



**INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA ESTABLECER LAS
POSIBILIDADES DE REALIZAR OPERACIONES DE RECARGA
ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA LOMA DE
ÚBEDA. (Nº Expediente 145/01)**

INFORME FINAL

TOMO 2.- MEMORIA FINAL

Diciembre 2001 (actualizado a Enero 2005)

Consultor: Crisanto Martín Montañes/Javier Gollonet Fernández de Trespalacios

**INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA
ESTABLECER LAS POSIBILIDADES DE
REALIZAR OPERACIONES DE RECARGA
ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO CARBONATADO
DE LA LOMA DE ÚBEDA.**

TOMO 2.- MEMORIA FINAL

Diciembre , 2001
(actualizado a Enero 2005)

ÍNDICE

MEMORIA

	<u>Pág</u>
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	2
1.2.- SITUACIÓN DEL ACUIFERO Y PROBLEMÁTICA EXISTENTE	4
2.- APORTACION AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO.....	7
2.1.- PIEZOMETRÍA Y SU EVOLUCIÓN.....	8
2.2.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS	8
2.3. RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN.....	10
2.4.- MODELO PRELIMINAR DE FLUJO	12
3.- PLANTEAMIENTO PRELIMINAR DE LA RECARGA.....	15
3.1.- ORIGEN Y CUANTÍA DEL AGUA DE RECARGA	16
3.2.- ZONAS FAVORABLES Y POSIBLES PUNTOS DE TOMA	18
3.3.- CONSIDERACIONES FINALES	24

ANEJOS

- 1.- BOMBEO DE ENSAYO
- 2.- MODELO PRELIMINAR DE FLUJO
- 3.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.- INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al Proyecto **"INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA ESTABLECER LAS POSIBILIDADES DE REALIZAR OPERACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO CARBONATADO DE LA LOMA DE ÚBEDA "** (Nº Expte. 145/01), realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) con la colaboración de Crisanto Martín Montañés, adjudicatario del contrato menor correspondiente. El proyecto se ha realizado bajo la supervisión de D. Juan Carlos Rubio Campos con la colaboración de D. Antonio González Ramón, por parte del IGME. Por parte del Consultor ha intervenido además Javier Gollonet Fernández de Trespalacios, hidrogeólogo con dilatada experiencia y conocimiento de las técnicas de recarga artificial.

1.1.- ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El estudio llevado a cabo supone la lógica continuación de las actividades que desde 1996 ha venido realizando el IGME en este acuífero en el marco

de diferentes proyectos, y que finalizaron con la definición preliminar del mismo en el año 2000.

Los estudios previos más directamente relacionados con el presente proyecto son el de "*Tratamiento de diferente información relativa a la hidrogeología de los acuíferos del Alto Guadalquivir (IGME, 2000)*" y el de "*Asistencia técnica para la evaluación de la situación actual de diversos acuíferos en el margen derecho del Guadalquivir y en la orla carbonatada meridional de Jaén (IGME, 2001)*". El primero de ellos contiene la definición preliminar y síntesis hidrogeológica del acuífero, que ha servido de base para la redacción de las Normas de Explotación previstas en el segundo de ellos y es el punto de partida del presente estudio. Otro trabajo posterior es el realizado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir sobre "*Toma de datos, inventario de puntos de agua para la caracterización y evaluación de recursos de la Unidad Hidrogeológica de la Loma de Úbeda*" (CHG, 2001)

El objetivo final de este proyecto es estudiar la viabilidad técnica de la recarga artificial del acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda, previa mejora de su conocimiento hidrogeológico para complementar las lagunas de información existentes.

Una primera parte del mismo vio la luz en el avance provisional de Enero de 2002 (que se incluye como tomo 1), en el que se hizo un avance de la información ya elaborada y una propuesta de trabajos a realizar y en el que se pusieron de manifiesto las dificultades para la continuación del estudio por las importantes carencias de información existentes: esencialmente la falta de un inventario suficientemente completo y fiable para establecer las extracciones por bombeo, la ausencia de ensayos de bombeo para parametrizar el modelo de flujo del acuífero y la inexistencia de red de control piezométrico. Hasta Marzo de 2003 no fue posible realizar el único ensayo de bombeo válido hasta la fecha (con dos pozos de bombeo simultáneo y dos piezómetros), tras un intento fallido en marzo de 2002 al invalidarse el ensayo en el sondeo Pichilín II por el inicio de numerosos bombeos próximos de forma inesperada que afectaron a su evolución. La calibración del modelo de flujo iniciado en este proyecto se realizó en régimen transitorio en base a los datos del propio ensayo y con la piezometría y extracciones del periodo Mayo de 2001 a Abril de 2003 obtenidos en el presente proyecto, y se dio por finalizada en Noviembre de 2004 dentro del proyecto "Obtención de información para la mejora del conocimiento hidrogeológico del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda" (IGME, 2004). El modelo ya calibrado se ha utilizado nuevamente para simular el posible efecto de la recarga como parte del presente proyecto, y a pesar

de las dificultades y lagunas que aún quedan por resolver por desconocimiento insalvable en este momento de las relaciones río-acuífero, lo que ha dificultado enormemente las tareas de calibración y ha impedido la obtención de datos fiables sobre el balance hídrico del acuífero.

El presente informe es, por consiguiente, continuación del emitido en Enero de 2002 y recoge los nuevos datos obtenidos sobre conocimiento del acuífero y el planteamiento preliminar de una posible recarga con los datos actualmente disponibles.

1.2.- SITUACIÓN ACTUAL DEL ACUÍFERO Y PROBLEMÁTICA EXISTENTE

Hasta hace unos pocos años el único acuífero explotado en la comarca de la Loma de Úbeda era el correspondiente al Mioceno, de escasa extensión y baja productividad, del que apenas se aprovechaban unos 3 hm³/año entre descargas naturales y explotaciones por bombeo, siendo el principal cultivo de la zona el olivar tradicional de secano. La profusión de sondeos profundos realizados por la iniciativa privada desde 1995, en su mayoría sobre el acuífero carbonatado jurásico, escasamente conocido hasta entonces y cuya primera definición hidrogeológica vio la luz en el año 2000, ha permitido el progresivo incremento del olivar en regadío en una de las zonas olivareras más dinámicas de Andalucía, con el consiguiente incremento de los consumos de agua.

El balance hasta la fecha disponible para el acuífero carbonatado jurásico de la Loma de Úbeda estima unas entradas directas por infiltración de lluvia de unos 50 hm³/año, pendiente de una comprobación de las salidas reales del acuífero y de su funcionamiento hidráulico una vez se disponga de datos fiables de las extracciones por bombeo, de las descargas naturales y de la evolución piezométrica del acuífero. En la propuesta de normas de explotación vigente se planteaba limitar las extracciones a unos 20 hm³/año en el Jurásico, hasta disponer de nueva información al respecto. No obstante, los datos más recientes disponibles, aunque provisionales y sin una precisa asignación de las extracciones por acuíferos o subunidades, arrojan al respecto la siguiente información:

- El total de solicitudes con entrada en la CHG puede alcanzar unos 46 hm³/año y 26215 has de riego (para ambas subunidades), aunque sólo 18 hm³/año y 10612 has estarían aprobadas, correspondiendo el resto a solicitudes denegadas o en trámite.

- La extracción real por bombeo, según el inventario de CHG (2001) podría alcanzar algo más de 28 hm³/año y afectar a unas 18497 has, sólo para el acuífero Jurásico, e incluidas captaciones que no disponen siquiera de solicitud de concesión (un 39% del total), si bien puede haber captaciones ubicadas sobre otros acuíferos limítrofes. En cualquier caso las cifras se refieren a una revisión parcial del inventario (138 sondeos y ninguno sobre el acuífero jurásico en la margen derecha del Guadalimar, correspondiente al sector libre).
- La Asociación de Usuarios del Acuífero Carbonatado de la Loma de Úbeda agrupaba en Diciembre de 2003 a unos 186 miembros con un total de unas 24200 has (cuya demanda podría superar los 36 hm³/año con las dotaciones habituales, aunque en un 34 % no hay constancia de solicitudes de concesión en trámite), si bien al respecto cabe indicar que también pueden estar incluidos usuarios de otros acuíferos limítrofes y que tampoco agrupa a todos los usuarios del acuífero carbonatado.
- La más reciente evaluación llevada a cabo en el proyecto finalizado en Noviembre (IGME, 2004) considera una explotación total para el acuífero jurásico de unos 35,5 hm³/año, y ello en base al análisis de unos 233 sondeos en explotación detectados entre 4 inventarios (sigue sin existir ninguno completo), de los que solo en 112 figura la extracción anual estimada y en otros 83 figura al menos el caudal de bombeo aproximado.

En definitiva, la explotación por bombeo puede estar comprendida actualmente entre 25 y más de 45 hm³/año.

La recarga artificial tendría por objeto evitar una posible evolución descendente del acuífero, en caso de que los bombeos existentes o previstos lleguen a superar los recursos reales del sistema, y también mejorar la calidad general del agua en la zona meridional, donde la existencia de un ambiente reductor causado por el fuerte confinamiento y la escasa renovación del agua genera problemas de calidad (existencia de gas sulfhídrico y elevadas concentraciones de algunos iones).

Por otra parte hay que indicar que el acuífero confinado del Jurásico ofrece a priori unas excelentes perspectivas para su utilización en el esquema de

regulación general, mediante su bombeo controlado y su recarga artificial natural o inducida (IGME 2001), hecho que llevaría probablemente aparejada una mejora general de la calidad del agua, al aumentar significativamente la renovación de la misma en la zona confinada. Aunque parte de los recursos de esta unidad son regulados por el embalse de Giribaile, ubicado aguas abajo, éste sólo regula un 35-40 % de su aportación media (IGME 2001), por lo que la regulación adicional realizada sobre el acuífero sería totalmente compatible con el mismo e incidiría positivamente en la regulación general de la cuenca, evitando descargas inútiles en períodos de aguas altas.

2.-APORTACIÓN AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO

2.- APORTACIÓN AL CONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO

2.1.- PIEZOMETRÍA Y SU EVOLUCIÓN

La red piezométrica establecida inicialmente se prosiguió midiendo con cargo a otros proyectos y ha sido posteriormente mejorada y reestructurada. Los datos más completos ya figuran en el citado informe de IGME, 2004, para el período mayo 2001 hasta Octubre de 2004, por lo que nos remitimos al mismo para una mejor información.

Las medidas realizadas con cargo al presente proyecto se incluyen en el cuadro nº 1 adjunto.

2.2.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS

La realización de ensayos de bombeo representativos en este acuífero es imposible durante las campañas de riego por las importantes afecciones que se producen entre puntos próximos en el acuífero confinado (apreciables en radios de hasta 5-6 Km) pero se ve también dificultada tras el cese de los bombeos por la evolución ascendente de los niveles estáticos (al menos las primeras semanas, o quincenas en

CUADRO N° 1.- PIEZÓMETROS MEDIDOS EN LA UNIDAD DE UBEDA

DATOS GENERALES						PROFUNDIDAD DEL AGUA EN LAS DISTINTAS CAMPAÑAS (m)											
N°	Nombre	X (UTM)	Y (UTM)	Z (msnm)	Prof (m)	10-06-01	31-07-01	04-09-01	10-10-01	21-11-01	21-12-01	01-03-02	09-04-02	27-05-02	28-06-02	30-07-02	17-09-02
1	Pozo de Vicente	498939	4224370	712	195	124.68	134.57	137.53	142.65	144.23	142.63	137.72	132.9	141	150.12	156.08	160.67
25	Piezómetro Camino	483394	4224912	561		119.43	122.20	126.50	135.38	121.36			118.25	121.64	143.66	144.99	155.23
26	Cabeza Alba	482180	4216585	544	220	180.71	183.80	186.33	188.75	185.94	184.02	185.57		191.75	194.31	190.90	192.81
29	Los Carrizales	461118	4212323	660	400	279.04	280	280	280								
32	Pichilín I (viejo)	482637	4212843	645	480	288.55	290.65	294.58	293.20	285.42	284.53	286.53	288.58	293.79	295.71	298.26	299.14
34	La Imagen II	478192	4207293	628	680	264.20	cerrado	274.97	277.86	264.05	260.51	260.76			282.25	283.28	288.69
35	La Imagen I	478192	4207293	621		260.89		271.66	274.55	260.74	257.20	257.45			278.94	279.97	285.38
38	La Peñuela I	482417	4219906	438	150									69.86	70.92	72.08	
40	La Caleruela	491709	4211450	480		87.00	91.00	125.00			112.50	109.00	109.00		121.00		134.00
41	Niña Isabel	491573	4222621	569	70	44.90	45.75	46.27	46.61	46.80				45.62	46.09		47.13

algunas zonas de mayor bombeo) y más aún si se quiere disponer de piezómetros dado el escaso número de sondeos que permiten su medida y la inexistencia de sondeos que no sean de propiedad privada diseñados para tal fin.

En el marco del presente proyecto se consiguió llevar a cabo un ensayo de unos 750 minutos con dos pozos de bombeo distantes unos 450 m y funcionando simultáneamente (La Mina, con el nº 2036-7049 del IGME y Camino del Cerro, con el nº 2036-7101 de CHG) y midiendo los descensos en 2 pozos de bombeo parados pero que disponían de tubo piezométrico, y distantes del centro geométrico del bombeo unos 2275 metros (Sondeos de la C.R. La Imagen, con los nºs 34 y 35 del muestreo flash 2001 del IGME).

La interpretación por los diversos métodos aplicables al bombeo y la recuperación da valores de transmisividad comprendidos entre 1700 y 2200 m²/día, que para un espesor saturado en la zona de bombeo de unos 80 metros equivale a valores de permeabilidad de 21 a 28 m/día. El coeficiente de almacenamiento obtenido está comprendido entre 7,5 x 10⁻⁶ y 1,8 x 10⁻⁵, con un valor medio de 1,28 x 10⁻⁵, propio de un fuerte grado de confinamiento.

Los datos y gráficos más representativos se adjuntan en el anejo 1.

2.3. RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN

Se han obtenido datos teóricos de distribución detallada de los bombeos a lo largo del año, válidos en general para los riegos de olivar por goteo, pero que se deberán contrastar con la realidad en los casos de las Comunidades de Regantes más significativas que tengan datos al respecto. Hasta la fecha en ninguna se ha dispuesto de datos de este tipo desglosados por meses. La distribución teórica para años medios se muestra en la tabla siguiente.

Como se observa, la época habitual de riego en años medios es desde Abril a Octubre, si bien los años más secos puede comenzarse en Marzo e incluso Febrero y terminar en Noviembre si las lluvias no aparecen. Los datos son representativos para plantaciones de unos 100 olivos/ha (marco aproximado de 10x10) y 156 olivos/ha (marco de unos 8 x 8 m), que son los más frecuentes en la zona, y para un volumen de copa de unos 9000 m³/ha según sus autores.

La dotación media resultante sería de unos 1625 m³/ha/año, algo superior a la media habitualmente considerada (1500 m³/ha/año), si bien según el marco y número de olivos por ha puede oscilar entre 1000 y 2500 m³/ha/año según las zonas y además puede ser algo distinta, como se ha dicho, según la climatología de cada año.

En cualquier caso, la distribución porcentual puede ser adecuada para distribuir los bombeos realizados para tal fin a lo largo del año, con una buena aproximación.

Necesidades de agua para riego de olivar por goteo (1)*						
Mes	Dotación para 100 ol/ha		Dotación para 156 ol/ha		Media m³/ha	Idem %
	l/ol/día	m³/ha/mes	l/ol/día	m³/ha/mes		
Enero	0	0	0	0	0	0
Febrero	0	0	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0	0	0
Abril	20	60	20	93.6	76.8	4.7
Mayo	60	186	60	290.2	238.1	14.7
Junio	70	210	65	304.2	257.1	15.8
Julio	90	279	70	338.5	308.8	19.0
Agosto	80	248	70	338.5	293.3	18.1
Septiembre	83	249	68	318.2	283.6	17.5
Octubre	50	155	37	178.9	167.0	10.3
Noviembre	0	0	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0	0	0
Total m³/ha/año		1387		1862.2	1624.6	100.0

(1)*.- revista Agrícola ganadera de ASAJA. N° 239, Marzo Abril 2001. Nota técnica 1/2001 sobre Programación de riego para la campaña 2001.

Por otra parte, en el marco de proyecto del IGME finalizado en 2004 se analizó exhaustivamente la información existente en los diversos inventarios con objeto de evaluar las extracciones por bombeo de cara al modelo de flujo del acuífero, con los siguientes resultados:

Se detectan 233 puntos en explotación sobre el acuífero carbonatado jurásico, de los que solo en 112 figura la extracción realizada, con un total de 23 hm³/año para atender el riego de 15285 has. En los otros 121 sondeos en los que no figuraba ningún dato al respecto o solo figuraba el caudal de extracción se estimaron unas extracciones de 12,57 hm³/año, con lo que la extracción total sería de 35,57 hm³/año, con una superficie total en riego de unas 24050 has supuesta igual dotación unitaria para las extracciones extrapoladas.

Para un análisis más detallado nos remitimos al citado informe del IGME, en el que figuran los 233 puntos desglosados con su explotación y los métodos seguidos para la estimación. Hay que destacar que aunque válida como aproximación con los datos disponibles, es imprescindible que se lleve a cabo un estudio específico para determinar su cuantía más exacta y su evolución, si es posible, diferenciando además en cada caso los acuíferos captados previa unificación de los inventarios disponibles en una base de datos y con su revisión en campo.

2.4.- MODELO PRELIMINAR DE FLUJO

Aunque de forma muy provisional, el modelo está construido y se ha calibrado en régimen permanente y transitorio (dentro del proyecto IGME, 2004). Sus características principales y estado actual se reflejan en el anejo nº 2, en el que se han incluido, para facilitar su mejor comprensión, las dos fases de calibración, si bien solo la primera fue objeto del presente estudio.

Las conclusiones obtenidas del mismo, muy limitadas a efectos prácticos por las numerosas dificultades encontradas (que han obligado a replantear a lo largo de su ejecución tanto la geometría del modelo, para excluir sectores que en principio se consideraban incluidos en el acuífero pero luego se ha visto que son independientes, como la propia conceptualización del modelo, pasándolo de 2 capas a una sola por problemas de convergencia) se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Los resultados obtenidos en **régimen estacionario** resultan razonablemente válidos y confirman en principio los valores de recarga considerados y los de aforos de descargas hasta la fecha conocidos. El sector de acuífero confinado muestra unos niveles piezométricos situados en torno a los 400 m s.n.m., coherentes con los que cabría esperar en un régimen natural y en ausencia de explotaciones por bombeo. Desgraciadamente la primera campaña piezométrica del acuífero se realizó en mayo de 2001 (al inicio de la campaña de bombeos para riego) y la piezometría calculada queda significativamente por encima, lo que es lógico por otra parte ya que podía haber afecciones de años anteriores (la explotación masiva se inició a partir de 1995 y no hay datos de piezometría inicial).
- La calibración del modelo **en régimen transitorio se llevó a cabo en primer lugar con los datos del único ensayo de bombeo realizado en la zona**. Los

valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento finalmente adoptados como válidos han sido de 2200 m²/día de transmisividad y $1,4 \cdot 10^{-5}$ para el coeficiente de almacenamiento, totalmente coincidentes con los obtenidos en la interpretación manual y semiautomática del ensayo de bombeo por los métodos habituales. Ello es prueba del adecuado funcionamiento de la zona confinada en el modelo y de la aceptable geometría modelizada en ese sector, además de confirmar plenamente la validez de los parámetros hidráulicos del acuífero en el mismo.

