



INFORME	Identificación: H6/003/2011
	Fecha: Mayo 2011
TÍTULO ACTUALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (MALLORCA)	
PROYECTO ACTUACIONES DE USO CONJUNTO Y RECARGA ARTIFICIAL ENCAMINADAS A MEJORAR LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y EL USO SOSTENIBLE DE LOS ACUÍFEROS LIGADOS A LA ARTERIA TRANSVERSAL DE LA ISLA DE MALLORCA. CONVENIO ESPECÍFICO ENTRE EL IGME Y EL GOBIERNO BALEAR	
RESUMEN Se ha elaborado un modelo matemático de flujo del acuífero de Crestatx, actualizando en anterior, que elaboró el IGME en 1996. Para ello, se han utilizado datos generados específicamente para este fin. La actualización más importante se ha centrado en la delimitación del modelo geológico e hidrogeológico de funcionamiento del acuífero, que se ha generado en trabajos previos a la modelización. Sobre el modelo matemático calibrado, se han simulado varias alternativas de recarga artificial en el mismo, cuyos resultados permitirán planificar las futuras operaciones de recarga que se planteen.	
Revisión Nombre: José Antonio de la Orden Unidad: Dep. Investigación y Prospectiva Geocientífica Fecha: Diciembre 2009	Autores: EPTISA Responsable: José Antonio de la Orden José Manuel Murillo Díaz

Este informe ha sido elaborado dentro del Convenio de colaboración suscrito entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Gobierno Balear, para el estudio de las aguas subterráneas en el archipiélago balear cuyo seguimiento administrativo realizan D^a Rosa María Mateos (IGME) y D. Alfredo Barón (Gobierno Balear). El informe se integra dentro del proyecto titulado "ACTUACIONES DE USO CONJUNTO Y RECARGA ARTIFICIAL ENCAMINADAS A MEJORAR LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL Y EL USO SOSTENIBLE DE LOS ACUÍFEROS LIGADOS A LA ARTERIA TRANSVERSAL DE LA ISLA DE MALLORCA". Los trabajos realizados han sido dirigidos por D. José Antonio de la Orden (IGME) y D. José Manuel Murillo Díaz (IGME).

La elaboración del informe ha corrido a cargo de D. Óscar Blasco, de la empresa EPTISA, bajo la forma de asistencia técnica titulada "Asistencia técnica para la modelación matemática del acuífero de Crestatx, en Mallorca" (nº CANOA 46.102.004) dirigida y supervisada por los directores de los trabajos, D. José Antonio de la Orden (IGME) y D. José Manuel Murillo Díaz (IGME).

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
	1.1. ANTECEDENTES	1
	1.2. OBJETIVO	1
2.	DENOMINACIÓN Y JERARQUIZACIÓN DE LAS ENTIDADES HIDROGEOLÓGICAS	2
3.	MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO	3
	3.1. ACUÍFERO DE NAVARRA.....	5
	3.1.1. Definición.....	5
	3.1.2. Carácter de los límites.....	5
	3.1.3. Recarga, descarga y circulación	5
	3.1.4. Explotación.....	6
	3.2. ACUÍFERO DE CRESTATX	6
	3.2.1. Definición.....	6
	3.2.2. Carácter de los límites.....	6
	3.2.3. Recarga, descarga y circulación	7
	3.2.4. Explotación.....	7
4.	MODELO NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO.....	8
	4.1. PLANTEAMIENTO	8
	4.2. PROGRAMA UTILIZADO	11
	4.3. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.....	14
	4.3.1. Mallado superficial.....	14
	4.3.2. Capas	15
	4.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL.....	17
	4.5. UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS CONSIDERADAS	18
	4.6. CONDICIONES DE BORDE	20
	4.7. PARÁMETROS HIDRÁULICOS	21
	4.7.1. Permeabilidad y porosidad/coeficiente de almacenamiento.....	21
	4.7.2. Reactivación de celdas	23
	4.7.3. Niveles iniciales	23

4.8.	ACCIONES SOBRE EL SISTEMA	24
4.8.1.	Infiltración de las precipitaciones	24
4.8.2.	Manantiales	26
4.8.3.	Bombes.....	26
4.8.4.	Transferencias laterales con otros acuíferos o formaciones permeables.....	28
4.9.	CALIBRACIÓN DEL MODELO	30
4.9.1.	Criterio de calibración	30
4.9.2.	Ajuste en régimen permanente	31
4.9.3.	Ajuste en régimen transitorio	33
4.9.4.	Consideración sobre la fiabilidad del modelo numérico para cada uno de los acuíferos de la unidad de Crestatx.....	37
5.	RESULTADOS Y EXPLOTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	38
5.1.	BALANCE HÍDRICO.....	38
5.1.1.	Régimen influenciado.....	38
5.1.2.	Régimen natural (sin bombeo)	41
5.2.	VACIADO DEL ACUÍFERO PRODUCIDO POR LOS BOMBES.....	43
5.2.1.	Cálculo del vaciado inicial del acuífero	43
5.2.2.	Evolución del vaciado del acuífero durante el periodo de ajuste	44
5.3.	INFLUENCIA DE LOS BOMBES EN LA TRANSFERENCIA DE RECURSOS ENTRE EL ACUÍFERO DE CRESTATX Y EL LLANO	44
5.4.	COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO DE CRESTATX ANTE UN EVENTUAL AUMENTO DE EXTRACCIONES.....	45
5.5.	SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECARGA ARTIFICIAL	47
5.5.1.	Antecedentes	48
5.5.2.	Planteamiento inicial para la simulación de la recarga artificial	51
5.5.3.	Simulación de la Alternativa 1.1	52
5.5.4.	Simulación de la Alternativa 1.1 considerando 5 pozos de recarga.....	54
5.5.5.	Simulación de la Alternativa 1.1 considerando 5 pozos de recarga y un caudal máximo de inyección de 10 l/s	55

