento de las calizas	175
	Sector confinado	Desde calcarenitas tortonienses	150
PERMEABILIDAD (m/d)	Sector libre		1
	Sector confinado		10

Tabla 3.2. Parámetros calibrados en el modelo en régimen estacionario (situación media: 1960/62–1994/95)

III.3. Balance Hídrico: régimen estacionario

El balance hídrico del modelo estacionario, corresponde a la situación hidroclimática media del período 1960/61-1994/95 (Tabla 3.3). Época en que el acuífero se supone se encontraba en régimen natural no influenciado. Al valorar este balance se debe tener en cuenta no sólo la incertidumbre inherente tanto al conocimiento de este acuífero particularmente complejo y a la limitación de su representación numérica, sino a un aspecto objetivo que da marco al balance: el intervalo de estudio incluye un período particularmente húmedo que se extiende desde el inicio de la década de los sesenta hasta mediados de la década de los setenta del pasado siglo. El balance hídrico se presenta en tres sectores: sector libre en márgenes derecha e izquierda del Guadalimar y el sector confinado. Así, las interrelaciones entre sectores se presentan como salidas para uno y entradas para el otro. La entrada total al acuífero se evaluó en 51,58 hm³/a y comprende la infiltración de la precipitación, 34,72 hm³/a (67,3 % de la entrada total); la recarga desde las calcarenitas tortonienses, 16,72 hm³/a (32,4 % de la entrada total), y la recarga desde el Guadalimar, 0,14 hm³/a (0,3 % de la entrada total). Las salidas del acuífero son al río Guadalimar, 35,79 hm³/a (69,4 % de la salida total), por manantiales, 1,84 hm³/a (3,6 % de la salida total), y hacia la Unidad Olistostrómica, 13,95 hm³/a (27 %

de la salida total). Debe observarse, que en régimen natural parece no existir aportación del sector del acuífero de la margen derecha del Guadalimar al de la margen izquierda y que la recarga desde las calcarenitas tortonienses para este período puede estar sobrevalorada y debería revisarse en trabajos futuros.

ACUÍFERO LIBRE MARGEN DERECHA		
ENTRADAS (hm ³ /a)	Infiltración de la precipitación	23,48
	Infiltración del río Guadalimar	0,08
SALIDAS (hm ³ /a)	Descargas por manantiales	1,84
	Descargas al río Guadalimar	21,72
ACUÍFERO LIBRE MARGEN IZQUIERDA		
ENTRADAS (hm ³ /a)	Infiltración de la precipitación	11,24
	Infiltración del río Guadalimar	0,06
	Recarga procedente del acuífero confinado	14,28
SALIDAS (hm ³ /a)	Descargas al río Guadalimar	14,07
	Descargas al acuífero confinado	11,51
ACUÍFERO CONFINADO		
ENTRADAS (hm ³ /a)	Infiltración del acuífero libre	11,51
	Infiltración desde el acuífero mioceno	16,75
SALIDAS (hm ³ /a)	Descargas al acuífero libre	14,21
	Descargas a Unidad Olistostrómica	13,95

Tabal 3.3. Balance Hídrico: régimen estacionario

IV. MODELACIÓN NUMÉRICA: RÉGIMEN TRANSITORIO.

En régimen transitorio se modeló el período 2000/01–2005/06, en el que se desarrolla y establece la fuerte explotación que hoy sufre el acuífero. El objetivo de este modelo fue establecer un balance hídrico en un escenario de extracciones importantes.

La información piezométrica con que se calibró el modelo fueron 200 registros de 22 sondeos, 18 de ellos integran la red de 25 puntos de observación que controla el IGME. En la Sección II.6 se analiza con mayor detalle las características de la información piezométrica. Acerca de lo expuesto en esta Sección es de interés recordar lo referente a la estrategia seguida para dotar de mayor consistencia a la calibración. La compartimentación del acuífero por fracturas es un rasgo conocido que dista de haber sido caracterizado exhaustivamente. Más aproximado, pero lejos ser exacto, es el conocimiento sobre la situación de los sondeos, régimen de bombeo y radio de influencia. Ambos aspectos, fracturas y extracciones, influyen en la piezometría y su conocimiento deficiente impide un ajuste riguroso de forma conjunta de cada una de las series de niveles observadas. Lo expuesto aunado a desigual extensión de las series piezométricas contribuyen dificultar la calibración. No obstante, a fin de acrecentar la consistencia del proceso de calibración se ajustaron las series observadas agrupadas en cinco ambientes hidrogeológicos (Tabla 4.1 y Figura 4.1). Valida esta estrategia, observar que en cada grupo las series tienen tendencias y amplitudes de oscilación similares.