- El modelo transitorio ha sido también calibrado para el periodo de dos años Mayo 2001-Abril 2003, con un valor de transmisividad de 2200 m²/día, igual al del régimen estacionario, y un coeficiente de almacenamiento de $1,4 \cdot 10^{-3}$, dos órdenes de magnitud mayor que el calibrado en el ensayo de bombeo ($1,4 \cdot 10^{-5}$). Tal valor implica que el grado de confinamiento aumenta de norte a sur (como es evidente, por otra parte, dada la geometría del acuífero), alcanzando valores propios de acuífero libre al sur del río Guadalimar. En revisiones posteriores se deberá plantear la consideración de varias zonas con coeficiente de almacenamiento progresivamente inferior, una vez se disponga de datos reales o por definición de zonas aproximadas hasta tanto estén disponibles nuevos ensayos de bombeo fiables. El comportamiento de los piezómetros también se ha reproducido muy aceptablemente (excepto para el único situado en la parte libre del acuífero) pero no se ha conseguido reproducir la relación río-acuífero de forma coherente, ni tampoco el régimen de descarga de los manantiales, por lo que los datos de balance obtenidos no son en absoluto fiables. En efecto, no parece coherente que las descargas al río se mantengan tan elevadas (27 hm³/año) a pesar de los descensos de nivel provocados y simultáneamente se produzca un vaciado de reservas medio de unos 45'5 hm³/año (superior a los bombeos considerados). Si se descuentan tales descargas del vaciado, el déficit de balance sería de unos 18'5 hm³/año, que aún parece elevado para la cuantía de bombeos existente (unos 32'9 hm³/año en la zona modelizada). En cualquier caso, la serie de infiltración utilizada para el modelo es un 75 % más seca que la media sobre el acuífero, lo que reduciría ese posible déficit a 13 hm³/año. El resultado obtenido tampoco se considera fiable a efectos de valorar la relación río-acuífero.

En un último intento se han realizado dentro de este proyecto dos simulaciones de una serie de 10 años con bombeos idénticos e infiltraciones similares a

las estimadas como medias para el acuífero, una de ellas supuestos 6 sondeos de recarga para introducir un total de $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ en 4 meses (de Noviembre a Febrero) y ambas supuesto desactivado el río para ver el posible efecto de tal recarga. Aunque mejora algo la respuesta del modelo en ausencia del río los manantiales siguen drenando un caudal similar durante toda la simulación, por lo que tampoco se considera real el comportamiento observado. En cualquier caso en la simulación 2 se observa un incremento de reservas de unos 5 hm^3 , que permiten pensar que el desequilibrio es de ese orden de magnitud, si bien como se ha dicho los datos de balance no se consideran muy fiables al no haberse conseguido reproducir correctamente las relaciones río-acuífero ni las respuestas de los manantiales.

En definitiva, el modelo preliminar realizado ha cumplido plenamente sus objetivos y permitirá avanzar con mayor fluidez si se acomete un modelo más detallado, que deberá basarse en los nuevos datos de sondeos, ensayos de bombeo, evolución piezométrica, etc, al conocerse, al menos, sus principales dificultades. Dichas actuaciones deben emprenderse a corto plazo, si se quiere prever su evolución futura, aclarar las numerosas incógnitas que aún persisten sobre su funcionamiento hidráulico, relación con el río, recarga neta y otros extremos y para tal fin la modelización se muestra como una herramienta imprescindible.

3.-PLANTEAMIENTO PRELIMINAR DE LA RECARGA

3.- PLANTEAMIENTO PRELIMINAR DE LA RECARGA

De la información disponible parece deducirse un cierto desequilibrio al menos temporal del acuífero, más acusado en el sector de Villanueva del Arzobispo que debe tener una desconexión hidráulica respecto al conjunto del acuífero confinado, lo que justificaría el planteamiento a corto plazo de la recarga para evitar problemas en el futuro próximo.

3.1.- ORIGEN Y CUANTÍA DEL AGUA DE RECARGA.

Como fuentes de recarga cabría plantear los ríos Guadalimar o Guadalquivir, dada la posición relativa del acuífero y teniendo en cuenta el grado de regulación de las cuencas superficiales implicadas, que se muestra a grandes rasgos en el cuadro adjunto.

REGULACIÓN DE LAS CUENCAS DEL GUALIMAR Y GUADALQUIVIR EN CABECERA						
CUENCA	EMBALSE	CAPACIDAD hm ³	APORT. MEDIA hm ³ /año (1)*	REGULACIÓN		SIN REGULAR hm ³ /año
				hm ³ /año (2)*	%	
Guadalimar	Giribaile	475	370	128	35	
	Guadalmena	346	140	103	74	
	Conjunta	821	370	231	62	139
Guadalquivir	El Tranco	500	235	193	82	42

(1)*.- Atlas hidrogeológico de la Provincia de Jaén

(2)*.- Plan Hidrológico de la Cuenca Guadalquivir

Como se observa, los recursos sin regular actualmente aguas arriba de la Unidad de Úbeda serían de unos 42 hm³/año en el Guadalquivir y de 139 hm³/año para el sistema Guadalmena-Giribaile, según los datos disponibles. Además hay que recordar que el río Guadalquivir recibe a la altura de Mogón-Santo Tomé otros 70-90 hm³/año sin regular superficialmente, procedentes de la zona de Cazorla (río Grande). Los desembalses para atender las demandas tienen lugar en los tres embalses generalmente desde Abril-Mayo hasta Septiembre-Octubre (unos seis meses al año), con lo que los posibles caudales para recarga habrían de derivarse el resto del año (entre tres y seis meses/año como máximo) condicionados además por el régimen muy irregular de tales excedentes invernales. Al respecto cabe indicar que los caudales de entrada al embalse del Giribaile en los 2 últimos años han estado comprendidos, en ausencia de desembalses del embalse de Guadalmena, entre 500 y 9000 l/s en la época invernal (datos de la página web de estado de embalses de la CHG). Por lo que respecta a la cuenca del Guadalquivir, los datos de aportaciones en la estación de aforos EA-1 (Guadalquivir en Arroyo María, unos Km aguas abajo del embalse del Tranco) muestran en los meses invernales caudales medios de 4000 a 12000 l/s, aunque con máximos próximos a 90000 l/s algunos meses de la serie 1942-1998 y otros meses de caudales muy inferiores. Si se considera que para la recarga habría que desechar probablemente los meses de aportaciones extremas, el periodo real de recarga se reduciría en consecuencia a unos tres meses al año, salvo que se pudiera contar con una cierta regulación previa (por ejemplo, de desembalses específicos para tal fin en la citada época invernal). En efecto, un análisis más detallado de la serie de aportaciones disponible (Octubre de 1942 a Septiembre de 1998) permite observar los siguientes datos para el período de seis meses comprendido entre Noviembre y Abril

- Nº total de meses: 336
- Nº total de meses con datos: 272
- Nº de meses con caudal medio comprendido entre 3000 y 15000 l/s: 148 (54 %)

En definitiva, si solo se cuenta con aportaciones sin regular de la época invernal los periodos de recarga se limitarían probablemente a unos 90-100 días/año.

Por lo que respecta a la calidad del agua y de acuerdo con los muestreos periódicos realizados en este proyecto de los ríos Guadalimar, Guadalquivir y Aguascebas, ya reflejados en el avance de resultados (tomo 1), hay que indicar que sería excelente en todos los casos, con facies bicarbonatadas cálcico magnésicas y baja salinidad, con conductividades comprendidas entre 330 y 525 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el Guadalquivir y Aguascebas y variables de 560 a 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el Guadalimar, ambas aptas para la recarga sobre el acuífero jurásico aunque mejores en el caso del Guadalquivir y Aguascebas. Su variación estacional es escasa, salvo por un incremento relativo de los sulfatos en estiaje en el río Guadalimar.

En cuanto a los volúmenes necesarios de recarga es prematuro establecer una cifra sin una comprobación más profunda del balance, pero en principio cabría pensar en un máximo de 5-10 $\text{hm}^3/\text{año}$, si se consideran las explotaciones conocidas, la evolución piezométrica hasta la fecha observada y aún supuesta una reducción de los recursos evaluados de 50 a 25 $\text{hm}^3/\text{año}$, ya difícil de admitir con los datos disponibles.

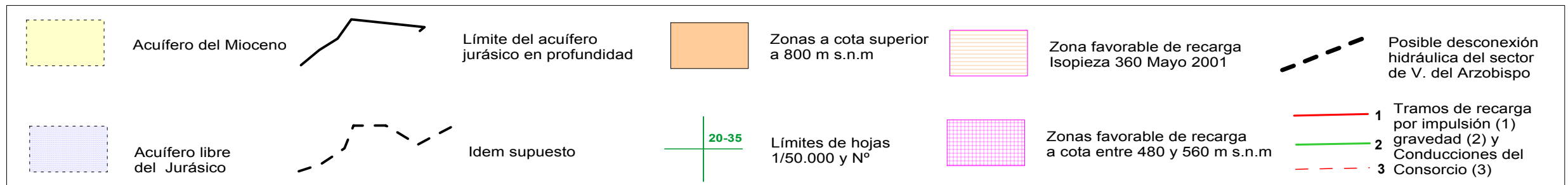
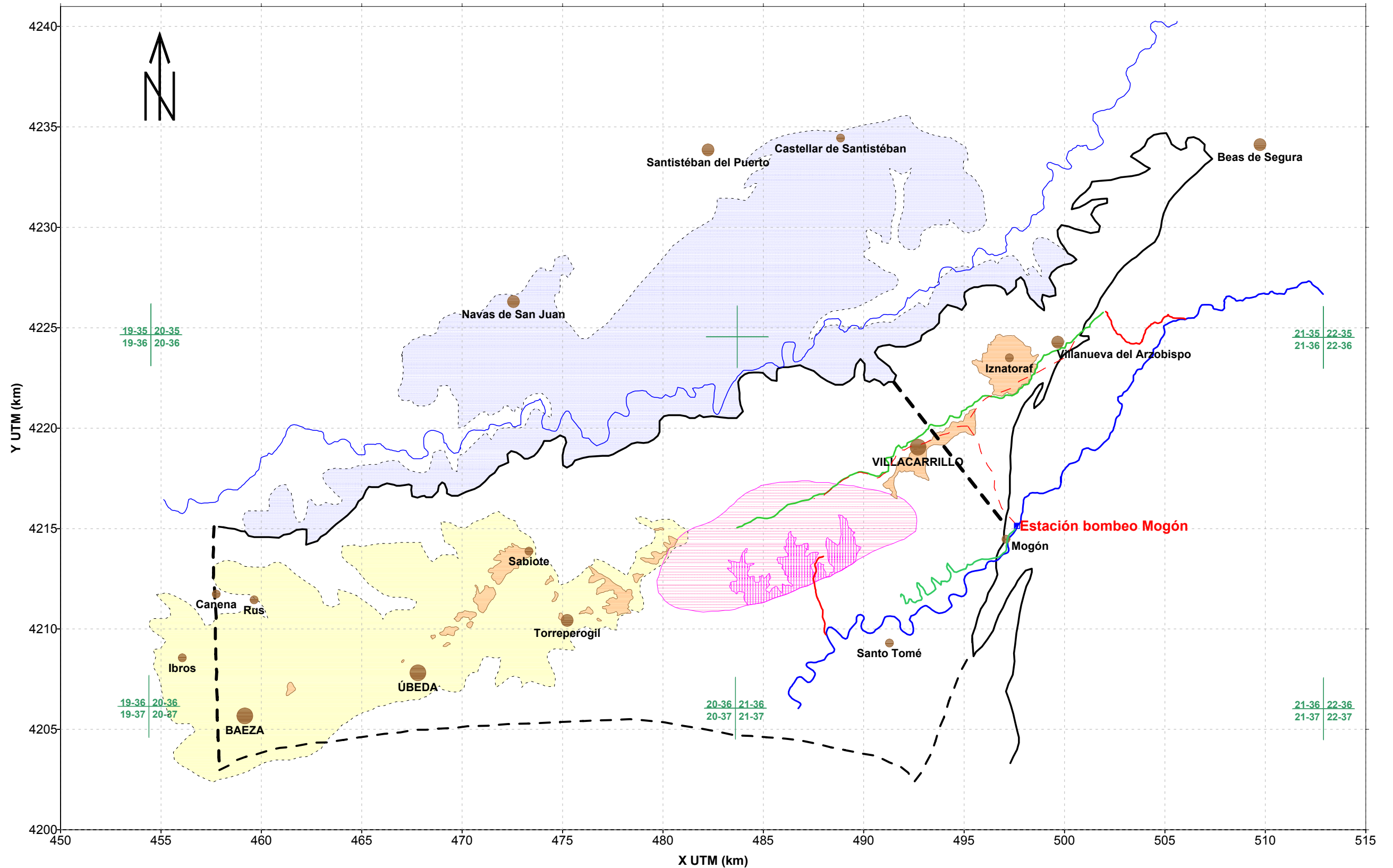
La recarga de esos 10 $\text{hm}^3/\text{año}$ implicaría caudales continuos de unos 650 l/s si tiene lugar durante 6 meses/año o de 1300 l/s si solo dispone de 3 meses/año.

3.2.- ZONAS FAVORABLES PARA LA RECARGA Y POSIBLES PUNTOS DE TOMA.

En la figura 1 adjunta se muestran de forma esquemática (aunque el análisis se ha realizado sobre bases topográficas 1/50.000) las zonas más favorables en principio seleccionadas para la recarga y los posibles trazados de las conducciones adecuadas para tal fin (con dos alternativas por impulsión y una por gravedad), cuyos aspectos más significativos se comentan a continuación:

Zona favorable de recarga: Se ha considerado más apta para tal fin la zona central del acuífero confinado comprendida dentro de la Isopieza 360 de Mayo de 2001, que

FIGURA 1.- ESQUEMA HIDROGEOLÓGICO DE LA UNIDAD DE ÚBEDA Y CONDUCCIONES RECARGA



corresponde a un evidente conoide de depresión provocado por los bombeos en la zona central del acuífero confinado. Las cotas del terreno estarían comprendidas entre 480 y 800 m s.n.m., si bien la mayor parte se sitúa entre 500 y 700 m s.n.m. Dada la desconexión hidráulica de la zona de Villanueva del Arzobispo sería necesario plantear otra zona de recarga entre Villanueva del Arzobispo e Iznatoraf, que estaría a una cota próxima a 720 m.s.n.m.

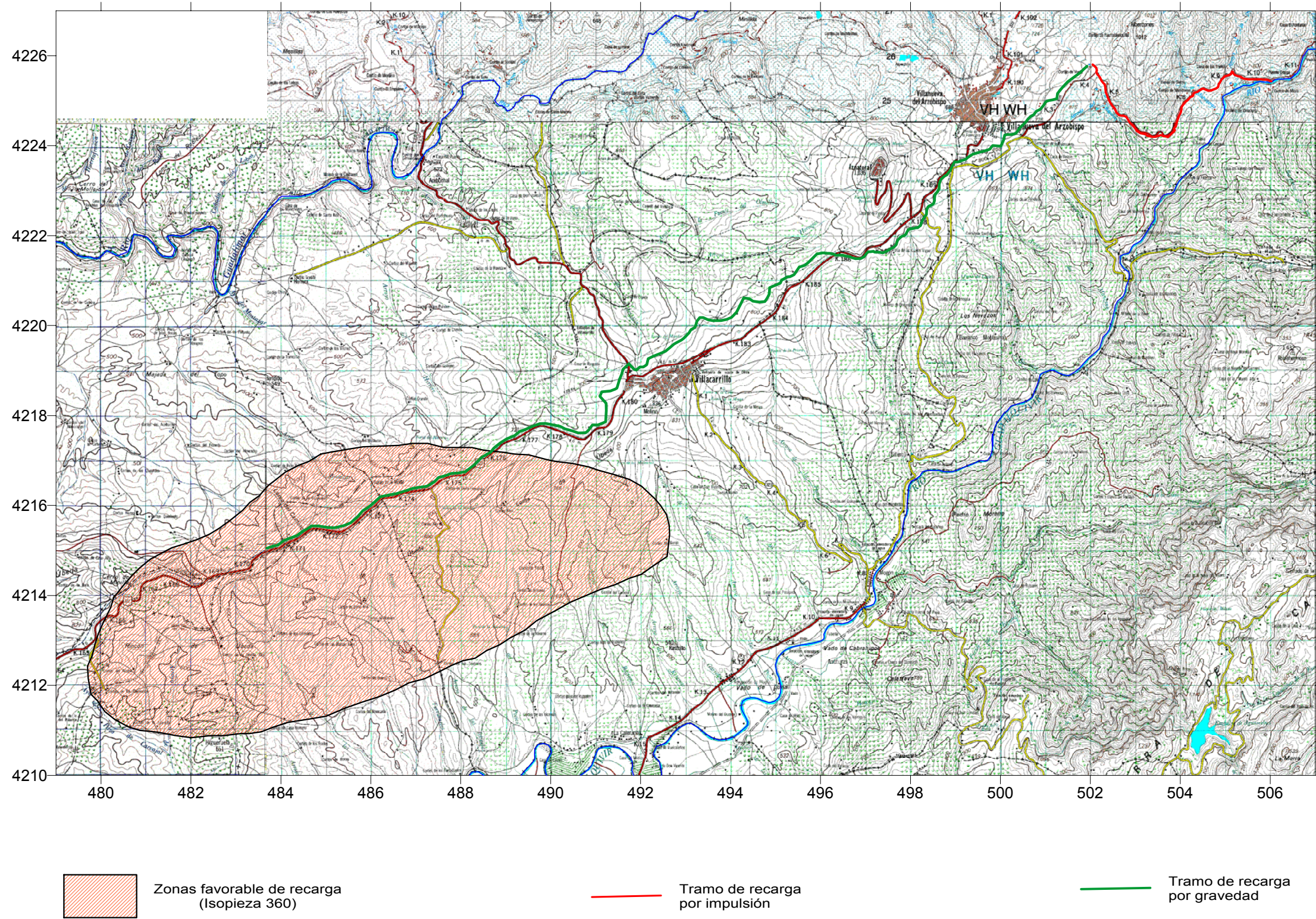
Alternativa de impulsión 1: Se trataría de una toma del río Guadalquivir, con las siguientes características:

- Inicio: Junto al molino de Orocano, en la carretera de Villanueva del Arzobispo al embalse del Tranco, a una cota aproximada de 490 m s.n.m.
- Fin: Junto al Cortijo de Vuela, al NE de Villanueva del Arzobispo, a cota de 820 m s.n.m.
- Impulsión: Debería salvar un desnivel de unos 330 m.
- Longitud: 6000 metros
- Ramales por gravedad: Uno de 3-4 Km para la zona de Villanueva del Arzobispo, con 100 metros de desnivel, y otro de 15-20 Km de longitud si se quiere dominar desde aquí la zona favorable de recarga, con desnivel de más de 100 metros.
- Ventajas: Cubriría totalmente las zonas de recarga, con profundidades del agua de más de 150 metros en Villanueva del Arzobispo y de hasta 200-300 metros en la zona favorable considerada, con lo que serían previsibles caudales de inyección probablemente superiores a 150 l/s por sondeo. Bastaría por consiguiente con un total de 4-5 sondeos si la recarga tiene lugar en seis meses al año u 8/10 sondeos si se lleva a cabo en 3 meses/año, todo ello para 10 hm³/año. En la figura 2 se muestra un detalle de esta alternativa.