5.5.6.	Análisis de los resultados de la simulación del escenario de recarga viable.....	57
5.5.7.	Conclusiones	60
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	62

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros hidráulicos ajustados	22
Cuadro 2. Extracciones anuales por pozos	27
Cuadro 3. Coeficientes de reparto mensuales de las extracciones.....	28
Cuadro 4. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen influenciado)	39
Cuadro 5. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen natural).....	42
Cuadro 6. Consecuencias del incremento de extracciones en el acuífero de Crestatx	46
Cuadro 7. Comparación de parámetros hidrogeológicos utilizados	54
Cuadro 8. Comparación de los balances hídricos de Crestatx.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Denominación de entidades hidrogeológicas	2
Figura 2. Piezometría representativa	4
Figura 3. Mallado superficial del modelo.....	15
Figura 4. Discretización vertical del modelo.....	17
Figura 5. Zona activa (en blanco) y celdas inactivas (en verde) del modelo.....	19
Figura 6. Límites abiertos del modelo y acciones sobre el sistema.....	22
Figura 7. Recarga por infiltración de las precipitaciones	25
Figura 8. Extracciones anuales de los pozos de Crestatx	27
Figura 9. Evoluciones del nivel freático adoptadas para los límites abiertos del modelo.....	30
Figura 10. Isopiezas resultantes de la calibración en régimen permanente.....	32
Figura 11. Bloque diagrama con la representación de la piezometría ajustada para el régimen permanente.....	33
Figura 12. Evoluciones piezométricas reales y calculadas de los pozos de explotación de Crestatx (salvo pozo de Son Vila)	34

Figura 13. Correlación entre niveles medidos y calculados de estos pozos en los pozos de explotación de Crestatx (salvo pozo de Son Vila)	35
Figura 14. Histograma de los residuales de la calibración de los niveles de los pozos de explotación de Crestatx (salvo pozo de Son Vila)	36
Figura 15. Evolución piezométrica real y calculada del pozo de Son Vila.....	37
Figura 16. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen influenciado)	40
Figura 17. Evolución mensual de los caudales intercambiados entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Inca-Sa Pobla.....	41
Figura 18. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen natural)	42
Figura 19. Evolución del vaciado del acuífero de Crestatx debido a los bombeos	44
Figura 20. Influencia del bombeo en las descargas del acuífero de Crestatx hacia el Llano de Sa Pobla	45
Figura 21. Evolución del vaciado del acuífero de Crestatx considerando un bombeo adicional del 30%.....	46
Figura 22. Influencia de un bombeo adicional del 30% en las descargas del acuífero de Crestatx hacia el Llano de Sa Pobla.....	47
Figura 23. Localización de los elementos del dispositivo de recarga artificial propuesto.....	49
Figura 24. Escenarios de regulación considerados en el estudio de viabilidad de la recarga artificial.....	51
Figura 25. Simulación de la Alternativa 1.1 (único pozo de recarga con caudal inyectable máximo de 100 l/s.....	53
Figura 26. Simulación de la Alternativa 1.1 con 5 pozos de recarga.....	55
Figura 27. Simulación de la Alternativa 1.1 con 5 pozos de recarga y caudal máximo de inyección individual de 10 l/s	56
Figura 28. Evolución de caudales drenado por la Font de S'UII.....	59
Figura 29. Evolución de los caudales intercambiados entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Palma.....	60

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Govern Balear vienen suscribiendo convenios técnicos de colaboración desde hace más de 10 años, actuando en los mismos el IGME como organismo asesor y experto en materia de aguas subterráneas.

En el Acuerdo Específico de cooperación de los años 2005, 2006, 2007 y 2008 el IGME se incluye la ACTIVIDAD NÚMERO 4 denominada “ACTUALIZACIÓN Y MEJORA DEL MODELO MATEMÁTICO DE FLUJO DEL ACUÍFERO DE CRESTATX MEDIANTE LA EVALUACIÓN Y MODULACIÓN DE SU RECARGA NATURAL A ESCALA DIARIA”, en la que se contempla la realización de las siguientes fases: modelo conceptual, modelo de simulación, proceso de ajuste y proceso de simulación.