Nº GRUPO	DESCRIPCIÓN	
1	Sector Confinado	Entorno del Tortonense
2		Zona central
3	Sector libre	Margen derecha Guadalimar, confluencia A. Mostazar
4		Margen derecha Guadalimar
5		Margen izquierda Guadalimar

Tabla 4.1. Descripción de los agrupamientos de puntos de observación piezométrica

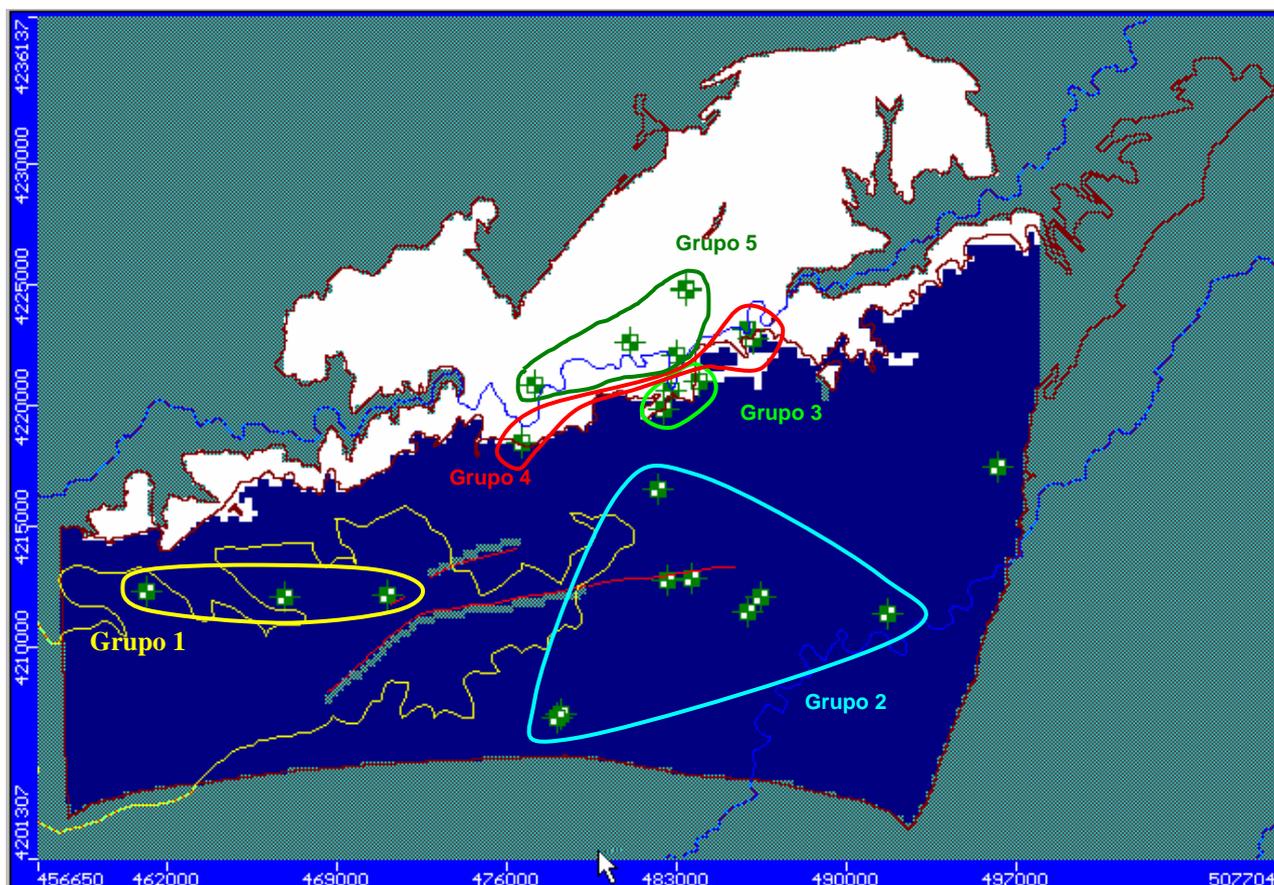


Figura 4.1. Agrupamiento de puntos de observación

IV.1. Definición de la condición inicial

Se debe observar, que si bien el período 2000/01-2005/06 corresponde a un escenario de una explotación importante del acuífero, este ya venía sufriendo extracciones apreciables en los años previos. No debe olvidarse, que si bien se simuló el régimen estacionario considerando que en 1996 el acuífero estaba prácticamente en una situación hídrica no influenciada, una las hipótesis acerca de la descarga en dirección Sur que se identificó fue que esta podía deberse a una incipiente explotación de las recursos subterráneos. Por otro lado, desde 1996 hasta el inicio del período simulado en régimen transitorio el lapso

transcurrido fue de sólo 4 años y aunque se desconoce durante este corto intervalo la infraestructura y el régimen de explotación del acuífero, sí se sabe que durante el mismo se fueron perforando y poniendo en servicio los sondeos que ya en el año 2000 realizaban una explotación