Alternativa de impulsión 2: La toma sería igualmente en el río Guadalquivir, entre Santo Tomás y la aldea de Veracruz, en las inmediaciones de una estación elevadora de agua ya existente, con las siguientes características.

- Inicio: Junto a la carretera de Santo Tomás a Solana de Torralba, a una cota aproximada de 390 m s.n.m.
- Fin: 1Km al NE del Cortijo de Teatinos, a cota aproximada de 590 m s.n.m.
- Impulsión: Debería salvar un desnivel de unos 200 m.
- Longitud: 4500 metros

FIGURA 2.- DETALLE DE LA IMPULSIÓN DE RECARGA (ALTERNATIVA N° 1)



Ramales por gravedad: Bastaría con otros 4-6 Km para dominar el área de la zona favorable de recarga comprendida entre 560 y 480 m s.n.m., con profundidades del agua de entre 120 y 200 m. En dicho sector.

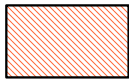
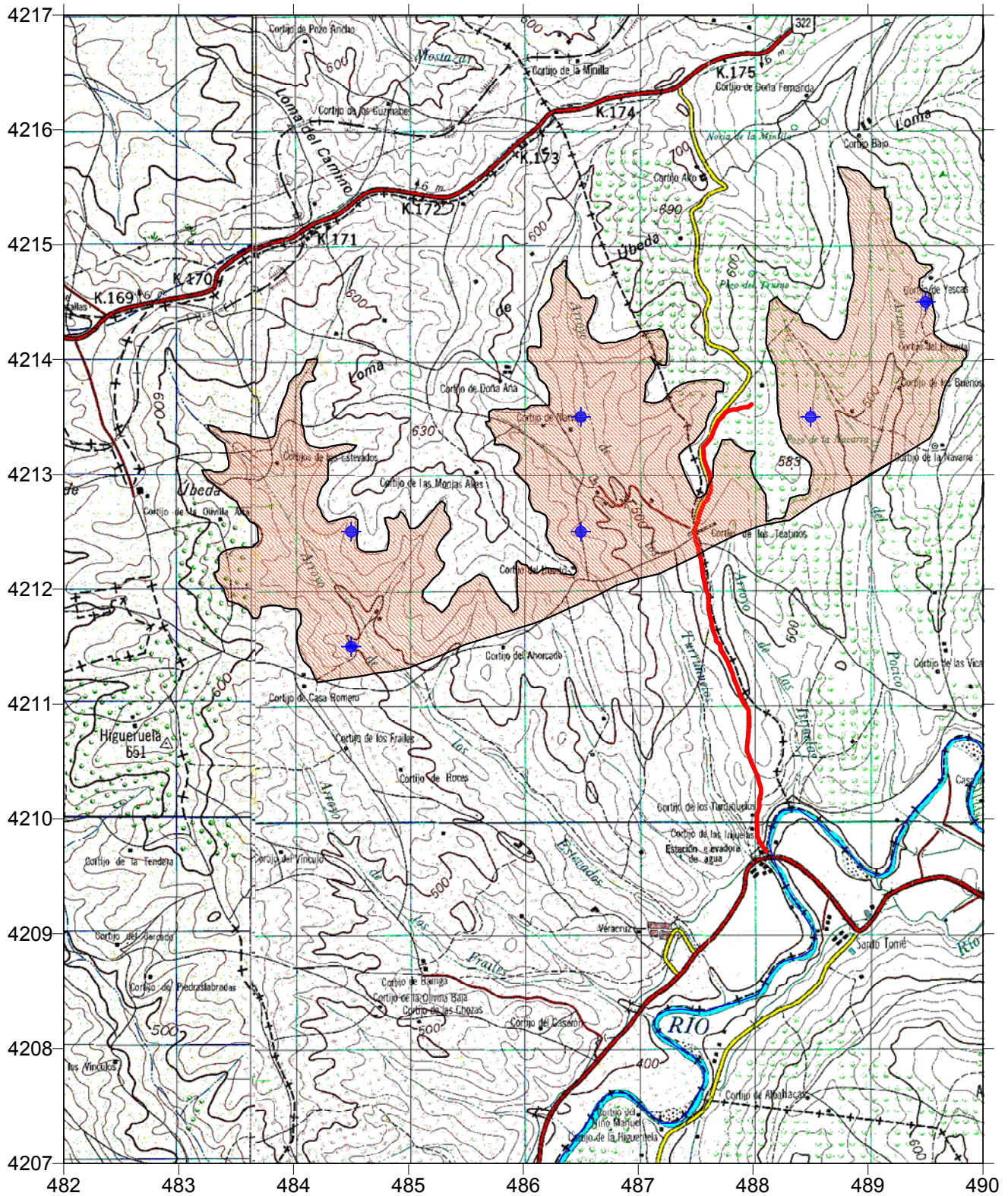
- Ventajas: Cubriría gran parte de la zona más favorable de recarga, con una impulsión muy inferior. Los caudales previsible por sondeo aún superarían los 100 l/s, con lo que bastaría un total de 7-14 sondeos para recargar los 10 hm³/año en 6-3 meses/año, respectivamente. La figura 3 muestra un detalle de esta alternativa.

Alternativa por gravedad: La toma se podría realizar en el río Guadalquivir, junto a la estación de bombeo de Mogón que abastece al Consorcio de la Loma de Úbeda, aunque quizá pudiera requerir una impulsión inicial de 20-30 m para alcanzar la zona posible de recarga con una cota mínima de 430 m s.n.m. Sus características serían:

- Inicio: Junto a la estación de bombeo de Mogón, a una cota aproximada de 450 m s.n.m.
- Fin: Al NE del Cortijo de La Caleruela, a cota aproximada de 430 m s.n.m.
- Impulsión: En principio no sería necesaria
- Longitud: 7000 metros
- Ventajas: Apenas se requeriría bombeo, si bien la carga hidráulica máxima para la inyección sería inferior a 40-50 metros, con lo que no son previsible caudales superiores a 50 l/s por sondeo, y el número de sondeos necesarios se elevaría a 13-26 para 10 hm³/año en 6-3 meses/año, respectivamente. La zona de recarga quedaría en un área próxima al límite meridional del acuífero confinado y con posibles problemas de calidad.

Por lo que respecta al río Guadalimar, las alternativas en principio analizadas supondrían elevaciones próximas a 300 metros tanto para la zona de Villanueva del Arzobispo como para la zona favorable delimitada (isopieza 360), pero con longitudes de impulsión de más de 5-6 Km en el caso de Villanueva y de 8-10 Km para la zona favorable de recarga, con lo que a priori parecen menos adecuadas las tomas en dicho río, que por otra parte ya se vería afectado por una posible disminución de sus aportaciones naturales debido a los bombeos en el acuífero carbonatado, cuyas descargas van al mismo de forma natural.

FIGURA 3.- DETALLE DE LA IMPULSIÓN DE RECARGA (ALTERNATIVA N° 2)



Zonas favorable de recarga a cota entre 480 y 560 m s.n.m



Tramo de recarga por impulsión



Sondeos de recarga (6)

3.3.- CONSIDERACIONES FINALES

Para confirmar la viabilidad de la recarga y valorar su coste sería necesario, en primer lugar, un análisis más detallado de las citadas conducciones y sondeos, y realizar sondeos experimentales (algunos de los piezómetros en proyecto pueden servir para tal fin si se diseñan adecuadamente) para disponer de datos reales sobre caudales de admisión. Por otra parte habría que profundizar en el análisis de los caudales disponibles, salvo que haya garantía de la posibilidad de contar con una regulación previa del embalse del Tranco, mediante los correspondientes desembalses invernales para tal fin. En cualquier caso, si la magnitud de las operaciones de recarga es de unos 10 hm³/año es de esperar la existencia sobrada de recursos dada la magnitud de los excedentes evaluados en la cabecera del Guadalquivir. Quizá podría plantearse una solución mixta de las dos impulsiones consideradas, la primera para elevar al sector de Villanueva del Arzobispo una parte del agua (del orden de 2-3 hm³/año aunque el déficit de esta zona no se ha cuantificado) y la otra desde la zona de Santo Tomé para elevar el resto a la parte central del acuífero, que parece más adecuada por su menor impulsión.

Al respecto cabe considerar, por último, que existe al parecer un protocolo de la CHG con la Delegación de Agricultura de Jaén, que contemplaba el riego de hasta 60000 has de olivar con dotaciones de hasta 1500 m³/ha/año en época invernal (desde Septiembre hasta Abril-Mayo), lo que supondría un cupo de derivaciones de hasta 90 hm³/año, actualmente no dispuesto en su mayor parte, y que podría destinarse parcialmente para la recarga.

Granada, Diciembre de 2001.

ANEJOS

ANEJO 1.- BOMBEO DE ENSAYO

BOMBEO DE ENSAYO SIMULTÁNEO EN LOS SONDEOS: La Mina (2036-7049) y Camino del Cerro (2036-7101 CHG)

FECHA COMIENZO: 25/3/2003

FECHA FINALIZACIÓN: 26/3/2003

CAUDAL MEDIO (l/s): 81.00 (34 l/s sondeo 1 y 47 l/s sondeo 2)

NIVEL ESTÁTICO INICIAL (m): 265.71

TIEMPO DE BOMBEO (min): 750.00

OBSERVACIONES:

Distancia al pozo de bombeo 1 (La Mina) en metros: 2200

Distancia al pozo de bombeo 2 (Camino del Cerro) en metros: 2530

Distancia considerada para interpretación (m): 2365

ENSAYO A CAUDAL CONSTANTE

DESCENSOS EN EL PIEZÓMETRO IMAGEN I

FECHA	HORA	TIEMPO (min)	NIVEL (m)	DEPRESION (m)	CAUDAL (l/s)	OBSERVACIONES
25/03/2003	8:30	0	265.71	0.00	81	Inicio del ensayo. Bombeo en los 2 pozos
25/03/2003	8:32	2	265.71	0.00	81	
25/03/2003	8:34	4	265.71	0.00	81	
25/03/2003	8:36	6	265.72	0.01	81	Se empieza a notar afección
25/03/2003	8:37	7	265.73	0.02	81	
25/03/2003	8:38	8	265.74	0.03	81	
25/03/2003	8:39	9	265.75	0.04	81	
25/03/2003	8:40	10	265.76	0.05	81	
25/03/2003	8:42	12	265.79	0.08	81	
25/03/2003	8:44	14	265.81	0.10	81	
25/03/2003	8:46	16	265.83	0.12	81	
25/03/2003	8:48	18	265.86	0.15	81	
25/03/2003	8:50	20	265.88	0.17	81	
25/03/2003	9:10	40	266.01	0.30	81	
25/03/2003	9:30	60	266.12	0.41	81	
25/03/2003	10:45	135	266.31	0.60	81	
25/03/2003	11:15	165	266.36	0.65	81	
25/03/2003	11:45	195	266.40	0.69	81	
25/03/2003	12:20	230	266.45	0.74	81	
25/03/2003	12:50	260	266.48	0.77	81	
25/03/2003	13:20	290	266.51	0.80	81	
25/03/2003	13:50	320	266.54	0.83	47	
25/03/2003	14:30	360	266.58	0.87	47	
25/03/2003	15:10	400	266.61	0.90	47	
25/03/2003	16:40	490	266.67	0.96	47	
25/03/2003	17:00	510	266.68	0.97	47	
25/03/2003	17:35	545	266.70	0.99	47	
25/03/2003	18:00	570	266.72	1.01	81	

BOMBEO DE ENSAYO SIMULTÁNEO EN LOS SONDEOS: La Mina (2036-7049) y Camino del Cerro (2036-7101 CHG)						
FECHA COMIENZO: 25/3/2003						
FECHA FINALIZACIÓN: 26/3/2003						
CAUDAL MEDIO (l/s):	81.00	(34 l/s sondeo 1 y 47 l/s sondeo 2)				
NIVEL ESTÁTICO INICIAL (m):	265.71					
TIEMPO DE BOMBEO (min):	750.00					
OBSERVACIONES:						
Distancia al pozo de bombeo 1 (La Mina) en metros:				2200		
Distancia al pozo de bombeo 2 (Camino del Cerro) en metros:				2530		
Distancia considerada para interpretación (m):				2365		
ENSAYO A CAUDAL CONSTANTE						
DESCENSOS EN EL PIEZÓMETRO IMAGEN I						
FECHA	HORA	TIEMPO (min)	NIVEL (m)	DEPRESION (m)	CAUDAL (l/s)	OBSERVACIONES
25/03/2003	18:30	600	266.74	1.03	81	
25/03/2003	19:20	650	266.79	1.08	81	
25/03/2003	20:10	700	266.83	1.12	81	
25/03/2003	21:00	750	266.86	1.15	81	Final del bombeo en los dos pozos

BOMBEO DE ENSAYO SIMULTÁNEO EN LOS SONDEOS: La Mina (2036-7049) y Camino del Cerro (2036-7101 CHG)

FECHA COMIENZO: 25/3/2003

FECHA FINALIZACIÓN: 26/3/2003

CAUDAL MEDIO (l/s): **81.00** **(34 l/s sondeo 1 y 47 l/s sondeo 2)**

NIVEL ESTÁTICO INICIAL (m): **269.02**

TIEMPO DE BOMBEO (min): **750.00**

OBSERVACIONES:

Distancia al pozo de bombeo 1 (La Mina) en metros: **2130**

Distancia al pozo de bombeo 2 (Camino del Cerro) en metros: **2450**

Distancia considerada para interpretación (m): **2275**

coordenadas X e Y del pozo bombeo (modelo): **X = 475.883** **Y = 4207.7465**

coordenadas X e Y del piezómetro (modelo): **X = 478.081** **Y = 4207.157**

ENSAYO A CAUDAL CONSTANTE

DESCENSOS EN EL PIEZÓMETRO IMAGEN II (a 2275 m del centro de bombeo)

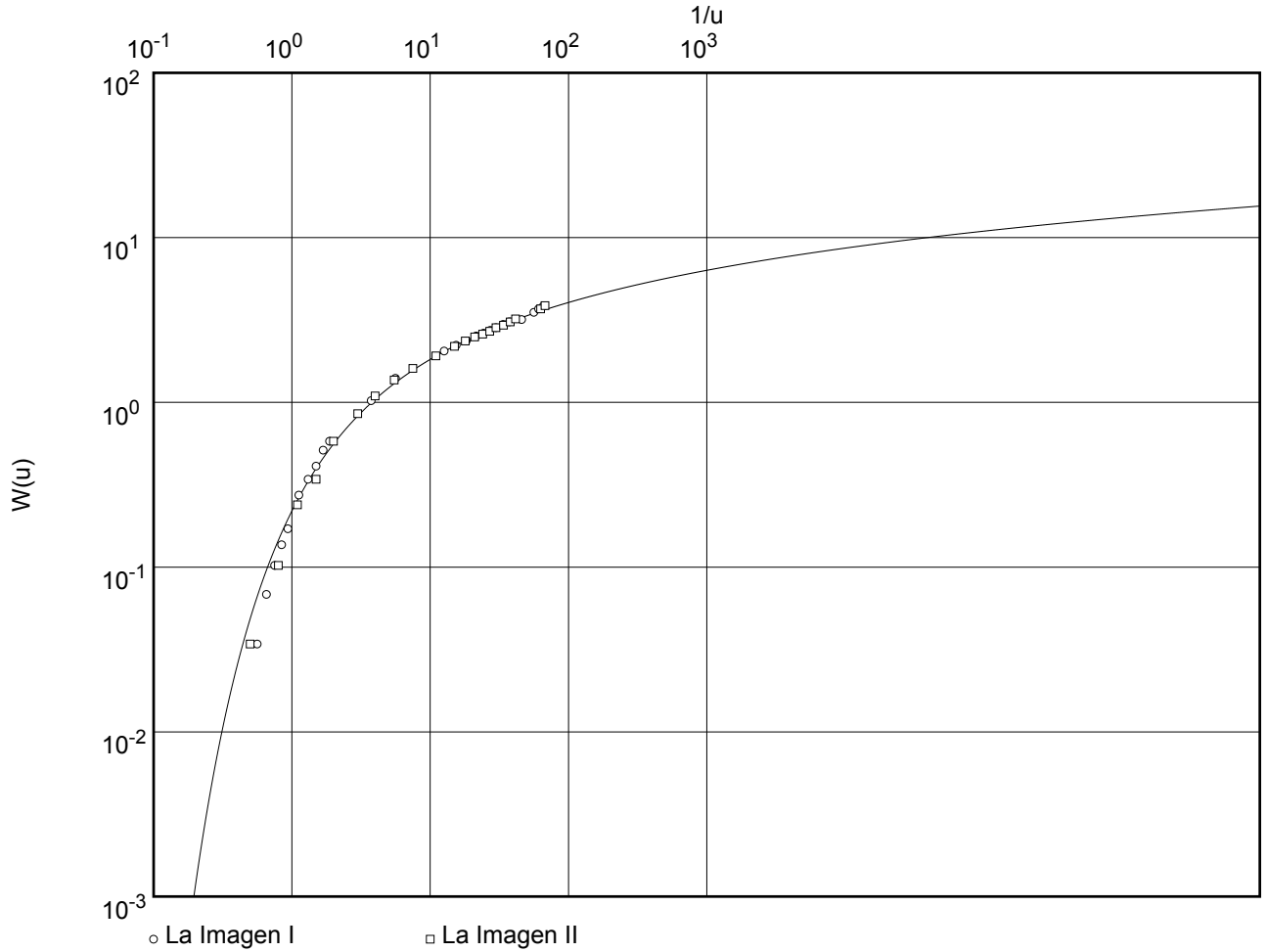
FECHA	HORA	TIEMPO (min)	NIVEL (m)	DEPRESION (m)	CAUDAL (l/s)	OBSERVACIONES
25/03/2003	8:30	0	269.02	0.00	81	Inicio del ensayo. Bombeo en los 2 pozos
25/03/2003	8:32	2	269.02	0.00	81	
25/03/2003	8:35	5	269.03	0.01	81	Se empieza a notar afección
25/03/2003	8:38	8	269.05	0.03	81	
25/03/2003	8:41	11	269.09	0.07	81	
25/03/2003	8:45	15	269.12	0.10	81	
25/03/2003	8:50	20	269.19	0.17	81	
25/03/2003	9:00	30	269.27	0.25	81	
25/03/2003	9:10	40	269.34	0.32	81	
25/03/2003	9:25	55	269.42	0.40	81	
25/03/2003	9:45	75	269.49	0.47	81	
25/03/2003	10:20	110	269.58	0.56	81	
25/03/2003	11:00	150	269.66	0.64	81	
25/03/2003	11:30	180	269.71	0.69	81	
25/03/2003	12:00	210	269.75	0.73	81	
25/03/2003	12:30	240	269.78	0.76	81	
25/03/2003	13:00	270	269.81	0.79	81	
25/03/2003	13:30	300	269.85	0.83	81	
25/03/2003	14:10	340	269.88	0.86	81	
25/03/2003	14:50	380	269.92	0.90	81	
25/03/2003	15:25	415	269.96	0.94	81	
25/03/2003	19:00	630	270.10	1.08	81	
25/03/2003	19:47	677	270.15	1.13	81	
25/03/2003	20:55	745	270.18	1.16	81	
25/03/2003	21:00	750	270.18	1.16	81	Final del bombeo en los dos pozos

Pumping Test No.