La presente Asistencia Técnica, que aborda la realización de las 3 últimas fases del punto 4 del acuerdo específico citado anteriormente, está contemplada en el proyecto titulado “Actuaciones de uso conjunto y recarga artificial encaminadas a mejorar la gestión medioambiental y el uso sostenible de los acuíferos ligados a la arteria transversal de la isla de Mallorca”, aprobado por el Director General del IGME con fecha 13 de enero de 2006 y número de CANOA 46.102.

1.2. OBJETIVO

El objetivo de la presente asistencia técnica es la realización de un modelo matemático de flujo del acuífero de Crestatx, que sirva como herramienta de gestión del mismo. Para la construcción del modelo se utilizarán los datos obtenidos en la primera fase de esta actividad, que se encuentran recogidos en el informe titulado “Establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento del acuífero de Crestatx (Mallorca)”.

Las fases que se han seguido para alcanzar el objetivo del estudio han sido las siguientes:

- Construcción del modelo numérico.
- Ajuste en régimen pseudo-permanente.
- Ajuste en régimen transitorio.
- Simulación del funcionamiento de la unidad en régimen natural.
- Simulación de un incremento de bombeo en el acuífero.
- Simulación de alternativas de recarga.

2. DENOMINACIÓN Y JERARQUIZACIÓN DE LAS ENTIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Durante la realización del informe “Establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento del acuífero de Crestatx (Mallorca)” se puso de evidencia la existencia de un problema de nomenclatura y jerarquización con las que los diferentes organismos oficiales y autores han venido refiriéndose a las *entidades hidrogeológicas* que se han podido establecer al considerar el *acuífero o unidad hidrogeológica* de Crestatx. En ese documento se adoptó la siguiente jerarquización de entidades geológicas e hidrogeológicas:

- El ámbito del estudio, definido por los materiales permeables de carácter carbonatado que se encuentran limitados geográficamente por la carretera MA-2200 que une Sa Pobla y Pollensa al Este, la autopista Palma-Sa Pobla y el torrente de San Miguel, al Sur, y el Camino Viejo de Pollensa al Oeste y Norte, se ha denominado **Unidad Hidrogeológica de Crestatx**.
- Dentro de la Unidad Hidrogeológica de Crestatx se identificaron dos acuíferos con funcionamiento hidrogeológico diferenciado: el **Acuífero de Navarra** y el **Acuífero de Crestatx**.
- Cada uno de los acuíferos identificados están constituidos por materiales permeables pertenecientes a varias **escamas** tectónicas cabalgantes.

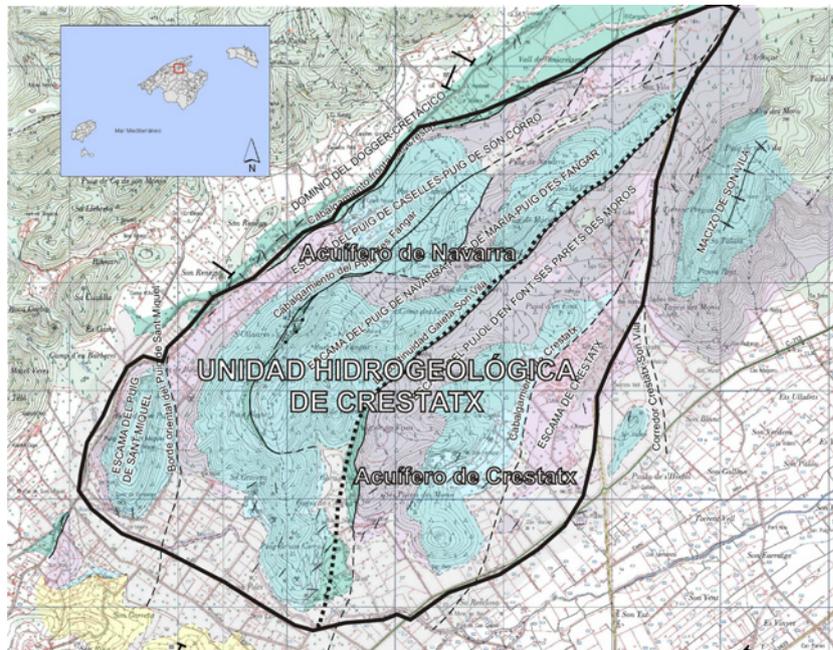


Figura 1. Denominación de entidades hidrogeológicas

En el presente documento se ha adoptado la jerarquización de unidades anteriormente expuesta.

3. MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

La unidad hidrogeológica de Crestatx está constituida por materiales carbonatados de edad triásica y jurásica pertenecientes a una serie de escamas tectónicas cabalgantes con orientación ENE-OSO del borde meridional de la Sierra de Tramuntana, al Norte de la isla de Mallorca.