importante. Por todo ello, se consideró que la situación del acuífero en 1996, esto es el resultado del modelo en régimen estacionario, no era la condición inicial pertinente para modelar el régimen transitorio. Así, se siguió la siguiente estrategia para definir una condición inicial que se pudiera asumir como una alternativa más aceptable: 1, para una estructura de modelo dada se realizaba una primera simulación en régimen transitorio adoptándose como condición inicial los resultados del régimen estacionario -la situación del acuífero en 1996- y 2, la piezometría correspondiente al primer año de la simulación ejecutada en el paso 1 era adoptada como condición inicial para la modelación definitiva del régimen transitorio.

Esta estrategia responde a presuponer que, partiendo de una situación no influenciada, la incidencia sobre el acuífero de las perturbaciones definidas para el año hidrológico 2000/01 al final de este serían iguales a las que se producirían al final de un período de 4 durante el cual se fueran implementando progresivamente las perturbaciones definidas para el 2000/01. Se debe observar, que cada estructura de modelo que se defina sólo produce una única piezometría inicial

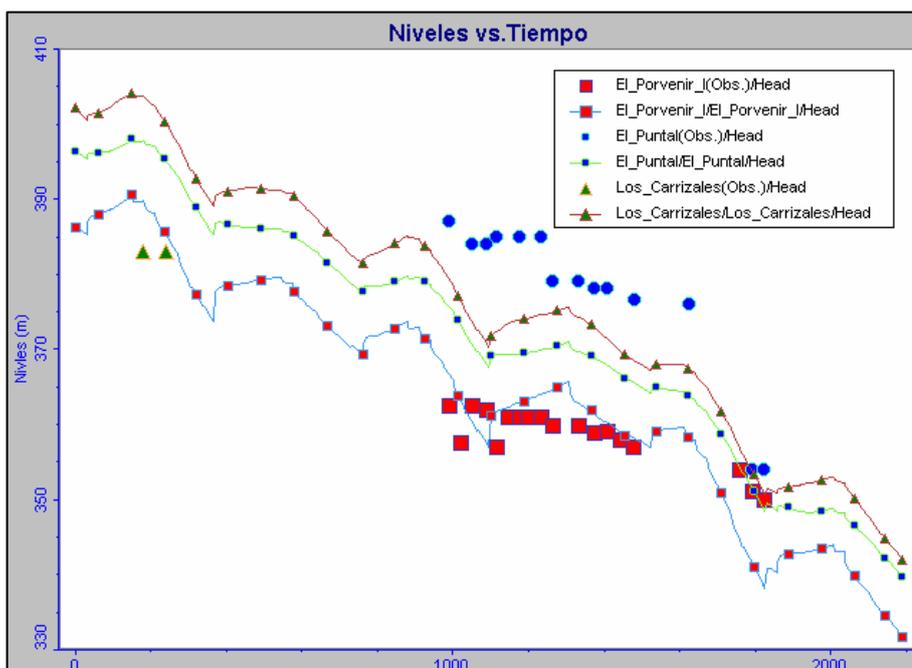
IV.2. Caracterización histórica de las extracciones y calibración de los parámetros