Test conducted on:

Pozos La Mina y Camino del Cerro

Discharge 81.00 l/s



Transmissivity [m^2/d]: 1.90×10^3

Storativity: 1.00×10^{-5}

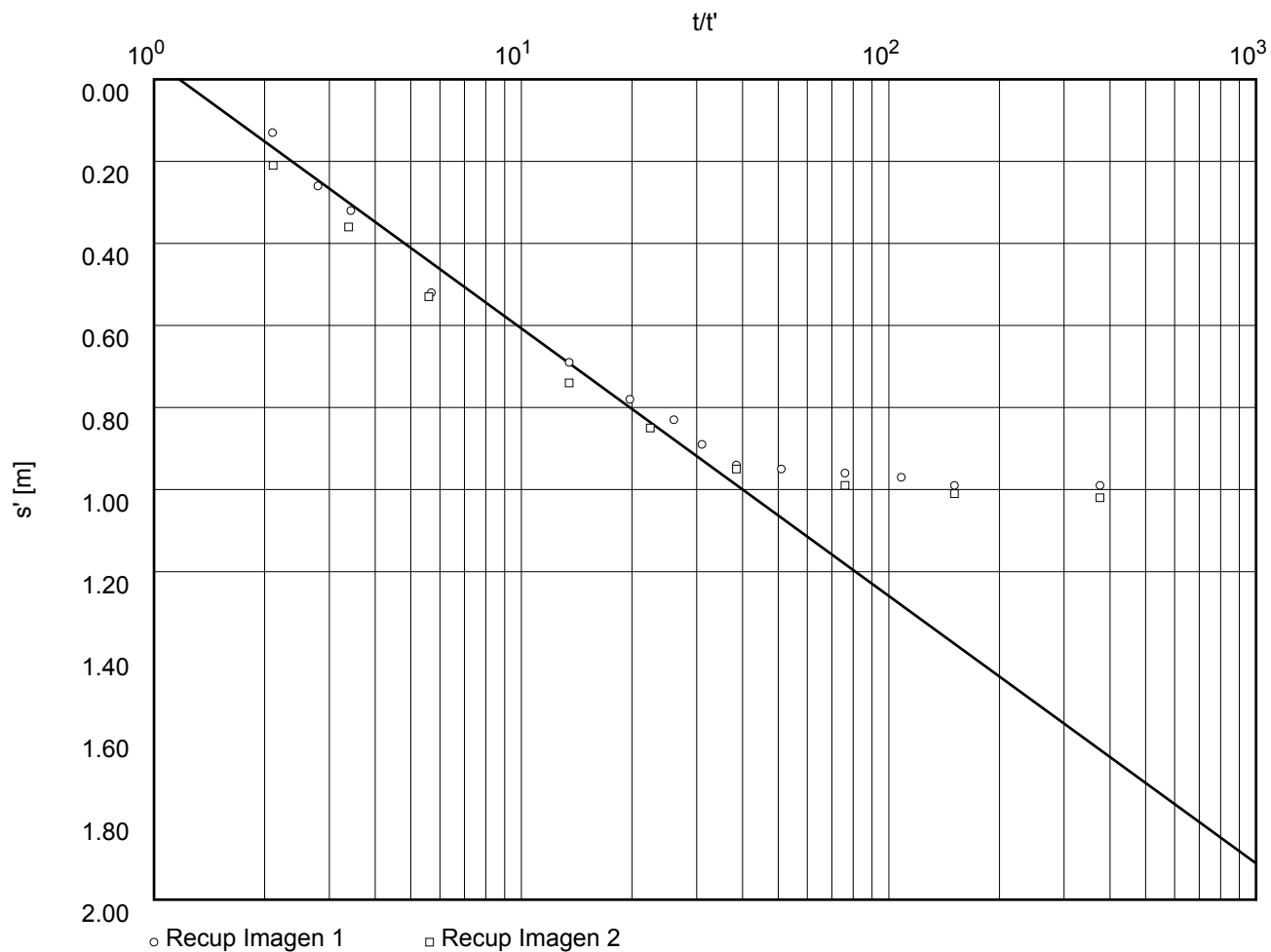
Pumping Test No. _____

Test conducted on: _____

Pozos La Mina y Camino del Cerro

Discharge 81.00 l/s

Pumping test duration: 0.52083 d



Transmissivity [m²/d]: 1.96×10^3

Hydraulic conductivity [m/d]: 2.45×10^1

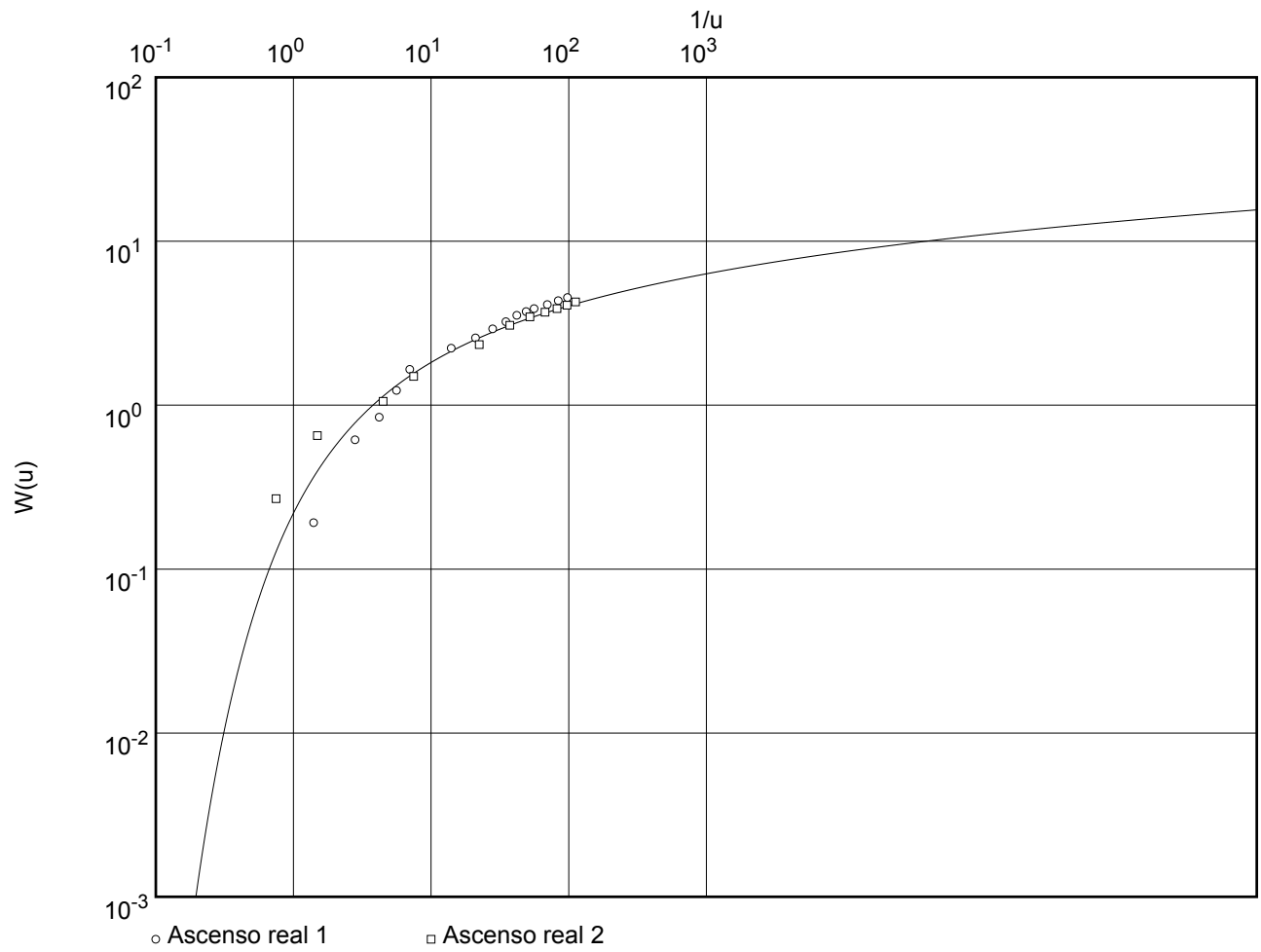
Aquifer thickness [m]: 80.000

Pumping Test No.

Test conducted on:

Pozos La Mina y Camino del Cerro

Discharge 81.00 l/s



Transmissivity [m^2/d]: 2.13×10^3

Storativity: 7.57×10^{-6}

ANEJO 2.- MODELO PRELIMINAR DE FLUJO DEL ACUÍFERO

**MODELO PRELIMINAR DE FLUJO SUBTERRÁNEO
DEL ACUÍFERO CARBONATADO JURÁSICO DE LA
UNIDAD HIDROGEOLÓGICA DE UBEDA**

Diciembre de 2001 (actualizado a Enero 2005)

INDICE

1.- <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2.- <u>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL</u>	2
3.- <u>MODELO MATEMÁTICO: CARACTERÍSTICAS Y DATOS DE ENTRADA</u>	3
3.1.- CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE FLUJO	3
3.2.- DISCRETIZACIÓN Y GEOMETRÍA	3
3.3.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS	4
3.4.- RECARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO	8
3.5.- EXPLOTACIÓN POR BOMBEO	8
3.6.- PIEZOMETRÍA.....	9
3.- <u>CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN ESTACIONARIO</u>	11
4.- <u>CALIBRACIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO</u>	14
5.- <u>CALIBRACIÓN DEL MODELO TRANSITORIO</u>	17
6.- <u>SIMULACIÓN DE HIPÓTESIS</u>	22
7.- <u>CONCLUSIONES</u>	26

1.- INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde a los trabajos de construcción de un modelo del flujo subterráneo del acuífero carbonatado de la Depresión del Alto Guadalquivir. El modelo ha sido calibrado en régimen permanente, transitorio y también se han tratado de reproducir las condiciones de un ensayo de bombeo efectuado en el sector. Asimismo se han efectuado varias simulaciones representando alternativas de recarga artificial.

Conviene insistir en que se trata de una modelización preliminar. En este sentido cabe indicar que han sido diversas las dificultades encontradas a lo largo del trabajo, especialmente derivadas de la singular geometría del acuífero y de sus condiciones de contorno, las que han impedido simular el acuífero con otras opciones que se estimaban a priori como más razonables. Tales limitaciones son expuestas a lo largo del presente informe y se indican las opciones finalmente elegidas.

El principal objetivo del modelo consiste en disponer de una herramienta para el estudio del funcionamiento del acuífero que permita establecer la coherencia entre los distintos elementos que condicionan la hidrodinámica subterránea tales como los parámetros hidrogeológicos, geometría, balance hídrico y la relación río-acuífero, algunos de los cuales son datos de entrada al modelo directos o indirectos. Tras la fase de ajuste o calibrado, que ha supuesto varias revisiones de los datos de entrada y de la conceptualización de modelo, el modelo numérico permite plantear distintas alternativas de simulación que son especialmente interesantes en su desarrollo transitorio.

Teniendo en cuenta las incertidumbres existentes, especialmente respecto a la geometría y funcionamiento, se considera que este modelo es un primer avance que reproduce con relativa certeza la mayor parte de los aspectos conocidos del acuífero y que puede y debe ser revisado en la medida que se obtengan nuevos datos.

En este trabajo se siguen las etapas usuales de construcción y aplicación de modelos que pueden agruparse en las siguientes:

- 1) Definición del modelo hidrogeológico conceptual.

- 2) Definición de las características geométricas del acuífero y diseño de la malla del modelo.
- 3) Asignación de propiedades hidráulicas.
- 4) Asignación de condiciones de contorno y recarga.
- 5) Elaboración de datos de explotación por bombeo.
- 6) Elaboración de datos de niveles piezométricos observados.
- 7) Calibración y verificación del modelo.
- 8) Sensibilidad del modelo frente a modificaciones de parámetros y condiciones de contorno y recarga.
- 9) Predicciones o simulación de hipótesis.

2.- MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

La definición del modelo conceptual consiste en la idealización o simplificación de las condiciones hidrogeológicas conocidas incluyendo una descripción de tales condiciones y de los procesos más importantes que ocurren. En el caso que nos ocupa, el medio subterráneo está constituido por un tramo constituido por dolomías liásicas de la cobertera tabular de la Meseta que se hundieron hacia el Sur-Sureste bajo los depósitos miocenos de la Loma de Úbeda y Villacarrillo. El modelo hidrogeológico propuesto inicialmente estaba compuesto por dos capas que corresponden a tales materiales. Sin embargo durante su elaboración se decidió simplificar el sistema a una capa que representa exclusivamente el acuífero modelizado. En otras fases del estudio general de caracterización hidrogeológica fueron definidos los principales aspectos necesarios para la modelización hidrogeológica por lo que no es necesario revisarlos en este apartado.

3.- MODELO MATEMÁTICO: CARACTERÍSTICAS Y DATOS DE ENTRADA

3.1.- Características del modelo de flujo

Un modelo matemático de flujo subterráneo es una representación de la hidrología subterránea que utiliza las ecuaciones fundamentales de flujo, basándose en observaciones reales y extrapolaciones en las zonas donde no se dispone de datos suficientes o que se duda de su fiabilidad.

El modelo numérico aplicado ha sido Modflow (McDonald & Harbaugh, 1988. "A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model", U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1). Este código numérico resuelve la ecuación de flujo subterráneo mediante diferencias finitas para lo que se discretiza el medio físico en bloques y los datos requeridos por el modelo se asignan al centro de éstos. Como preprocesador y postprocesador se ha empleado el programa Visual Modflow de Waterloo Hydrogeologic Inc.

3.2.- Discretización y geometría

El acuífero ha sido discretizado con una malla de celdas cuadradas de 1 km² entre las coordenadas UTM (en metros) siguientes: X_{mín}=450.000; X_{máx}=510.000; Y_{mín}=4.200.000; Y_{máx}=4.240.000. El total de celdas que componen el modelo es de 2400 (60 columnas x 40 filas).

Se ha considerado una capa que representa el acuífero. Así pues existen dos superficies:

- 1) La superficie superior corresponde a la topografía en la parte libre y al techo del acuífero en la parte confinada.
- 2) La superficie inferior corresponde al muro del acuífero cuya posición se desconoce con exactitud tanto en el sector libre como en el confinado. En la parte libre, los espesores máximos observados en afloramientos no superan los 70 m y los mínimos en torno a 10 m. A efectos del modelo se

decidió considerar un espesor constante de 20 m. Respecto al sector confinado del acuífero, el muro se ha tomado con un espesor constante de 100 m. Las celdas situadas fuera del dominio modelizado (celdas inactivas) se han situado con un espesor mínimo de 1 m por debajo de la topografía. Resulta evidente que, en posteriores trabajos, uno de los aspectos a revisar debe ser la conceptualización efectuada de la geometría, una vez se disponga de datos geométricos fiables (y/o de la distribución espacial de transmisividades).

El número de celdas del modelo activas es de 714 (714 km²) de las 177 están en la parte libre y 537 en la parte confinada. En la parte libre existe una reducción de la superficie modelizada respecto a la real (unos 252 km²) lo que se debe, principalmente, a no haber considerado la parte situada en el extremo nororiental (zona del Arroyo de la Torre) que constituiría un sector con drenaje diferenciado. Asimismo, en la parte confinada no se modeliza el sector de Villanueva del Arzobispo que tiene unas cotas piezométricas indicativas probablemente de una desconexión hidráulica, y en los últimos estudios realizados se considera ya como un sector independiente.

La figura 1 muestra la discretización realizada en el acuífero así como las zonas libre y confinada, y las condiciones de contorno. En la figura 2 se muestra un corte del modelo conceptual y su relación con el modelo de flujo.

3.3.- Parámetros hidráulicos

Se ha considerado un rango de valores de transmisividad entre 1.700 y 2.200 m²/día, y un coeficiente de almacenamiento comprendido entre $7,5 \times 10^{-6}$ y $1,5 \times 10^{-5}$ coherentes con los datos reales del único ensayo de bombeo realizado en la zona. Como se verá más adelante, dicho ensayo, realizado en el marco del presente estudio, ha sido simulado y la calibración obtenida parece indicar como valores más adecuados el de 2.200 m²/día y un coeficiente de almacenamiento entorno a 10^{-5} .