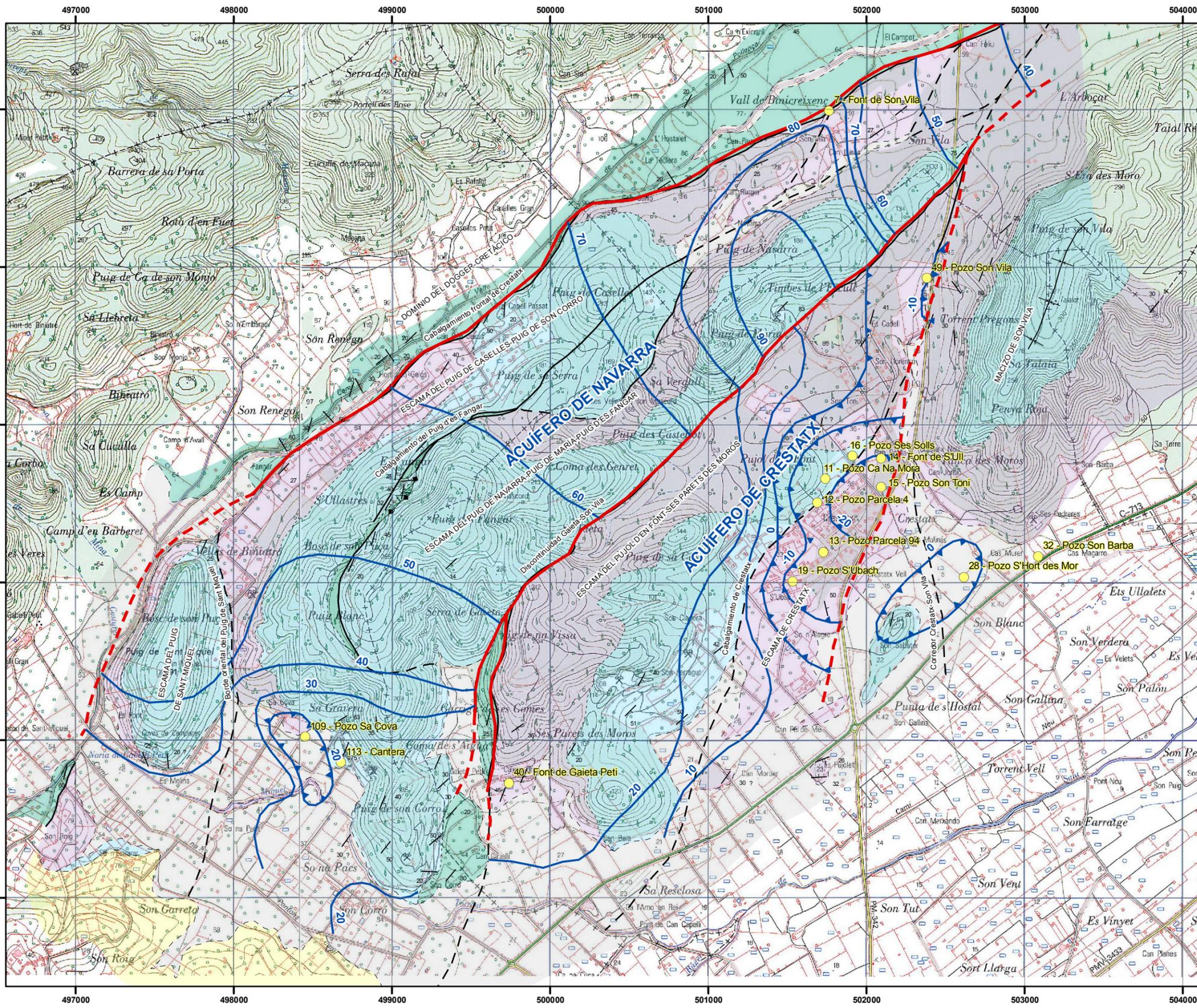
El nivel de despegue de estas escamas es el Keuper, que desde el punto de vista hidrogeológico puede considerarse impermeable. El techo de las escamas puede llegar a estar constituido por materiales margosos del Dogger-Cretácico inferior, de baja permeabilidad. Por tanto, es el núcleo de las escamas el que está constituido por las dolomías tableadas y carniolas del Triásico-Lias y las calizas y dolomías del Dogger-Lías. Estos materiales carbonatados han sufrido procesos de karstificación y constituyen los niveles permeables de la unidad.

La presencia de los materiales poco permeables del Keuper o del Cretácico entre las escamas provoca la compartimentación de la unidad en acuíferos de funcionamiento aparentemente independiente, aunque la desconexión entre los mismos no tiene porqué ser total. El grado de desconexión variará en función de si los materiales impermeables afloran, subafloran o se encuentran a mayor profundidad, pudiendo esta circunstancia variar a lo largo del frente de contacto entre las escamas.

La conexión o desconexión hidráulica entre estas escamas no puede establecerse, con carácter general, mediante criterios cartográficos de superficie. De hecho, no se ha observado el afloramiento de Keuper en toda la zona de estudio, lo que no quiere decir que no se encuentre subaflorante.

Únicamente atendiendo a la interpretación piezométrica, que es la que en definitiva determina los diferentes sistemas de flujo presentes, de los datos tanto históricos como actuales, cabe realizar una interpretación de los acuíferos presentes en la zona así como de las escamas cabalgantes que los componen.