Previo a la calibración del modelo transitorio fue necesario caracterizar la evolución durante el período 2000/01-2005/06 las extracciones. A los 233 sondeos censados, y acorde a la modulación de sus bombeos, se les supuso una progresión histórica. Se valoraron 5 escenarios para los que la progresión de las extracciones culminaba en el 2005/06 con 35,574 hm³ -lo estimado en el estudio previo-, 40 hm³, 45 hm³, 50 hm³ y 55 hm³. Se identificó al escenario de 40 hm³ extraídos en el 2005/06 como el más realista, ello corresponde en el modelo a una extracción anual media para el período 2000/01-2005/06 de 38,892 hm³, la progresión se indica en la Tabla 4.2.

Año	Extracción (hm ³)
2000/01	46,55
2001/02	22,98
2002/03	48,66
2003/04	22,53
2004/05	55,62
2005/06	37,01

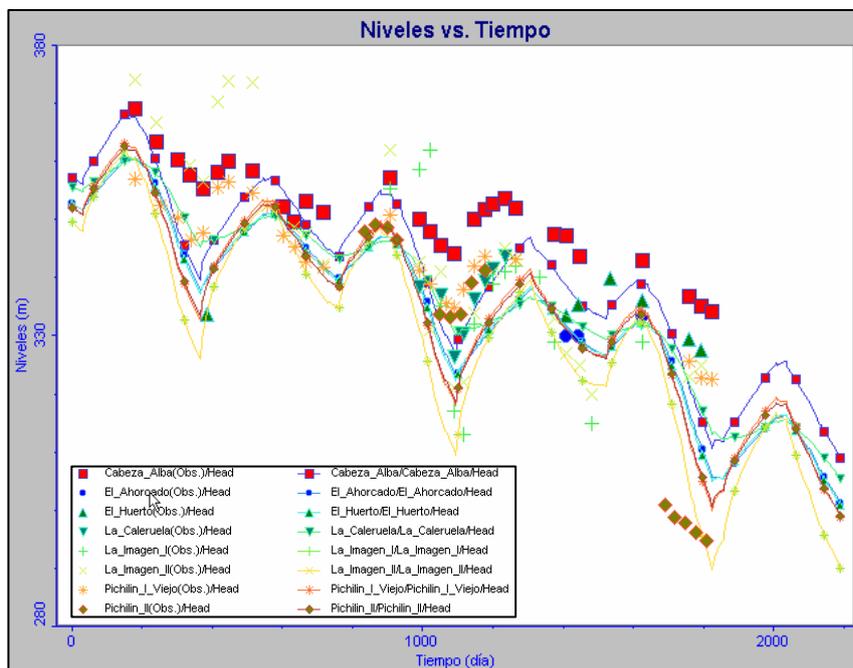
Tabla 4.2. Evolución de las extracciones durante el período 2000/01-2005/06

El contraste entre los hidrogramas calculados y los datos observados permiten apreciar un ajuste aceptable en el sector confinado, grupos 1, 2 y 3 (Figura 4.2.a-c), y más pobre en el libre, grupos 4 y 5 (Figura 4.2 e y d). Ello refleja la desigual consistencia en la caracterización de ambos sectores. Los parámetros calibrados son coherentes con los resultantes de la calibración del modelo estacionario y los obtenidos en los ensayos de bombeo (Tabla 4.3).