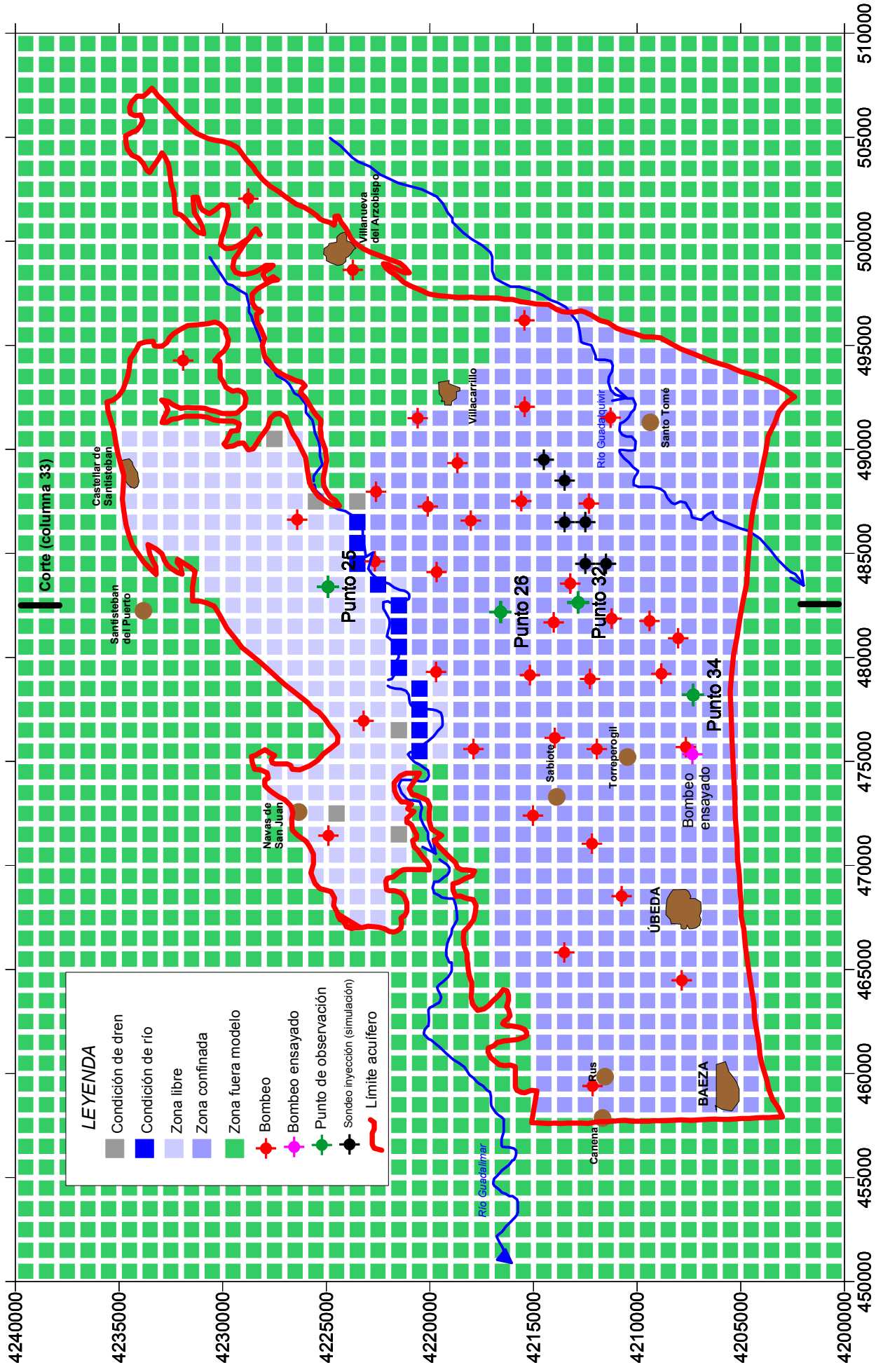


Figura 1.- Discretización, condiciones de contorno y puntos de observación.

Figura 2a

PERFIL ESQUEMÁTICO NORTE-SUR DEL ACUÍFERO CARBONATADO JURÁSICO DE LA LOMA DE ÚBEDA

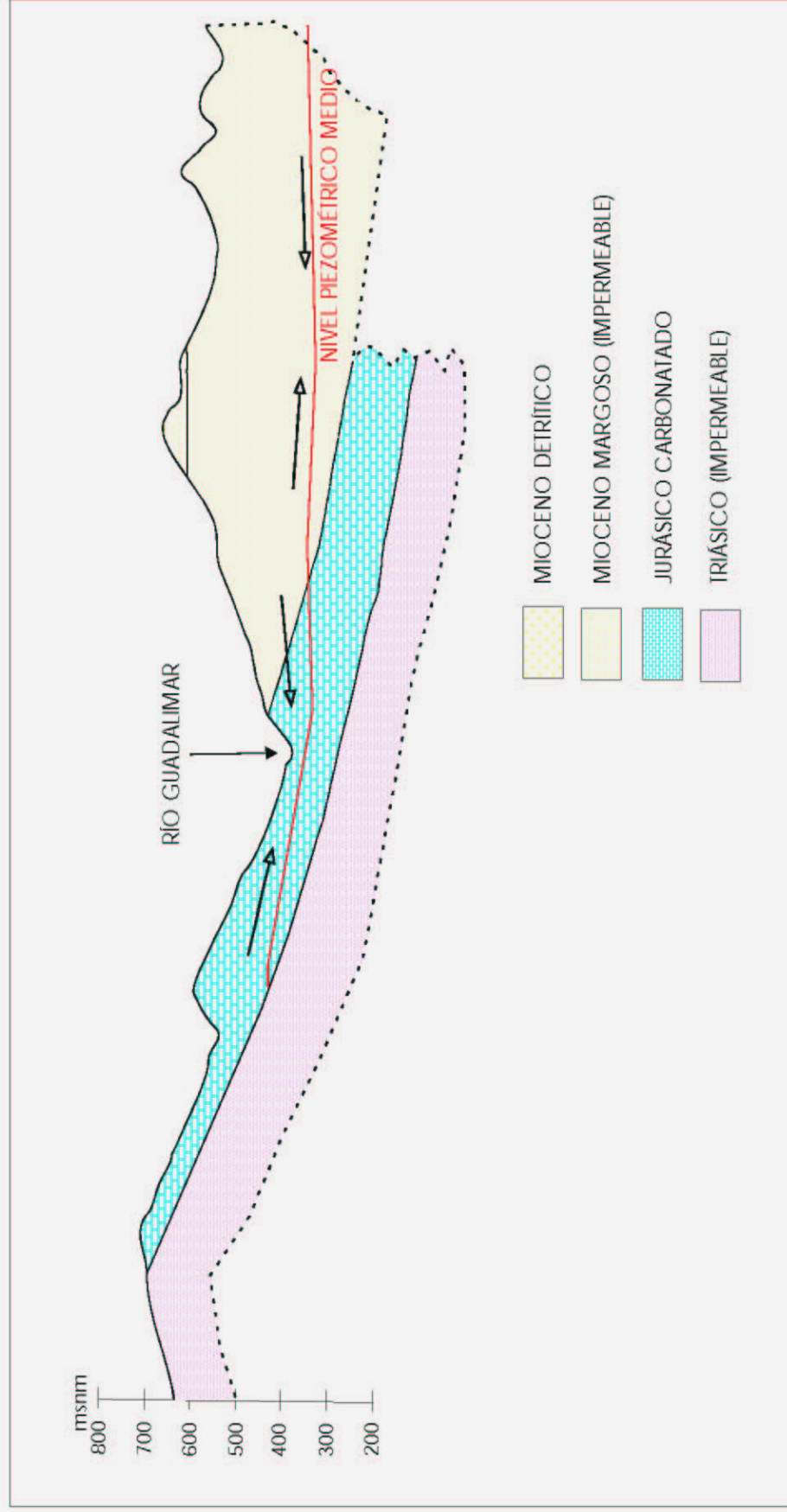
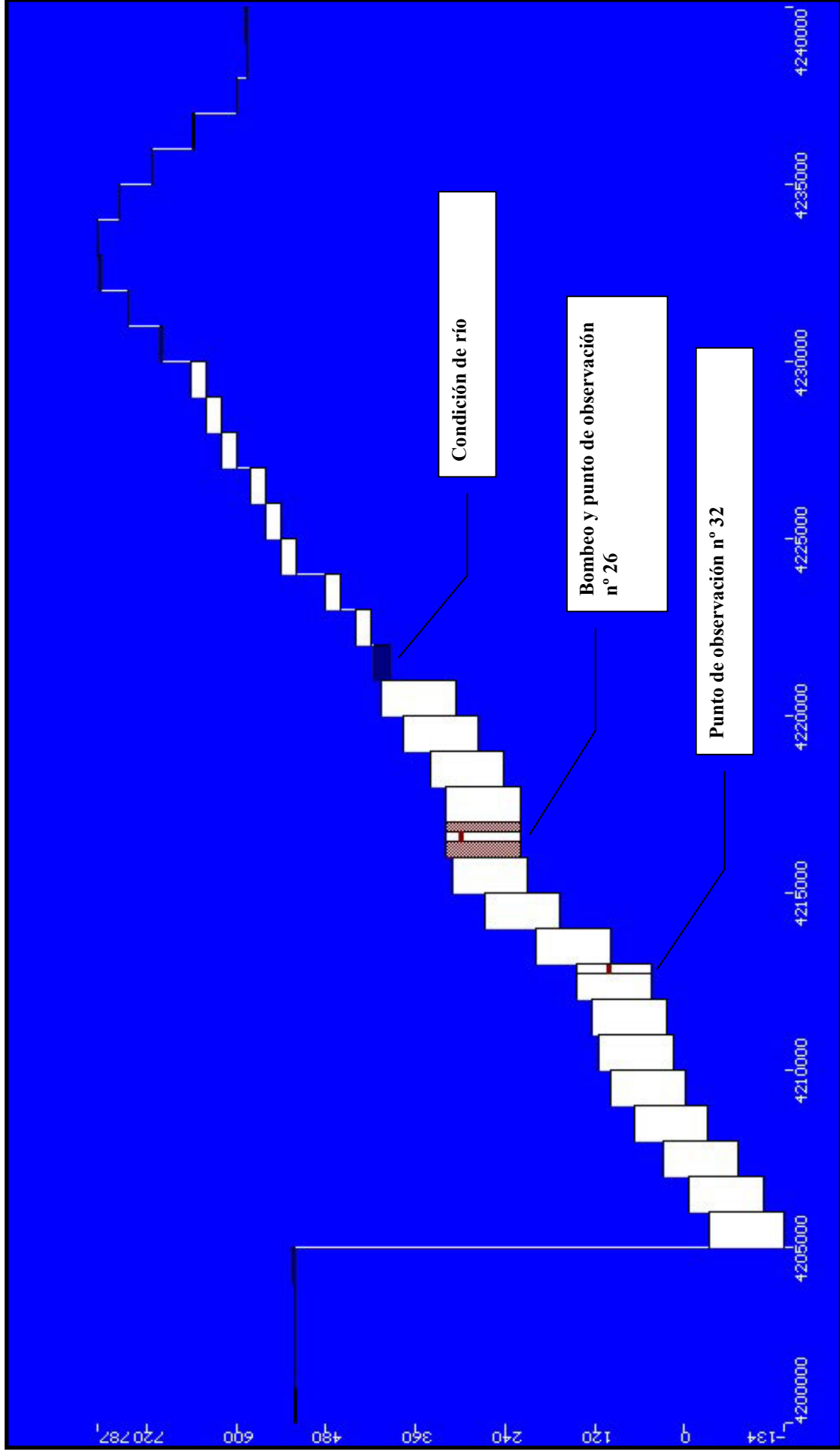


Figura 2b.- Modelo conceptual y corte en el modelo de flujo (Norte-Sur; Columna 33).



3.4.- Recarga y condiciones de contorno

La recarga se ha aplicado únicamente en la parte libre del acuífero. En régimen estacionario se ha introducido un valor de 200 mm/año (aprox. 60% de una lluvia útil de 330 mm/año según estudio hidrogeológico), lo que supone unas entradas de 35.4 hm³/año. En régimen transitorio se ha incorporado la recarga mensual procedente de la precipitación durante los dos años simulados (Mayo/01-Abril/02) cuyos valores anuales (84 y 125 mm/año) son notablemente inferiores al considerado en régimen natural. Respecto a esto último, se ha observado que la estación de Sabiote es un 14 % más seca que la media del acuífero, y el periodo estudiado es un 11 % más seco que la media de Sabiote. En consecuencia, los datos de precipitación utilizados son el 76 % de los valores normales (467 mm/año frente a 611 mm/año de media en el acuífero).

Además de la condición de contorno de flujo nulo (bordes impermeables o celdas inactivas), la condición de contorno más importante del modelo en régimen permanente es el río Guadalimar que atraviesa el acuífero de Oeste a Este con cotas entre 420 y 365 m s.n.m. respectivamente (Figura 1). En esta condición de contorno el modelo requiere que se introduzcan las cotas del fondo del cauce en cada celda, las de la lámina de agua (se ha considerado un valor de 0,5 m) y la conductancia hidráulica. Para este último parámetro se estima que los valores reales se sitúan en un amplio margen variable entre 500 y 30000 m²/día, y en los modelos calibrados se ha tomado un valor de 500 m²/día.

Las descargas por manantiales, aforadas normalmente en cauces superficiales, se han introducido como condición de dren (Figura 1). Se ha considerado un valor inicial de conductancia de 200 m²/día y se han tratado de localizar en la cota de descarga más probable (Tabla 1). Al no disponer de datos más precisos, los modelos han sido calibrados considerando unas salidas anuales de 4,6 hm³/año, correspondiente a la media de las 5 campañas de aforos realizadas hasta la fecha.

3.5.- Explotación por bombeo

Los datos de explotación por bombeo han sido estimados en el estudio hidrogeológico con un valor de 35,6 hm³/año en 233 puntos, que a efectos del

modelo se han concentrado en 40 puntos, tal como se explica en el análisis de explotaciones del informe hidrogeológico. En el modelo se han introducido 37 puntos (3 puntos quedan fuera de la zona modelizada), algunos de los cuales pueden llegar a agrupar hasta 12 captaciones. La explotación se ha considerado con la misma distribución mensual y valores para los dos años del modelo transitorio (32,9 hm³/año en 37 puntos). En la figura 1 se puede observar la localización espacial de los bombeos.

3.6.- Piezometría

Para la comparación entre valores observados y calculados se han tenido en cuenta 1 piezómetro situado en la parte libre de acuífero (punto 25) y 3 en la parte confinada (puntos 26, 32 y 34) (Figuras 1 y 2). En régimen estacionario sólo se ha tratado de reproducir una piezometría entorno a 400 m s.n.m en la parte confinada. En el modelo del ensayo de bombeo se ha tomado como punto de observación el número 34 donde fueron controlados los niveles. En régimen transitorio de dos años se han tenido en cuenta las medidas periódicas efectuadas en los citados piezómetros entre Mayo de 2001 y Abril de 2003, únicos disponibles durante la fase de calibración del modelo.

Tabla 1.- Resumen de los aforos de las descargas del acuífero consideradas en el modelo.

Nº SECCION	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	Número de zona de balance en el modelo
9	Arroyo de Los Morales (en Navas)	472260	4224477	540	Estimado	40.3	3,482	1.271	Dcha	3
13	Cañada de Úbeda (tb. GPS 210)	476800	4220870	400	Molinete	16.7	1,443	0.527	Dcha	4
19	Arroyo de la Estrella (aguas abajo 193)	470748	4220602	405	Molinete	28.6	2,471	0.902	Dcha	5
25	Arroyo del Arbolón (puente camino Cjo. St ^a . Marina)	489704	4223767	450	Estimado	23.6	2,039	0.744	Izda	6
28	Arroyo de la Cabañada	487647	4225433	460	Molinete	12.7	1,097	0.401	Dcha	7
31	Arroyo de la Torre	494475	4230155	560	Estimado	10.3	890	0.325	Dcha	Fuera modelo
32	Arroyo de la Cañada	491313	4227784	520	Molinete	23.7	2,048	0.747	Dcha	8
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		

3.- CALIBRACIÓN EN RÉGIMEN ESTACIONARIO

De acuerdo con las condiciones propias de un régimen no influenciado (sin bombeos en este caso), se considera un modelo conceptual en el que la recarga procede únicamente de la infiltración de la lluvia útil sobre el acuífero y de la posible infiltración del agua del río Guadalimar, y la descarga se realizaría por el río Guadalimar y manantiales. El sistema modelizado tiene dos sectores, uno libre, donde afloran los materiales carbonatados y uno confinado que en condiciones naturales estaría totalmente saturado hasta alcanzar su cota de desagüe.

Se han realizado numerosas pasadas variando parámetros, condiciones de contorno e incluso se ha revisado la geometría (inicialmente con dos capas y con el sector de Villanueva del Arzobispo incluido). La conductancia de los manantiales se ha variado hasta conseguir las salidas que se producen por cada uno de ellos. Cuando se trató de simular el modelo con unas condiciones de capa con almacenamiento y transmisividad variables (tipo 3) el modelo presentó importantes problemas de convergencia, en la parte libre del acuífero, que impidió su ejecución. Los datos de entrada, condiciones de simulación y resultados se muestran de forma resumida en la tabla 2.

Los resultados obtenidos resultan razonablemente válidos para el acuífero confinado que muestra unos niveles piezométricos situados en torno a los 400 m s.n.m (Figura 3), aunque si se toman como representativos de un régimen estacionario los niveles de mayo de 2001 (al inicio de la campaña de bombeos para riego), la piezometría calculada quedaría significativamente por encima, lo que es lógico por otra parte ya que aún podía haber afecciones de años anteriores (la explotación masiva se inició a partir de 1995 y no hay datos de piezometría inicial).

El balance hídrico proporciona unas entradas procedentes de la recarga que se cifran en 35,4 hm³/año e infiltración de agua del río nula. Las salidas se producen por el río (30,7 hm³/año) y por manantiales (4,7 hm³/año).

Tabla 2. Resumen de características obtenidas en el modelo calibrado en régimen estacionario.