En la Figura 2 se representa una interpretación de la situación piezométrica general de la unidad de Crestatx en la actualidad. Para la realización de este mapa de isopiezas se han tenido en cuenta tanto los datos de nivel de agua como la existencia de una serie de barreras impermeables que deben, por una parte, limitar externamente la extensión de la unidad de Crestatx y, por otra, independizar dentro de la misma un par de acuíferos con funcionamiento diferenciado. Estos acuíferos se han denominado Navarra y Crestatx. A continuación se describirá el modelo conceptual de funcionamiento de ambos acuíferos.



LEYENDA

PERMEABILIDAD = PA: alta, Pm: media, PB: baja a muy baja.

Pm	7	Depósitos Cuaternarios : Cantos, limos.
PA	6	Plioceno : Conglomerados/calcarenitas.
Pm	5	
PA	4	Mioceno : Calcarenitas.
PB	3	CRETÁCICO inferior -Dogger (Jurásico) : Margas.
PA	2	Dogger - Lias : Calizas, dolomías.
Pm	1	Triásico - Lias : Dolomías tableadas, carníolas, margas y arcillas.
PB	1K	Triásico (Keuper): Arcillas rojas, yesos.

————— Contacto concordante.
 - - - - - Contacto discordante.
 ——— Cabalgamiento / falla (generalmente, buzante al S. o E.)
 - - - Cabalgamiento / falla (generalmente, buzante al S. o E.) posible u oculto.
 ——— Estratificación.
 ▲▲▲▲▲ Inclinación de plano de cabalgamiento.
 ◆◆◆◆◆ Plano de cabalgamiento / falla Subvertical.
 ——— Area sinclinal

● Puntos de agua significativos
 ——— Borde impermeable
 - - - Borde impermeable supuesto
 ——— Isopieza
 ——— Isopieza cerrada

DESARROLLO DE LA ACTIVIDAD CUATRO DEL CONVENIO ESPECÍFICO ENTRE EL IGME Y EL GOBIERNO BALEAR SOBRE INVESTIGACIÓN EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (MALLORCA)

Figura 2. Isopiezas representativas

Marzo 2009 Escala 1:25.000
0 0,25 0,5 km

3.1. ACUÍFERO DE NAVARRA

3.1.1. Definición

Ocupa una franja de unos 2 km de anchura media y 10 km de longitud orientada ENE-OSO al Norte de la unidad.

Geológicamente está constituido por las escamas del Puig de Sant Miquel, del Puig de Caselles-Puig de Son Corro y del Puig de Navarra-Puig de María-Puig des Fangar.

3.1.2. Carácter de los límites

Presenta límites hidráulicamente cerrados en sus 2 bordes alargados: al NNO, siguiendo el Camino Viejo de Pollensa, por el contacto del frente de cabalgamiento de la escama del Puig de Caselles-Puig de Son Corro con las margas cretácicas de baja permeabilidad del Cretácico inferior; al SSE, por el afloramiento de una franja de margas cretácicas al S del Puig des Fangar y el subafloramiento de estos materiales o los impermeables del Keuper en el resto del contacto entre este acuífero y el de Crestatx (la desconexión entre los acuíferos en esta zona se ha deducido a partir del salto piezométrico existente entre ambos).

Es evidente que en los frentes de cabalgamiento “internos” de este acuífero (los que separan las diferentes escamas que lo componen) también existirá Keuper inyectado o Cretácico margoso laminado, pero no parece que alcancen una cota suficiente como para provocar desconexiones hidráulicas con la situación actual del nivel freático.

En el extremo nororiental del acuífero el límite es abierto, al continuar los materiales carbonatados permeables en esa dirección.

En el extremo suroccidental del acuífero el límite también es abierto, al sumergirse los materiales carbonatados permeables bajo los materiales detríticos cuaternarios de la Plana de Sa Pobla, en la zona del torrente de Sant Miquel.

En profundidad, los materiales permeables de las escamas que constituyen el acuífero se encuentran limitados por el Keuper impermeable. Según la información proporcionada por la investigación geofísica (Gelabert, 2006), la cota del techo del Keuper que constituiría el muro impermeable de este acuífero descendería gradualmente desde los 175 m.b.n.m. al Norte hasta los 800 m.b.n.m. al Sur, según un buzamiento orientado hacia el SSE.

3.1.3. Recarga, descarga y circulación

La recarga de este acuífero se produce por infiltración de las precipitaciones en los afloramientos de los materiales permeables, que presentan una topografía muy abrupta.