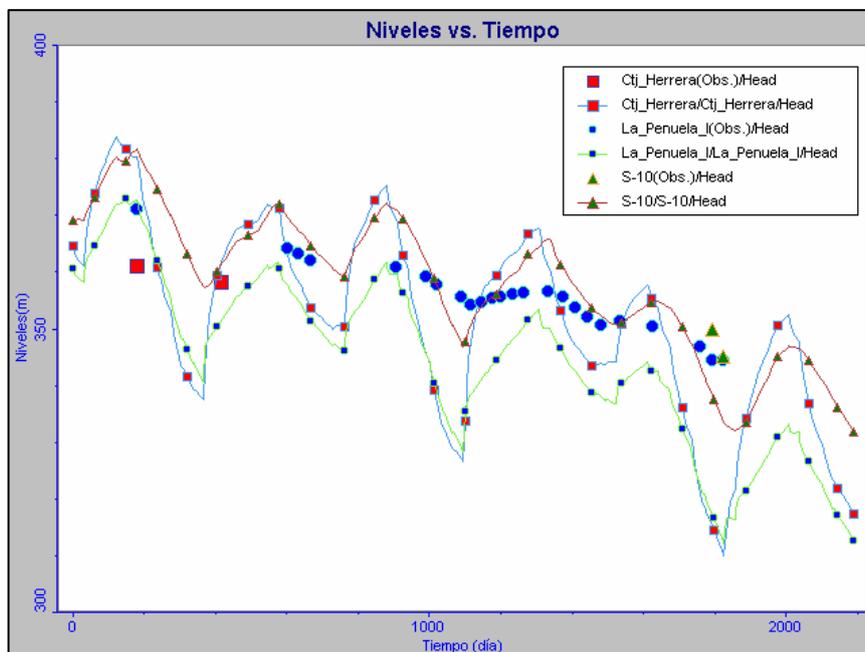


a. Ajuste piezométrico: Grupo 1

Figura 4.2. Calibración régimen transitorio: Ajuste piezométrico

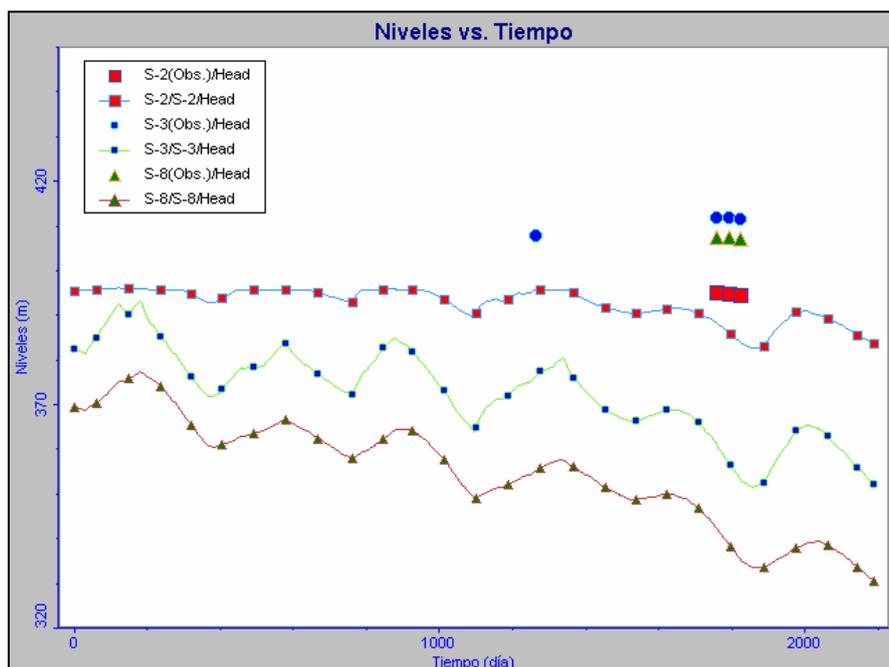


b. Ajuste piezométrico: Grupo 2

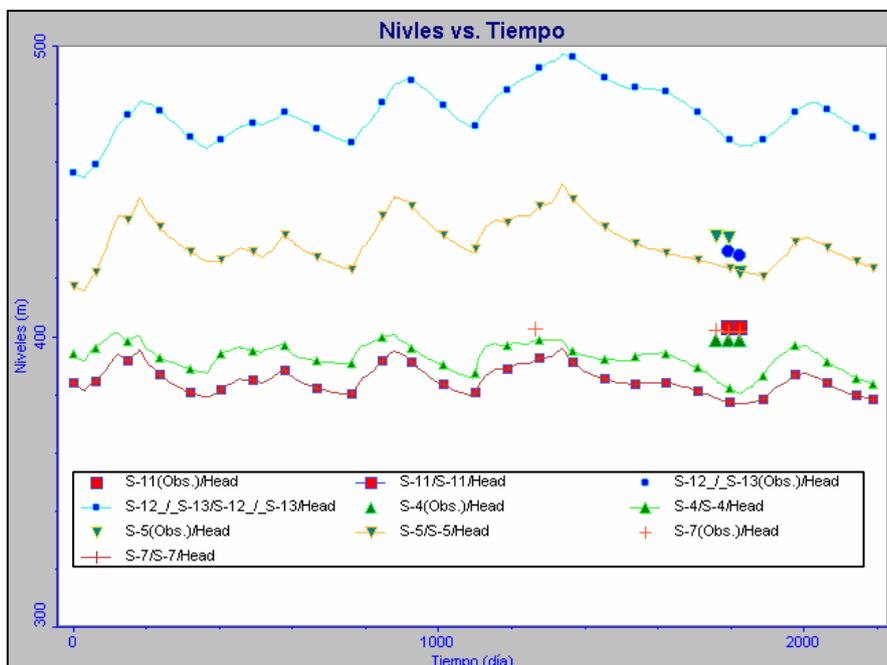


c. Ajuste piezométrico: Grupo 3

Figura 4.2. Calibración régimen transitorio: Ajuste piezométrico (continuación)



d. Ajuste piezométrico: Grupo 4



e. Ajuste piezométrico: Grupo 5

Figura 4.2. Calibración régimen transitorio: Ajuste piezométrico (continuación)

PARÁMETRO			VALOR
EXTRACCIÓN MEDIA ANUAL (hm ³ /a)			38,892
RECARGA MEDIA ANUAL (mm/a)	Sector libre	Cubierto por conglomerados miocenos	121
		Afloramiento de las calizas	154
	Sector confinado	Desde calizas tortonienses	30
PERMEABILIDAD (m/d)	Sector libre		0.7
	Sector confinado		10
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO	Sector libre, S: almacenamiento (-)		0,005
	Sector confinado, Ss: almacenamiento específico (1/m)		2 x 10 ⁻⁵

Tabla 4.3. Parámetros calibrados en el modelo en régimen transitorio

IV.3. Balance Hídrico: régimen transitorio

En el balance hídrico medio anual correspondiente al período 2000/01-2005/06 (Tabla 4.4) se evidencia el carácter más seco de este ciclo respecto al de 1960/61-1994/95 en la ligera, aunque apreciable, reducción (7 %) que sufre la recarga originada por la infiltración de la precipitación. No obstante, esta representa un 82 % de la recarga total del sistema (32 hm³/a). Por otro lado, las recargas procedentes de la percolación desde el acuífero detrítico de Úbeda -calcarenitas trotonienses- y la inducida desde el río Guadalimar son del mismo orden, 10 % y 8 % del total, respectivamente. La salida total del acuífero es 53 hm³/a, correspondiendo la mayor parte -un 74 % de la misma- a las extracciones (39 hm³/a). La mayor parte de los bombeos -un 84 % del total- se producen en el sector confinado del acuífero. La otra salida relevante del sistema, un 22% del total, es la descarga al río Guadalimar (11,5 hm³/a), mientras que las descargas a través de los manantiales situados la mayor parte en la margen derecha del río no representan una salida importante (2.3 hm³/a).