		MODELO CALIBRADO
	Objetivo	Se trata de reproducir un gradiente hacia el río en la parte libre, y unos niveles piezométricos por debajo de la cota 400 en la parte confinada.
DATOS DE ENTRADA	Filas	40
	Columnas	60
	Discretización	2400 celdas. 1 capa. Malla de 1 km ²
	Superficie modelizada (km ²)	714
	Superficie en la zona de acuif. Libre	177 (252 es la superficie real)
	Superficie en la zona de acuif. Confinado	537 (unos 627 es superficie real)
	Espesor constante en zona libre	20 m
	Espesor constante en zona confinada	100 m
	Bombes (m ³ /día)	No interviene
	Nº de piezómetros de observación	4 (1 Libre; 3 confinado; no se considera zona Villanueva)
	NP Observado Punto-25 (Acuífero Libre) (m s.n.m.)	443
	NP Observado Punto-26 (Acuífero Confinado) (m s.n.m.)	369
	NP Observado Punto-32 (Acuífero Confinado) (m s.n.m.)	361
	NP Observado Punto-34 (Acuífero Confinado) (m s.n.m.)	371
	Kx=Ky=Kz número 1 (m/día)	22 en zona libre (x 20 m= 440 m ² /día)
	Kx=Ky=Kz número 2 (m/día)	22 en zona confinada (x 100 m=2200 m ² /día)
	Coef. Almacenamiento Específico Ss (1/m)	No interviene en régimen estacionario
	Almacenamiento Sy (%)	No interviene en régimen estacionario
	Condición de río. Nº de celdas afectadas	12
	Condición de río. Cotas del fondo	De 420 a 365 m s.n.m. con descenso de 5 m por celda
	Condición de río. Lámina de agua	0,5 m en todas las celdas
	Condición de río. Conductancia (m ² /día)	500 en todas las celdas. Podría variar entre 500 y 30000
	Cotas de manantiales	Variables según su localización
	Conductancia de manantiales (m ² /día)	100 Sin valores de referencia
	Recarga (mm/año)	200
	Nº de celdas donde se aplica (equivale a superficie en km ²)	177
Recarga (hm/año)	35.4	
Observación de recarga	La recarga real es de unos 200 mm/año (aprox. 60% de lluvia útil de 330 mm/año), que, si se considera una superficie total de 252 km ² (según estudio hidrogeológico previo) equivaldría a unos 50 hm ³ /año. En este caso la recarga expresada en hm ³ /año es menor puesto que la superficie modelizada es menor.	
Condición de barrera	Se aplicó en fases previas para diferenciar zona de Villanueva	
COND. SIMUL.	Tiempo	Régimen estacionario
	Piezometría inicial	Constante (el valor introducido sólo influye para reducir el tiempo de ejecución del modelo)
	Método de resolución	WHS Solver
	Tipo de capa	Tipo 2. Confinado/Libre. Variable S, T constante
PIEZO.	Re-humedecimiento de celdas	No aplicado
	Isopiezas zona acuífero libre	Gradiente hacia el sur (de 515 a 407 m s.n.m.)
	Isopiezas zona acuífero confinado	Aproximadamente constante a 407 m s.n.m.)
Observaciones	Escaso gradiente	
BALANCE (hm³/año)	Recarga	35.4
	Infiltración río	0.0
	TOTAL ENTRADAS	35.4
	Bombes	0.0
	Manantiales	4.7
	Drenaje río	30.7
	TOTAL SALIDAS	35.4
Variación de almacenamiento	-2.1E-05	
Valoración general de los resultados		Los niveles piezométricos calculados por el modelo en la parte confinada (unos 400 m s.n.m.) están por encima de los valores observados supuestos (a unos 370 m s.n.m. como situación previa al bombeo del año 2001). El sistema está muy condicionado por las cotas del río y drenes. El balance parece coherente con el modelo conceptual.

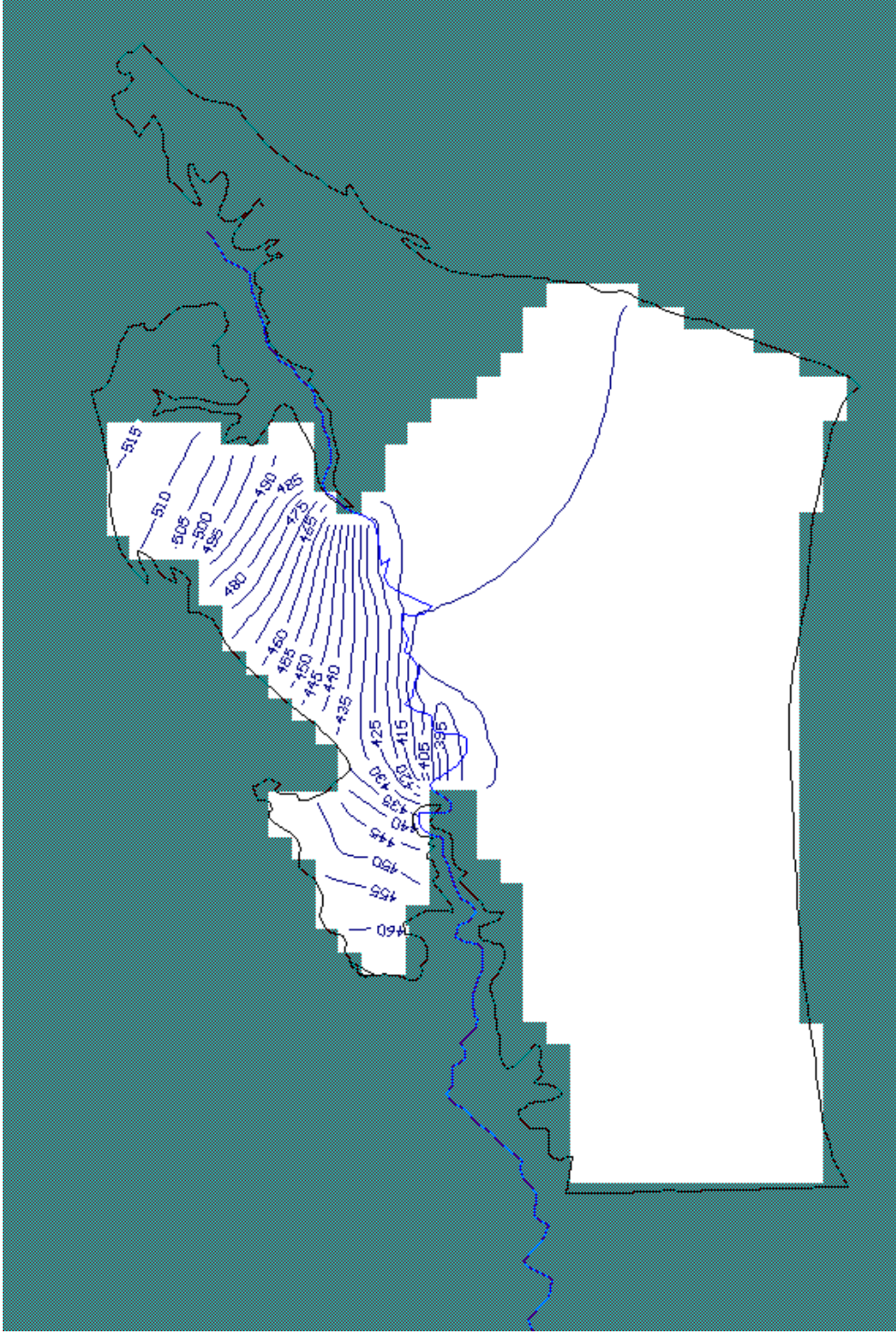


Figura 3.- Piezometría resultante en régimen estacionario.

4.- CALIBRACIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO

Una vez obtenida una piezometría en régimen estacionario se decidió simular el ensayo de bombeo simultáneo efectuado del 25 al 26 de marzo de 2003 en los sondeos La Mina (nº 15, 2036-7049 del IGME) y Camino del Cerro (nº 14, 2036-7101 de la CHG 2001), situados a unos 430 metros de distancia entre sí, tomando como puntos de observación los sondeos Imagen I y II, situados a unos 175 m de distancia entre sí y a distancias de 2365 y 2290 metros, respectivamente, del centro geométrico de los pozos de bombeo (puntos 34 y 35, el primero coincidente con el 2036/8111 de la CHG).

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. En el modelo se simuló 1 día con pasos de tiempo de 0,01 días.

Durante la calibración de este modelo se modificó la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. Los valores finalmente adoptados como válidos han sido de 2.200 m²/día de transmisividad y de $1,4 \cdot 10^{-5}$ para el coeficiente de almacenamiento, totalmente coincidentes con los obtenidos en la interpretación manual y semiautomática del ensayo de bombeo por los métodos habituales. Ambos valores fueron incorporados al modelo estacionario para obtener la piezometría inicial de la que parte el modelo transitorio. En la figura 4 se comparan los descensos observados en los piezómetros (media de los valores obtenidos en los sondeos Imagen I y II, muy similares entre sí) con los calculados por el modelo para distintos valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

En la figura 5 se muestra un mapa de isodescensos al finalizar el bombeo donde se puede apreciar que la afección se aproxima al río, lo que resulta como consecuencia, especialmente, del alto grado de confinamiento. Ello es coherente con lo observado durante el ensayo, en el que a partir de los cinco minutos del bombeo se apreció la afección en ambos piezómetros, situados a más de 2 km del centro del bombeo.

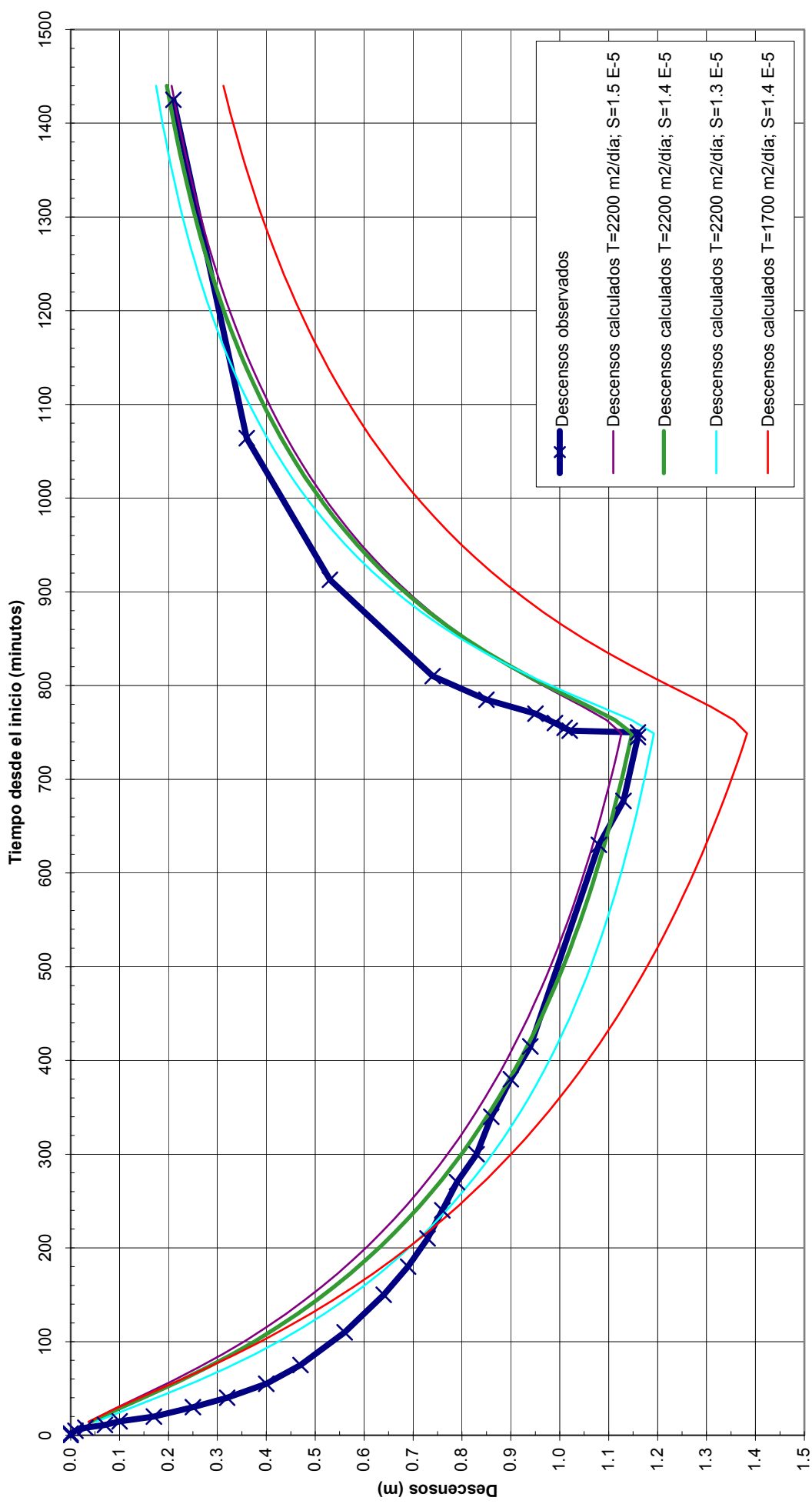


Figura 4. Ensayo de bombeo. Comparación entre descensos observados y calculados en el punto 34 (piezómetro Imagen II) para distintos parámetros hidráulicos.

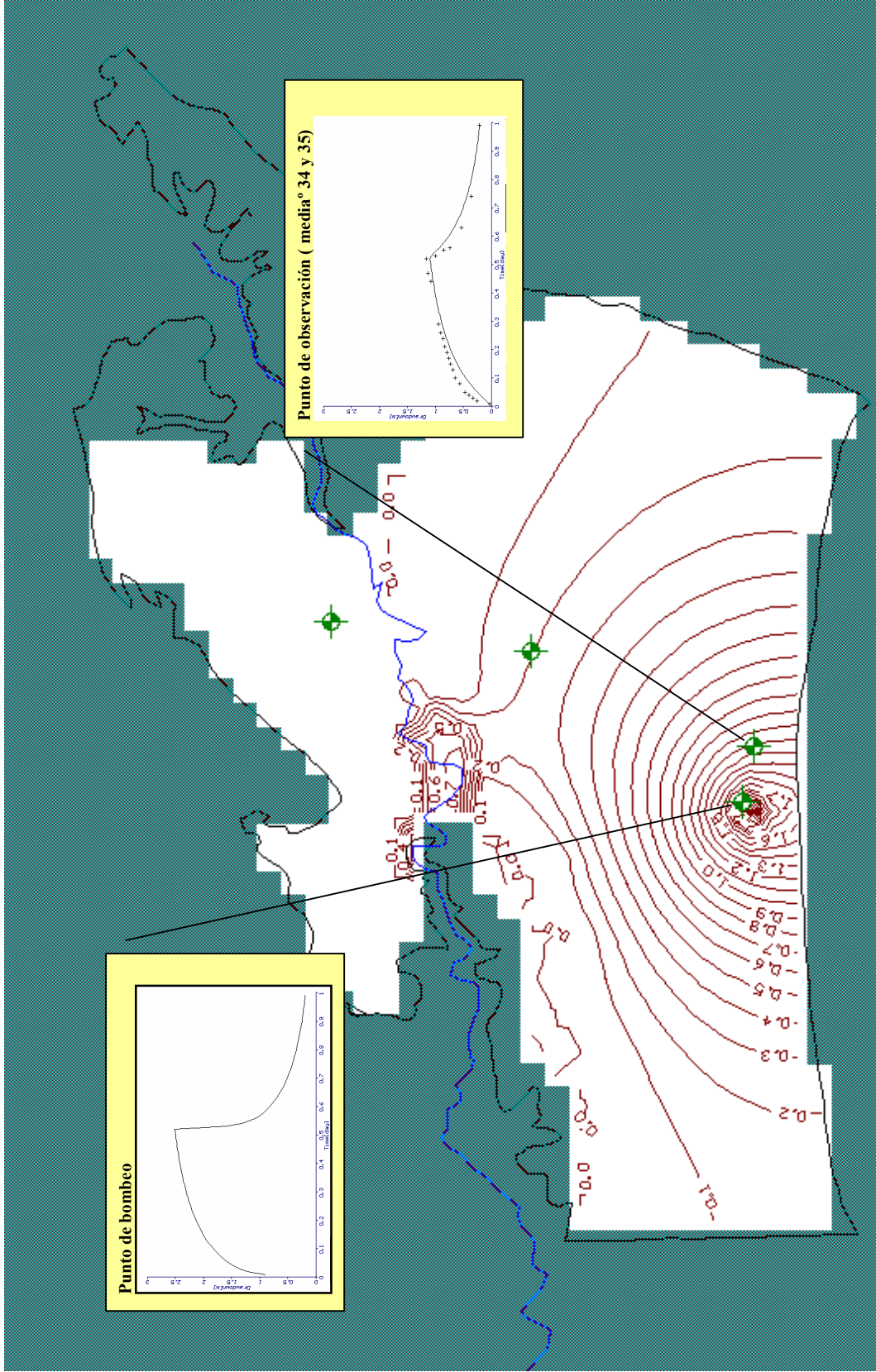


Figura 5. Ensayo de bombeo. Descensos máximos observados correspondientes a la finalización del bombeo (0,52 días; Minuto 750).

5.- CALIBRACIÓN DEL MODELO TRANSITORIO

En este régimen de funcionamiento del acuífero se ha partido de la piezometría del acuífero suministrada por el modelo en régimen estacionario y se han incorporado los bombeos y la recarga para el periodo modelizado comprendido entre mayo de 2001 a abril de 2003 (2 campañas de riego).

El modelo transitorio ha sido finalmente calibrado, sin considerar el río, con un valor de transmisividad de $2.200 \text{ m}^2/\text{día}$, igual al del régimen estacionario, y un coeficiente de almacenamiento de $1,4 \cdot 10^{-4}$. Como puede observarse dicho coeficiente de almacenamiento resulta un orden de magnitud mayor que el calibrado en el ensayo de bombeo ($1,4 \cdot 10^{-5}$). Respecto a esta circunstancia cabe indicar que el grado de confinamiento aumenta evidentemente de norte a sur, de manera que en el sector del ensayo de bombeo se habría determinado un valor muy bajo por su cercanía al borde, alcanzando valores propios de acuífero libre al sur del río Guadalimar. En revisiones posteriores se deberá plantear la consideración de varias zonas de coeficiente de almacenamiento una vez se disponga de datos reales.

En la figura 6 se comparan los descensos observados en los piezómetros 25, 26, 32 y 34 con los respectivamente calculados por el modelo. Salvo en el piezómetro correspondiente al sector libre (punto 25), donde sólo se consigue reproducir la tendencia pero no las oscilaciones, en el resto de los puntos (n^{os} 26, 32 y 34; sector confinado), el ajuste es razonablemente adecuado. La mejor adecuación entre descensos observados y calculados se ha obtenido en el punto 32 que, además, es el único que no contiene un pozo de bombeo en la misma celda. La imposibilidad de reproducir las condiciones del piezómetro 25 está impuesta por las limitaciones del mismo modelo, ya que como se dijo ha sido imposible lograr la convergencia con la capa modelizada de tipo 3, más adecuada al modelo hidrogeológico real, lo que en realidad implica que la zona libre se modeliza también como confinada, aunque con una transmisividad muy inferior ($440 \text{ m}^2/\text{día}$) por la reducción de espesor considerada (20 metros en el acuífero libre, que está del lado de la seguridad, frente a 100 metros en la zona confinada).

La figura 7 contiene una representación de descensos calculados por el modelo a lo largo del periodo modelizado. La imagen correspondiente al día 540 (18 meses,

correspondiente al final de la 2ª campaña de riego) es la que mostraría los mayores descensos de los dos años simulados.

En la tablas 3 y 4 se muestran los balances acumulados en el primer y segundo año y los balances mensuales. El balance deficitario observado justificaría la evolución descendente de niveles. Una comparación cualitativa del almacenamiento y los descensos de niveles se presenta en la figura 8.