A partir de la piezometría se deduce la existencia de una divisoria piezométrica en torno al Puig de Navarra, con un nivel máximo en torno a los 100 m.s.n.m. Al Norte de esta divisoria la circulación del agua se realiza hacia el NE, alcanzando unos valores mínimos de unos 40 m.s.n.m. En la porción más importante de esta subunidad, al Sur de la divisoria, el agua subterránea circula hacia el Sur, en dirección al Llano de Sa Pobla y por debajo del torrente de Sant Miquel, que se encuentra colgado con respecto al nivel freático. Los niveles más bajos son del orden de unos 20 m.s.n.m. bajo el torrente, cuyo cauce se sitúa, en esa zona, entre los 40 y 35 m.s.n.m. Al Norte del torrente se aprecia una zona pequeña con el nivel por debajo de los 20 m.s.n.m. (mín. de 12 m.s.n.m.), que corresponde a un pequeño cono de bombeo.

En definitiva, la descarga del acuífero se produce, fundamentalmente, mediante aportes laterales hacia el Llano de Sa Pobla, al Sur, y hacia la continuación de las escamas que lo componen hacia el NE. También existen salidas, de menor entidad, a través de manantiales de escaso caudal en el frente de cabalgamiento del acuífero, al Norte, y en la zona de Gaieta, al Sur, que pueden responder a descargas de niveles colgados o pequeños compartimentos.

3.1.4. Explotación

La explotación de este acuífero se centra en los alrededores de la zona de Sa Cova, utilizándose para el abastecimiento de Campanet (0.26 hm³/a según la Documentación Básica del Plan Hidrológico en elaboración). La explotación no ha modificado sustancialmente el funcionamiento natural del acuífero.

3.2. ACUÍFERO DE CRESTATX

3.2.1. Definición

En superficie el acuífero de Crestatx presenta una forma de cuña apuntada hacia el Norte, en la zona de Son Vila. Desde este vértice el acuífero se extiende hacia el Sur hasta una longitud aproximada de 6-7 km y una anchura media de 2 km.

Está constituido por las escamas del Pujol d'en Font-Ses Parets des Moros y la de Crestatx.

3.2.2. Carácter de los límites

Los dos lados principales de la cuña que representa al acuífero son cerrados. Al Oeste se encontraría desconectado hidráulicamente del acuífero de Navarra por el afloramiento de materiales margosos del Cretácico y el subafloramiento del Keuper en el frente de cabalgamiento de la escama del Pujol d'en Font-Ses Parets des Moros sobre la del Puig de Navarra-Puig de María-Puig des Fangar, tal como se comentó anteriormente. Al Este, la desconexión del acuífero de Crestatx con el acuífero de Son Barba-S'Hort des Moro se produce por el subafloramiento de los materiales impermeables del Keuper en el frente de cabalgamiento de la escama del Puig de Son Vila sobre la de Crestatx.

En el interior del acuífero los materiales del Keuper inyectados entre las dos escamas que lo componen no parece que alcancen cota suficiente como para independizarlas hidráulicamente. Esta misma interpretación parece corresponder al borde sur y sureste de este acuífero, que corresponde al contacto del mismo con el Llano de Inca-Sa Pobla.

3.2.3. Recarga, descarga y circulación

La recarga de este acuífero se produce por infiltración de las precipitaciones en los afloramientos de los materiales permeables. La topografía de este acuífero es bastante menos abrupta que la del de Navarra, por lo que la generación de escorrentía subterránea será mayor.

El esquema de circulación del agua subterránea en este acuífero se encuentra totalmente influenciado por la existencia de una depresión de bombeo producida por las extracciones de ACASA para abastecimiento. Esta depresión se encuentra adosada al borde oriental del acuífero, y presenta dos centros relativos con niveles freáticos por debajo del nivel del mar: el principal, correspondiente a los bombeos en la zona de Crestatx, y otro menor, al Norte, correspondientes a las extracciones de la zona de Son Vila-Es Cadell.

En la situación actual, y según la disposición de la superficie freática, otra parte del acuífero se descarga hacia el Llano de Sa Pobla, al Sur y SE, a una cota en torno a los 10 m.s.n.m.

Previamente al comienzo de la explotación intensiva de este acuífero, la circulación de las aguas subterráneas era sensiblemente diferente. La descarga natural visible se producía por manantiales de borde en la zona de Crestax, cerca de la carretera (Font de S'Ull), a una cota en torno a los 30 m.s.n.m. Asociadas a esta surgencia se encuentran las galerías drenantes que en la actualidad se encuentran secas, en la zona karstificada de Crestatx. Asimismo, con el nivel freático en el interior del acuífero a cotas más altas que en la actualidad, la descarga hacia el Llano de Sa Pobla sería mayor.

3.2.4. Explotación

Los pozos de abastecimiento de ACASA bombean del acuífero de Crestatx en torno a 1-1.5 hm³/a.

4. MODELO NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO

4.1. PLANTEAMIENTO

El establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de una zona constituye la integración de todas las ideas y datos obtenidos a partir de las actividades realizadas a lo largo de un estudio hidrogeológico. Desde el punto de vista de un estudio convencional que pretendiese conocer el esquema de circulación de las aguas subterráneas en una zona determinada, los pasos a seguir serían, de una forma sucesiva, los siguientes:

- El establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento a partir de un amplio y profundo conocimiento de la totalidad de los aspectos que influyen en el comportamiento del acuífero.
- La obtención del balance hídrico de la unidad.
- La realización de un modelo numérico de flujo que reprodujese y comprobase el modelo conceptual de funcionamiento.