La marcada diferencia entre las salidas y las entradas del sistema es producto del desarrollo de los bombeos (39 hm³/a). El mayor impacto de esta perturbación es la generación de un déficit de 13,4 hm³/a, además de reducir a un tercio la descarga al

Guadalimar, inducir una recarga desde éste y eliminar la salida a la Unidad Olistrostrófica. La fuerte reducción de la recarga desde las calcarenitas tortonienses a 3,3 hm³/a respecto a lo evaluado en el régimen estacionario, se considera se debe a que la modelación en transitorio permite caracterizar mejor esta recarga, por lo que se supone a esta evaluación más realista. Finalmente, el déficit evaluado, 13 hm³/a generaría en el acuífero confinado un descenso medio de 11.5 m. Ello es coherente con los descensos medios anuales observados en el confinado que son algo menor a los 10 m, que indicarían un déficit de 11 hm³/a.

ACUÍFERO LIBRE MARGEN DERECHA		
ENTRADAS (hm³/a)	Infiltración de la precipitación	21,905
	Infiltración del río Guadalimar	0,932
SALIDAS (hm³/a)	Extracciones por bombeo	2,986
	Descarga por manantiales	2,340
	Descarga al río Guadalimar	7,000
	Descarga margen izquierda	10,511
ACUÍFERO LIBRE MARGEN IZQUIERDA		
ENTRADAS (hm³/a)	Infiltración de la precipitación	10,339
	Infiltración del río Guadalimar	2,882
	Recarga procedente de la margen derecha	10,511
SALIDAS (hm³/a)	Extracciones por bombeo	3,283
	Descargas al río Guadalimar	4,459
	Descargas al acuífero confinado	15,989
ACUÍFERO CONFINADO		
ENTRADAS (hm³/a)	Recarga procedente del acuífero libre	15,989
	Infiltración desde el acuífero mioceno	3,301
SALIDAS (hm³/a)	Extracciones por bombeo	32,656
DÉFICIT DEL ACUÍFERO		13.356

Tabal 4.4. Balance Hídrico medio anual, período 2000/01-2005/06

V. CONCLUSIONES

V.1. Propuesta para la explotación sostenible del acuífero.

Basado en ambos balances hídricos de los modelos en régimen estacionario y transitorio y considerando la complejidad del acuífero, el IGME, realizó una primera propuesta en la que sectorizadamente estableció umbrales para garantizar la explotación sostenible del acuífero. Por ello se aconsejó que las extracciones anuales no superen en cada sector del acuífero las cifras siguientes:

- Sector libre en la margen derecha del río Guadalimar: 5,50 hm³
- Acuífero confinado y sector libre en la margen izquierda: 27,00 hm³
- Sector de Villanueva del Arzobispo: 3,00 hm³

Estas cifras se consideran razonables para conseguir a largo plazo una explotación sostenible, a la par que rentable, del acuífero. No obstante, la extracciones umbral deberán revisarse conforme avance el conocimiento del medio, así como evaluarse anualmente la respuesta en cada sector para ajustarla en función de la evolución observada. Por otro lado, el acuífero detrítico de Úbeda es un recurso adicional, a estudiar, para atender el regadío del olivar. Finalmente debe observarse, que los umbrales de explotación propuestos previsiblemente impactarán sobre el acuífero produciendo una disminución de en la descarga al Guadalimar e incrementando la recarga inducida desde este río.

V.2. Aportes de los trabajos de modelación numérica.

Se ha presentado el estudio numérico del acuífero carbonatado de Úbeda realizado por el IGME por convenio con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, CGH. Este trabajo que procuró avanzar en el conocimiento del medio fue motivado por la necesidad de definir la explotación sostenible del acuífero. En los resultados a destacar están los siguientes:

- Se definió una geometría del acuífero que incorpora las fracturas identificadas y caracterizadas espacialmente.
- Se identificó un nuevo modelo conceptual del acuífero más coherente con el conjunto de la información geológica, piezométrica, hidroquímica e isotópica. A diferencia del modelo conceptual aceptado hasta el presente, la conceptualización propuesta identifica:
 - Una recarga desde las calcarenitas tortoniense del acuífero detrítico de Úbeda. La cual se considera evaluada más ajustadamente por el moldeo transitorio.
 - Una posible descarga en régimen natural a la Unidad Olstrostrómica que lo vincularía al sistema regional de flujo. No obstante, debe observarse que esta posible descarga identificada en la modelación bien podría estar representado una explotación incipiente del acuífero a mediados de la década de los 90 del pasado siglo, que no hubiera sido debidamente registrada.
- Se evaluó de forma consistente la progresión de los bombeos para el período 2000/01 – 2005/06, período el que se desarrolla la explotación que hoy sufre el acuífero. Previo a ello, las extracciones se modularon con criterios hidroclimáticos.
- Se establecieron los balances hídricos para los años medios de los períodos:
 - 1960/62–1994/95, que corresponde a un escenario de régimen natural.
 - 2000/01–2005/06, que corresponde a un escenario de fuerte explotación
- Se realizó una primera propuesta que, sectorizadamente, establece umbrales para la explotación sostenible del acuífero.

V.3. Líneas de trabajos futuros

Si bien se considera que el estudio realizado implica un importante avance conceptual, la consecución de estos resultados puso en evidencia la limitación e incertidumbre del conocimiento existente sobre el acuífero. Limitación e incertidumbre que, por lo tanto, le son inherentes a la propuesta de gestión realizada. Así, el trabajo de investigación que el IGME continuará desarrollando en el acuífero carbonatado de Úbeda redundará en una mejora de la gestión de los recursos hídricos. En este sentido se identifica que se debe continuar trabajando en Mejorar el conocimiento de:

- La geometría del acuífero, tanto en su extensión como en lo relacionado con la fallas y otros accidentes tectónicos que condicionarían la circulación del flujo.
- Las condiciones de contorno: vinculación del acuífero con el río, caracterización de las distintas fuentes de recarga, eventual vinculación con otras formaciones, etc.
- Los distintos términos del balance, en particular de las extracciones.
- Otros aspectos particulares ligados a la representación numérica como una mejora en la discretización espacio-temporal
- Continuar la toma regular de las distintas variables que permiten la monitorización del acuífero.

REFERENCIAS

- CEDEX (2006) Estudio hidrogeológico e isotópico en la masa de agua subterránea carbonatado de la Loma de Úbeda (050-010) CEDEX, Madrid: 85 pp
- CHG (2005) Superficie de los Cultivos de Regadío y sus Necesidades de Riego, en la Demarcación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. CHG, Sevilla
- IGME (2004) Obtención de información para la mejora del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda. IGME, 43 pp. y Anexos.
- IGME (2006) Trabajos de premodelación sobre el acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda. IGME, Informe interno.
- ITGE-DGOH-DGCA (2001). Proyecto para la actualización de la infraestructura hidrogeológica de la unidades 05.01 (Sierra de Cazorla) 05.02 (Quesada-Castril), 07.07 (Sierra de Cazorla) y Carbonatado de la Loma de Úbeda. IGME, Madrid
- González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Rubio, J.C.; Nuñez, I. (2007) Los acuífero de la Loma de Úbeda. In: González-Ramón, A.; Rubio, J.C.; López-Geta; J.A. (Eds.) IGME, Madrid, 56 pp.
- McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. (1988) A modular three dimensional finite-difference groundwater flow model. U.S.G.S. Techniques of Water Resources Investigations, book 6, 586 pp
- Rey, J.; Redondo, L.; Hidalgo, M.C. (1998) Interés hidrogeológico de las dolomías liásicas de la Cobertera Tabular de la Meseta (Norte de Úbeda, Provincia de Jaén) Rev. Soc. Geol. España, 11 (3-4): 213-221
- Rodríguez, J.; Pérez, E.; Díaz, M.F.; Heredia J. (2007) A contribution to the characterization of a deeply confined carbonate aquifer in Úbeda (southern Spain) from a reinterpretation of existing geological and geophysical data and new data on



environmental isotopes. XXXV IAH congress–groundwater and ecosystems. Lisboa, Portugal

- Waterloo Hydrogeologic, Inc. 1999. USER'S MANUAL for Visual MODFLOW. Waterloo, Ontario. Canada. 282 pp.