Tabla 3. Balances hídricos en los años 1 y 2.

		Balance acumulado al finalizar el AÑO 1	Balance acumulado al finalizar el AÑO 2
Entradas (hm³)	Recarga	15.6	37.5
	Río	No considerado	
	TOTAL	15.6	37.5
Salidas (hm³)	Bombeos	32.9	65.7
	Manantiales	4.7	9.6
	Río	No considerado	
	TOTAL	37.6	75.3
Variación almacenamiento		-22.0	-37.9

Tabla 4. Balances hídricos mensuales.

		AÑO 1											
		Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12
Entradas (hm³)	Rec.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.451	1.425	4.106	0.555	0.000	4.284	2.786
	Río	No considerado											
	TOTAL	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.451	1.425	4.106	0.555	0.000	4.284	2.786
Salidas (hm³)	B	4.051	4.574	6.077	5.402	5.424	3.376	0.000	0.000	0.000	0.000	1.350	2.614
	M	0.390	0.391	0.391	0.391	0.391	0.393	0.394	0.398	0.399	0.398	0.404	0.406
	Río	No considerado											
	TOTAL	4.441	4.965	6.468	5.793	5.814	3.769	0.394	0.398	0.399	0.398	1.754	3.020
Var. Almac.		-4.4	-5.0	-6.5	-5.8	-5.8	-1.3	1.0	3.7	0.2	-0.4	2.5	-0.2
		AÑO 2											
		Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18	Mes 19	Mes 20	Mes 21	Mes 22	Mes 23	Mes 24
Entradas (hm³)	Rec.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.546	3.027	5.614	6.505	2.158	0.000
	Río	No considerado											
	TOTAL	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.546	3.027	5.614	6.505	2.158	0.000
Salidas (hm³)	B	4.408	4.976	6.612	5.877	5.901	3.673	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.422
	M	0.405	0.403	0.401	0.399	0.396	0.394	0.398	0.399	0.405	0.411	0.411	0.409
	Río	No considerado											
	TOTAL	4.813	5.380	7.013	6.276	6.297	4.067	0.398	0.399	0.405	0.411	0.411	1.831
Var. Almac.		-4.8	-5.4	-7.0	-6.3	-6.3	-4.1	4.1	2.6	5.2	6.1	1.7	-1.8

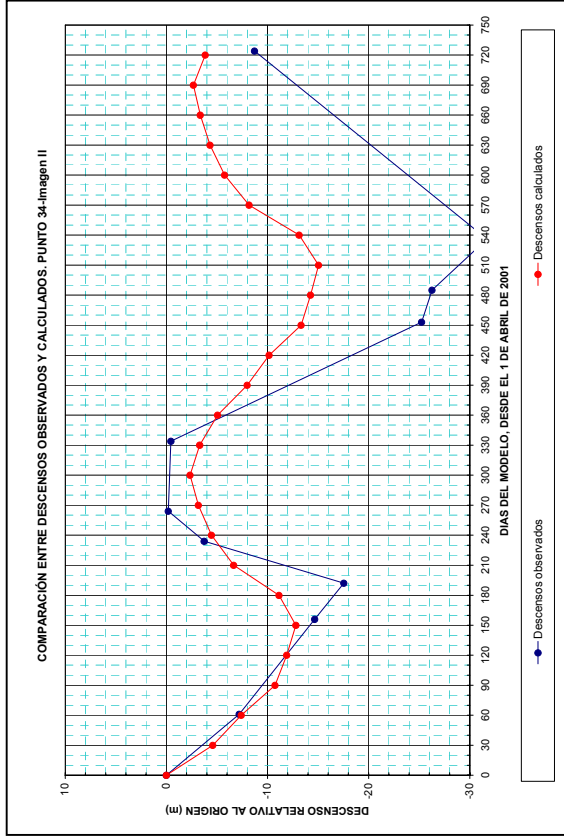
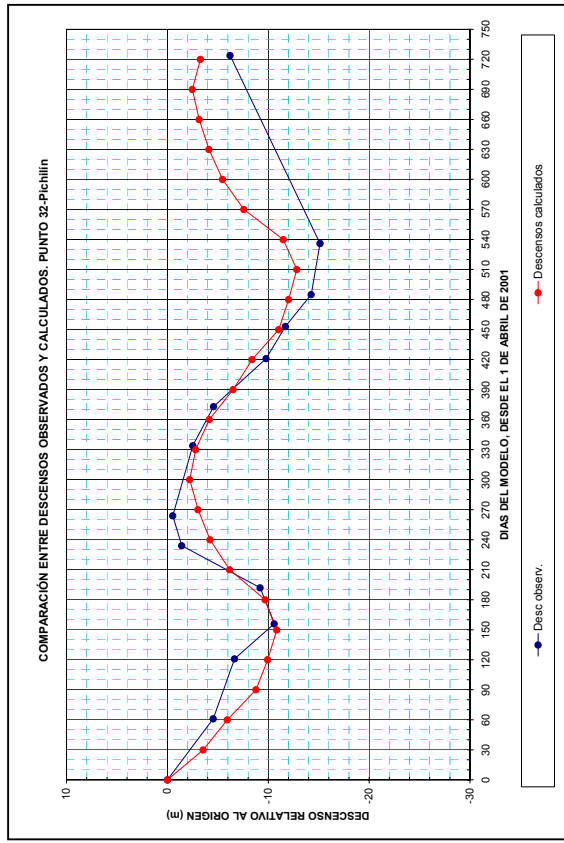
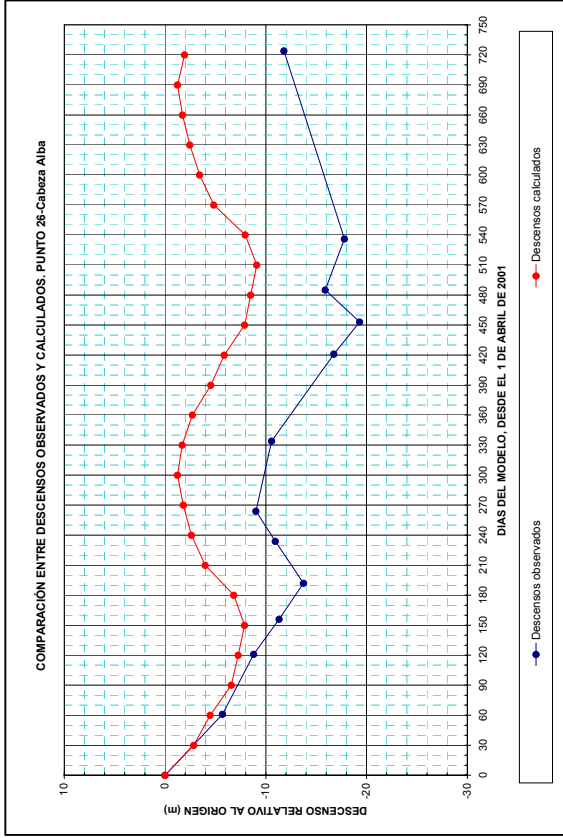
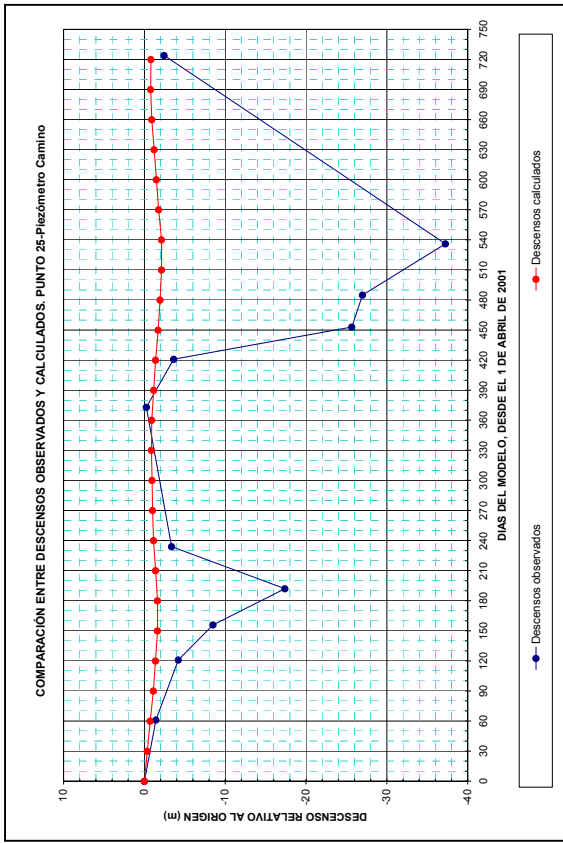


Figura 6. Comparación entre descensos observados y calculados en los dos años del modelo transitorio.

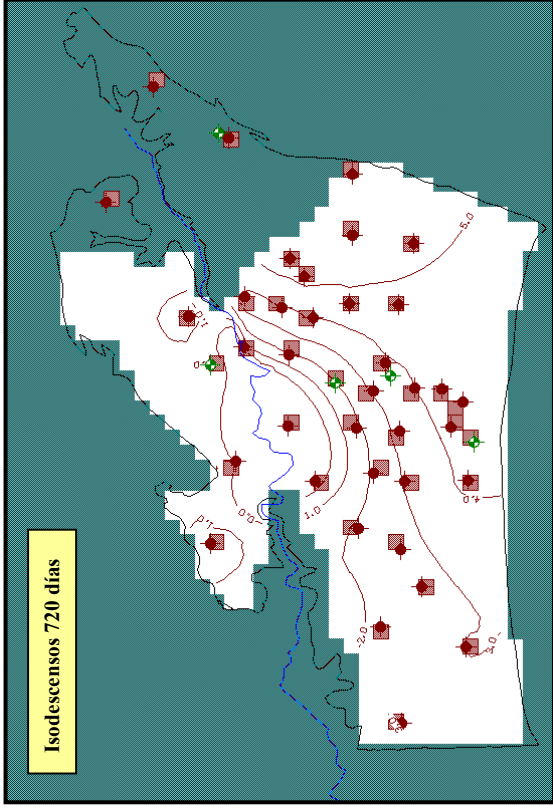
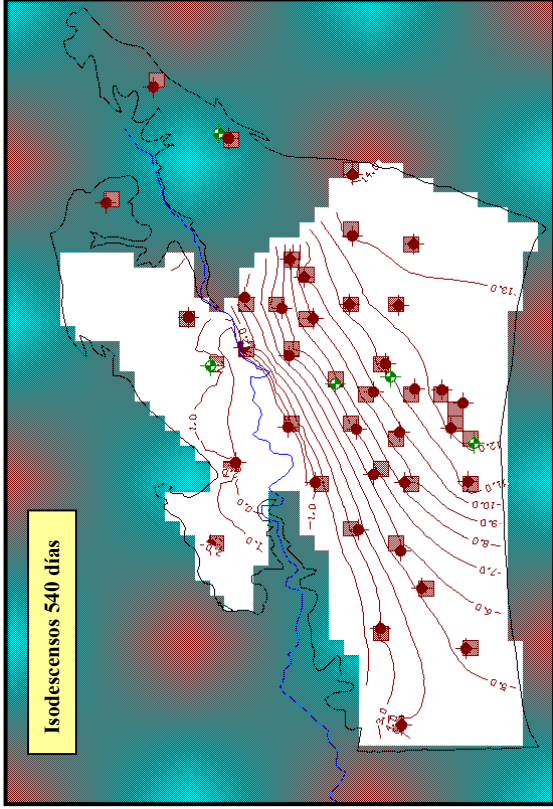
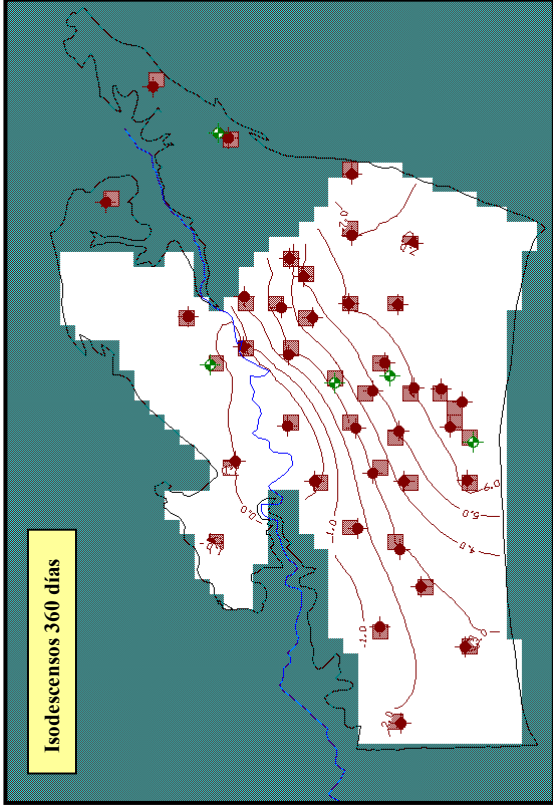
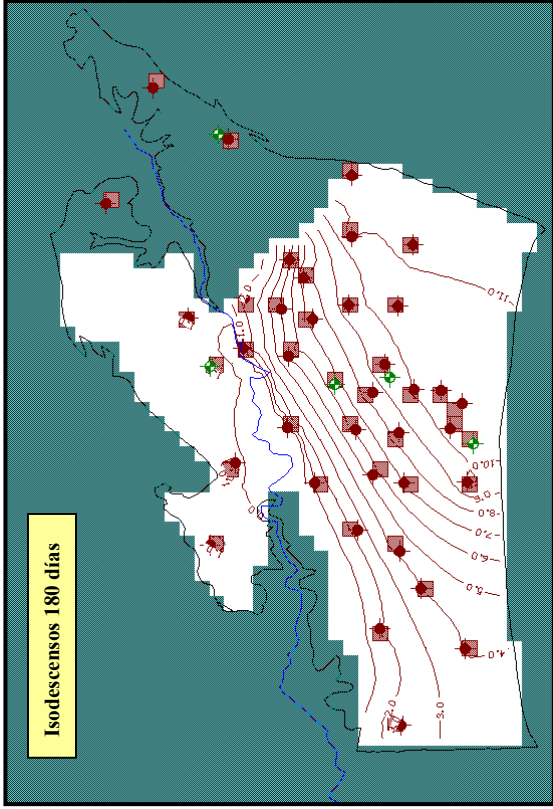


Figura 7. Mapas de isodescensos (en metros) proporcionados por el modelo a los 180, 360, 540 y 720 días.

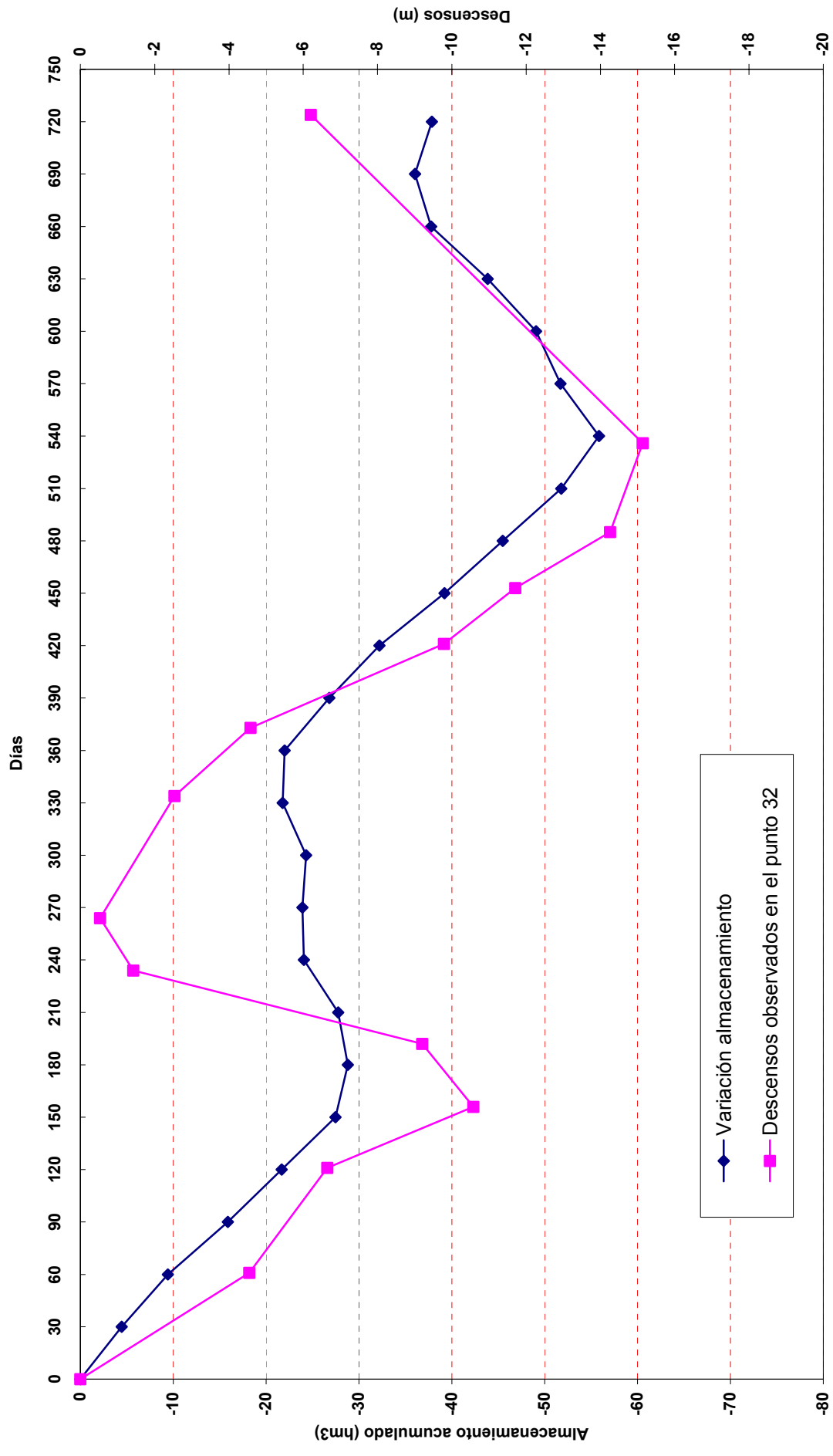


Figura 8. Comparación entre variación del almacenamiento acumulado y descensos observados en el punto 32 (Pichilín).

6.- SIMULACIÓN DE HIPÓTESIS

Simulación 1:

Se ha procedido a simular el sistema durante 10 años introduciendo una serie de recarga próxima a 200 mm/año (equivalente en valor medio a la introducida en régimen estacionario) y la serie de bombeos de 2 años repetidos 5 veces para completar los 10 años. El propósito de esta simulación es observar la tendencia de niveles en el acuífero teniendo en cuenta que no se ha considerado la existencia de río. La problemática que plantea el río en el sistema modelizado se estima que excede a los objetivos inicialmente establecidos para el presente modelo preliminar y, además, una incorporación del mismo debe integrar, entre otros, datos fiables del carácter ganador o perdedor del mismo.