Desde un punto de vista general, el movimiento del agua en un acuífero depende de las características intrínsecas de los distintos materiales geológicos que lo constituyen (geometría, permeabilidad, porosidad, coeficiente de almacenamiento, etc.) y de la influencia de una serie de factores que se pueden considerar externos al mismo (recarga, drenajes, extracciones, etc). Un modelo de flujo de aguas subterráneas es la representación de un acuífero real, del que se puede obtener una predicción de la distribución de la piezometría a partir de la definición y cuantificación de los factores internos y externos que regulan su comportamiento. El modelo también obtiene como resultado un balance hídrico en el que quedan reflejados los volúmenes de agua correspondientes a los distintos tipos de flujos de entrada y de salida.

La realización del estudio para establecer el modelo conceptual de funcionamiento de la unidad hidrogeológica de Crestatx, de la que el modelo numérico realizado no es sino su plasmación cuantitativa, ha supuesto un avance significativo respecto al grado de conocimiento que sobre la unidad de Crestatx existía previamente. A pesar de esta mejora en el grado de conocimiento, persisten ciertas incertidumbres sobre algunos aspectos hidrogeológicos de la unidad.

De forma resumida, las certidumbres e incertidumbres con las que se ha afrontado el modelado de la unidad de Crestatx son las siguientes:

- La definición geométrica de los materiales geológicos que constituyen la unidad ha quedado razonablemente establecida a nivel superficial. Las líneas generales de la estructura geológica en profundidad están definidas, aunque a escala de detalle persisten incertidumbres. En cualquier caso, estas incertidumbres no afectan a lo esencial del funcionamiento hidrogeológico establecido para la unidad.

- En este sentido, dentro de la Unidad de Crestatx se han identificado dos acuíferos, el de Crestatx y el de Navarra, con funcionamiento hidrogeológico independiente, al menos para las cotas de nivel freático medidas hasta el momento. Dentro de cada acuífero existen compartimentos que no parecen estar desconectados entre sí, al situarse el nivel freático por encima de las barreras impermeables subverticales que los separan.
- La unidad hidrogeológica de Crestatx esta constituida, básicamente, por materiales carbonatados sometido a procesos de fisuración y, sobre todo, karstificación. La karstificación del macizo tendrá como consecuencia una gran heterogeneidad en la distribución de los parámetros hidrogeológicos del mismo. Los datos de transmisividad, permeabilidad, porosidad y coeficiente de almacenamiento proporcionados por los escasos ensayos de bombeo efectuados en la unidad no permiten establecer una distribución espacial de estos parámetros; en todo caso, confirman la hipótesis de la elevada heterogeneidad de los materiales permeables.
- Ninguna de las estimaciones de la recarga de la unidad de Crestatx realizadas hasta el momento tiene la suficiente fiabilidad como para considerar sus valores como datos de partida no susceptibles de ajuste con el modelo que ahora se ha realizado.
- El principal mecanismo de descarga de los acuíferos de Crestatx y Navarra, en régimen natural, serían las transferencias laterales hacia la Plana de Inca-Sa Pobla, al Sur. En el caso del acuífero de Navarra, los bombeos que se producen al Sur del mismo no han tenido entidad suficiente para provocar la inversión de este flujo, mientras que en caso del acuífero de Crestatx la magnitud de los bombeos ha sido del mismo orden de magnitud que la recarga, por lo que en determinados años ha debido producirse inversión de flujo.
- Para el acuífero de Crestatx existe un control razonable de los pozos utilizados para abastecimiento urbano que constituyen la explotación principal de las aguas subterráneas. Este control ha contemplado tanto los volúmenes extraídos como los niveles de agua en los pozos a lo largo del tiempo. Desgraciadamente, los pozos se concentran en una zona concreta del acuífero, no existiendo el mismo grado de control piezométrico en otros puntos del acuífero no relacionados directamente con la zona de extracción de Crestatx.
- La información objetiva relacionada con la transferencia de recursos hídricos entre los acuíferos de Crestatx y Navarra con la Plana de Inca-Sa Pobla se reduce a un par de series de evolución del nivel de agua en sendos piezómetros situados en la zona de conexión entre los acuíferos carbonatados y la plana detrítica.
- Únicamente se dispone de información sobre la calidad química de las aguas subterráneas en los pozos de explotación de la zona de Crestatx. Los datos históricos proporcionados por estos pozos no muestran aumentos de salinidad o contenidos en nitratos que pudieran haber

sido provocados por la inversión de flujo natural entre el acuífero de Crestatx y la Plana de Inca-Sa Pobra debido al bombeo. No obstante, no se dispone de datos al respecto en la zona de contacto entre el acuífero de Crestatx y la Plana debido a la inexistencia de puntos de control hidroquímico.

- No se dispone de series históricas de caudales drenados por el manantial de la Font de S'Ull, principal descarga visible del acuífero de Crestatx que fue desactivada por el descenso del nivel freático provocado por la explotación del acuífero.