En la figura 9 se muestra la evolución temporal de los descensos a lo largo del periodo simulado con valores máximos hacia el sur de tal manera que en el punto 34 llegan a ser de unos 20 m, a los 9 años y medio. En la tabla 5 se presenta el balance acumulado al finalizar el periodo de simulación y la media anual del mismo.

Tabla 5. Balance hídrico en la simulación 1.

		Balance acumulado resultante al finalizar los 10 años (hm³)	Media anual (hm³/año)
Entradas	Recarga	334.8	33.5
	Río	No considerado	
	TOTAL	334.8	33.5
Salidas	Bombeos	328.7	32.9
	Manantiales	51.9	5.2
	Río	No considerado	
	TOTAL	380.6	38.1
Variación almacenamiento		-45.8	-4.6

Simulación 2:

Esta simulación corresponde a la posibilidad de efectuar una operación de recarga artificial mediante la inyección en 6 sondeos con un volumen anual de 10 hm³ distribuidos por igual en cuatro meses (de noviembre a febrero a razón de 13.889 m³/día ó 161 l/s, por sondeo). En las figuras 1 y 10 se puede observar la localización de los sondeos de inyección considerados. En la tabla 6 se muestra el balance

hídrico obtenido cuya comparación con el de la simulación 1 puede observarse en la tabla 7. Así mismo las figuras 9 y 10 muestran la evolución temporal de los descensos obtenidos y su distribución espacial considerando recarga artificial y sin considerarla. Como puede observarse la coincidencia de las operaciones de recarga artificial en las épocas donde se produce recarga natural provoca una elevación sustancial de los niveles de agua que se traduce en un balance hídrico ligeramente excedentario con la consiguiente tendencia ascendente de niveles.

Tabla 6. Balance hídrico en la simulación 2.

		Balance acumulado resultante al finalizar los 10 años (hm³)	Media anual (hm³/año)
Entradas	Recarga	334.8	33.5
	Inyección	100.0	10.0
	TOTAL	434.8	43.5
Salidas	Bombeos	328.7	32.9
	Manantiales	54.8	5.5
	TOTAL	383.5	38.3
Variación almacenamiento		51.3	5.1

Tabla 7. Balance hídrico medio anual en las simulaciones 1 y 2.

		Media anual (hm³/año)	
		Sim-1	Sim-2
Entradas	Recarga	33.5	
	Inyección	0	10.0
	TOTAL	33.5	43.5
Salidas	Bombeos	32.9	
	Manantiales	5.2	5.5
	TOTAL	38.1	38.3
Variación almacenamiento		-4.6	5.1

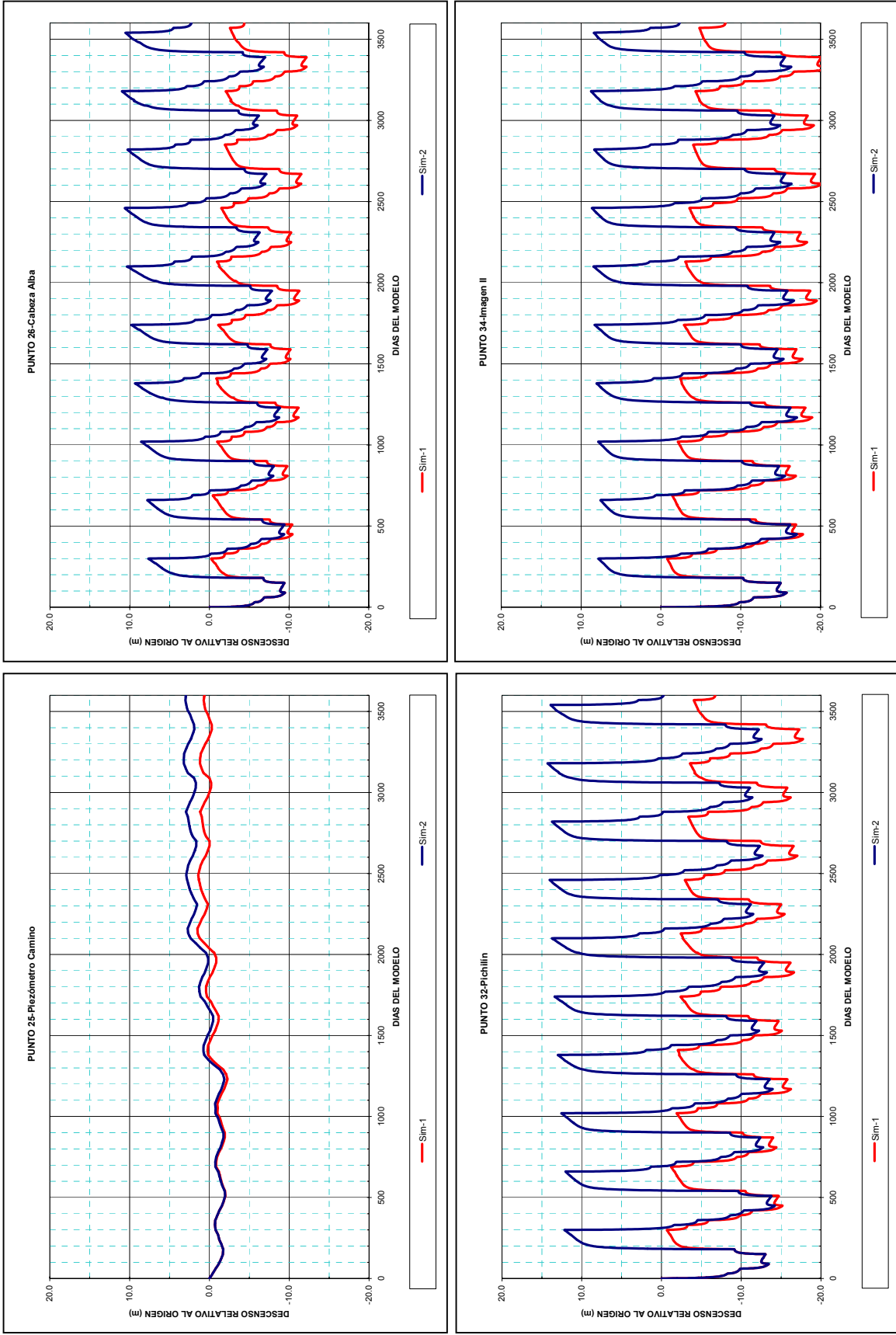


Figura 9. Evolución temporal de descensos en las simulaciones 1 (sin recarga artificial) y 2 (con recarga artificial).

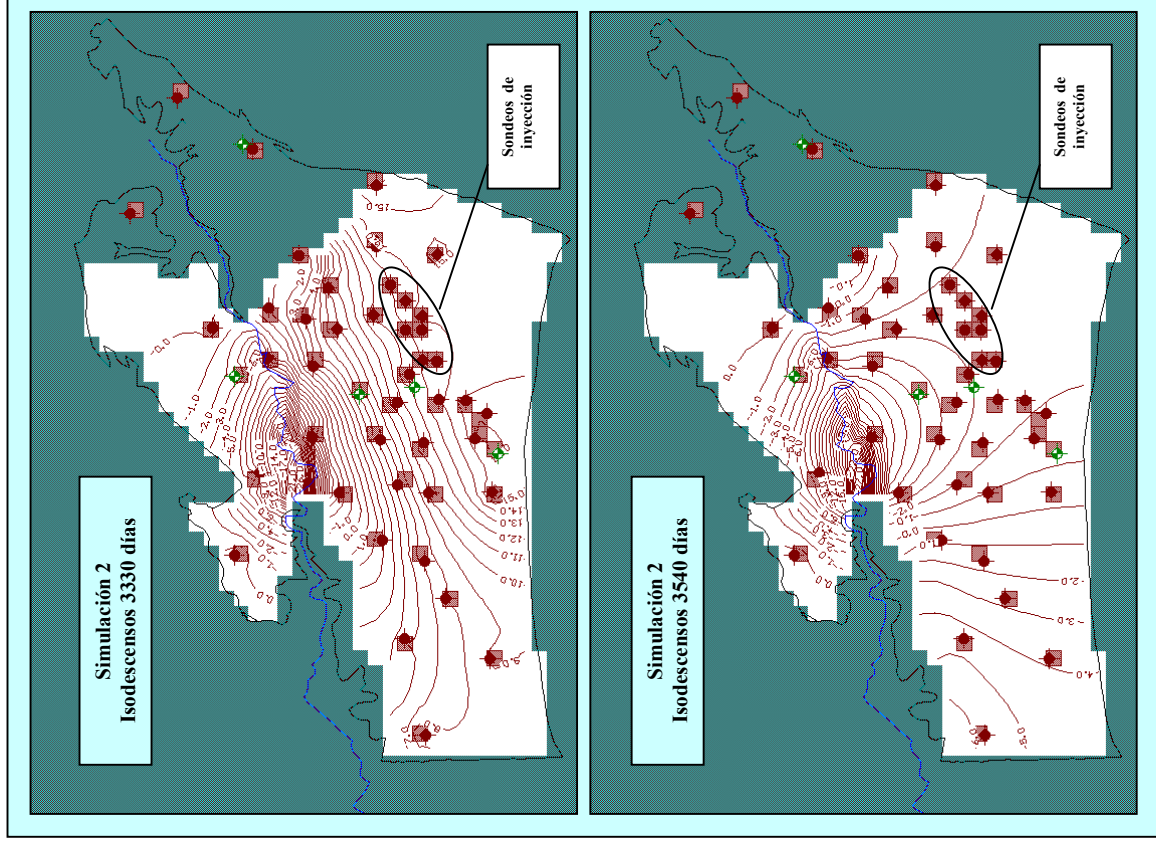
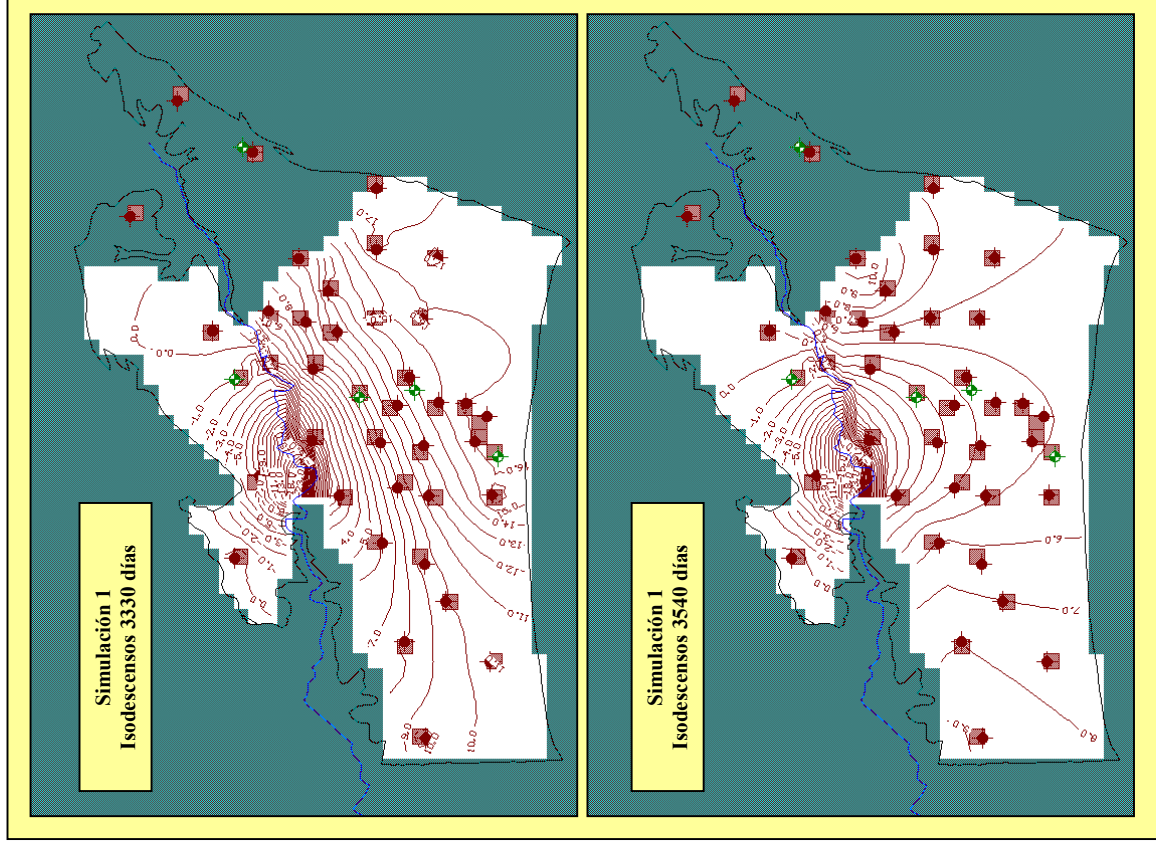


Figura 10. Mapas de isodescensos (en metros) máximos (día 3330) y mínimos (día 3540) correspondientes al último para las simulaciones 1 (sin recarga artificial) y 2 (con recarga artificial de $10 \text{ hm}^3/\text{año}$).

7.- CONCLUSIONES

El modelo realizado se ha centrado en la comprobación de los aspectos más generales de geometría, estudio de los rangos entre los que se pueden variar razonablemente los parámetros, río, drenes, balance hídrico, etc. Se han tratado de identificar los condicionantes del modelo especialmente en la parte confinada del acuífero que es la que soporta la casi totalidad de las extracciones por bombeo.

En régimen estacionario se ha observado que las cotas del río y la conductancia controlan significativamente las cotas piezométricas. En esta situación las cotas en el río y manantiales (junto con sus caudales) han sido los únicos indicios de la piezometría estacionaria (estimada en torno a 400 m s.n.m para la zona confinada), y por tanto referencias para la calibración. El sector libre debe actuar como zona de recarga y tránsito de agua, sin apenas posibilidad de almacenamiento, lo que genera problemas insalvables en su modelización (al menos en esta fase preliminar) al quedar secas numerosas celdas cuando se toma la opción de capa tipo 3 (con T y S variable). La geometría desconocida de esta zona es asimismo una incógnita importante, igual que la existencia de manantiales a distintas cotas (que podrían drenar sectores independientes del acuífero o responder a niveles colgados o a un funcionamiento de tipo multicapa). Teniendo en cuenta estas limitaciones el modelo no puede sino considerarse como un esquema preliminar del funcionamiento del acuífero, que será necesario mejorar en el futuro en cuanto se disponga de datos suficientes, como los proporcionados por los sondeos de reconocimiento previstos a corto plazo en el entorno del río Guadalimar y otras zonas del sistema.

La modelización del ensayo de bombeo ha proporcionado un ajuste muy razonable entre niveles observados y calculados y se ha calibrado con valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento idénticos a los deducidos del ensayo de bombeo, si bien el coeficiente utilizado para el régimen transitorio de 2 y 10 años es dos ordenes de magnitud superior. Ello estaría plenamente justificado al existir una zonación de valores en el acuífero, de manera que en buena lógica dicho coeficiente disminuye sensiblemente de norte a sur, conforme aumenta gradualmente el espesor de materiales impermeables de techo y, por tanto, el grado de confinamiento. La transmisividad obtenida en el modelo ($2.200 \text{ m}^2/\text{día}$) resulta coherente con el mayor de los rangos de los valores experimentales obtenidos, e

incluso podría elevarse hasta 2.800 m²/día (resultado de considerar una permeabilidad de 28 m/día idéntica a la obtenida en el ensayo de bombeo y un espesor de 100 m, ya que el espesor conocido en el lugar del ensayo era de 80 m). A ese respecto el valor considerado finalmente también está del lado de la seguridad, dado el desconocimiento del espesor real del acuífero en la zona confinada.

La calibración del modelo en régimen transitorio se considera razonablemente adecuada en la parte confinada, en términos de evolución de los descensos a lo largo de los dos años simulados, de tal manera que se reproducen las tendencias generales y estacionales. Sólo en la parte libre el ajuste es deficiente, por las diversas razones ya expuestas, pero en la fase actual no vale la pena probar nuevas hipótesis hasta que se disponga de información fiable al respecto. Las incertidumbres existentes relativas a como actúa el río en el sistema y la problemática que se ha observado considerando el mismo en el modelo ha llevado a no considerarlo en las simulaciones efectuadas para analizar las posibilidades de efectuar recarga artificial en la zona.

En definitiva, el modelo preliminar realizado ha cumplido plenamente sus objetivos y permitirá avanzar con mayor fluidez si se acomete un modelo más detallado que deberá basarse en los nuevos datos de sondeos, ensayos de bombeo, evolución piezométrica, etc, al conocerse, al menos, sus principales dificultades. Dichas actuaciones deben emprenderse a corto plazo, si se quiere prever su evolución futura, aclarar las numerosas incógnitas que aún persisten sobre su funcionamiento hidráulico, relación con el río, recarga neta y otros extremos y para tal fin la modelización se muestra como una herramienta imprescindible.

ANEJO 3.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHG.** Bases de datos de Planificación Hidrológica.
- CHG. (2001)** Toma de datos, inventario de puntos de agua para la caracterización y evaluación de recursos de la Unidad Hidrogeológica de la Loma de Úbeda
- DGOH (1994).** Normas de explotación de las unidades hidrogeológicas: 01, 08, 13, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 38, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 53, 60, 61, 62 y 63 en la Cuenca del Guadalquivir. Unidad hidrogeológica 05.23 Úbeda. Memoria y Planos.
- Gollonet y otros (2001)** Los acuíferos de la Loma de Úbeda, reserva estratégica para el desarrollo del olivar. Jornadas sobre presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Linares (Jaén), Octubre de 2001.
- IGME (2002)** Investigación hidrogeológica para establecer las posibilidades de realizar operaciones de recarga artificial en el acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda. Memoria provisional.
- IGME (2004)** Obtención de información para la mejora del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico del acuífero carbonatado de la Loma de Úbeda.
- IGME** Archivo y base de datos de inventario de puntos de agua.
- IGME-CHG (2001)** Propuesta de Normas de Explotación. U.H. 05.23 (Úbeda).
- ITGE (2000)** Estudio hidrogeológico de las Unidades 05.01, 05.02 y 07.07: Sierra de Cazorla, Quesada-Castril y Segura-Cazorla. (Programa P.A.I.H.)

- ITGE-CHG (1993)** Propuesta de Normas de Explotación de la U.H. 05.23 (Úbeda).
- MOPU-IGME (1988)** Estudio 07/88. Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e islas Baleares y síntesis de sus características. Cuenca del Guadalquivir.
- Rey y otros. (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), págs. 213 a 221.