Partiendo de esta serie de condicionantes sobre el grado de conocimiento del sistema, el modelo numérico de flujo realizado en el marco del presente proyecto ha tenido, en primer lugar, un carácter interpretativo. En este sentido, ha pretendido mejorar el conocimiento de los parámetros y factores que controlan el movimiento del agua subterránea en esta unidad, al establecer un marco de referencia donde integrar y organizar los datos de campo y permitir, así, formular y contrastar hipótesis sobre los aspectos menos conocidos de la dinámica del sistema.

Una vez conseguido que el modelo reprodujera, lo más fielmente posible, el funcionamiento real del acuífero, se obtuvo una mejor definición, cualitativa y cuantitativa, de aquellos factores menos conocidos a priori, habiéndose simulado posteriormente el funcionamiento del acuífero ante situaciones hipotéticas.

De forma resumida, los objetivos que se han ido consiguiendo de forma sucesiva mediante el modelado numérico han sido los siguientes:

OBJETIVOS	ACTIVIDAD
Interpretación del funcionamiento hidrogeológico de la Unidad	Ajuste en régimen permanente
Reproducción de las series históricas de evolución de los piezómetros. Simulación de la evolución histórica del acuífero en régimen influenciado (considerando bombeos): <ul style="list-style-type: none"> • Balance hídrico • Obtención de la serie de caudales intercambiados entre el acuífero de Crestatx y la plana de Inca-Sa Pobra. • Evolución del almacenamiento en el acuífero. 	Ajuste en régimen transitorio

OBJETIVOS	ACTIVIDAD
Predicción de la evolución del acuífero en régimen natural (sin considerar bombeos): <ul style="list-style-type: none"> • Balance hídrico • Establecimiento del efecto de los bombeos sobre el intercambio de recursos entre el acuífero de Crestatx y la plana de Inca-Sa Pobla. • Establecimiento de la evolución del vaciado del acuífero provocado por los bombeos. 	Explotación del modelo
Predicción de los efectos de un aumento de las extracciones en el acuífero: <ul style="list-style-type: none"> • Balance hídrico. • Evaluación de los efectos de las extracciones adicionales sobre el vaciado del acuífero y el intercambio de recursos con la Plana. 	Explotación del modelo
Análisis de la efectividad y viabilidad técnica de una serie de escenarios de recarga.	Explotación del modelo

4.2. PROGRAMA UTILIZADO

Para la realización del modelo numérico de flujo de la zona de estudio se ha utilizado el paquete informático Visual MODFLOW.

Visual MODFLOW es el sistema de modelización más completo y fácil de usar para aplicaciones prácticas de flujo tridimensional de aguas subterráneas y para simulaciones de transporte de contaminantes. Este paquete informático, totalmente integrado, combina los siguientes modelos:

- MODFLOW, del United States Geological Survey (USGS), documentado en la publicación "A Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model" de Michael G. McDonald y Arlen W. Harbaugh, como modelo general de flujo.
- MODPATH, también del USGS, documentado en la publicación "Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S.G.S. modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model" de David W. Pollock, como programa para el cálculo de trayectoria de partículas.
- MT3D, de la United States Environmental Protection Agency (USEPA), documentado en la publicación "A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems" de C. Zheng, como modelo de transporte de contaminantes.

La estructura de menús de Visual MODFLOW permite establecer las dimensiones del dominio del modelo y seleccionar las unidades a emplear, asignar las propiedades del modelo y las condiciones

de borde, ejecutar las simulaciones (MODFLOW, MODPATH y MT3D), calibrar el modelo, y visualizar los resultados mediante líneas de contornos o sombreados a todo color. El mallado del modelo, los parámetros de entrada y los resultados pueden observarse en perfil o en planta en cualquier momento durante el desarrollo del modelo o mientras se analizan los resultados.

La primera versión de Visual MODFLOW data del año 1994, y ha llegado a convertirse en el sistema de modelización estándar para más de 2000 usuarios entre empresas consultoras, instituciones educativas y organismos oficiales de todo el mundo. En EE.UU. es usado por el United States Geological Survey (USGS) y por la United States Environmental Protection Agency (USEPA), y está siendo evaluado por la National Rivers Authority de Inglaterra como el modelo estándar para los estudios de perímetros de protección de pozos. Además, existen numerosos cursos sobre aguas subterráneas que utilizan Visual MODFLOW como un instrumento docente más.

MODFLOW es capaz de representar el flujo del agua subterránea en una, dos o tres dimensiones, en acuíferos mono o multicapa, con funcionamiento confinado o libre, y bajo condiciones permanentes o transitorias.

MODFLOW está constituido por un programa principal y una serie de subrutinas independientes llamadas módulos. Los módulos están agrupados en paquetes. Cada paquete está relacionado con una característica específica del sistema hidrológico que va a ser simulado, como por ejemplo:

- relación río-acuífero
- manantiales
- pozos

o bien con el método específico de solución de las ecuaciones lineales que describen el sistema de flujo.

El flujo del agua subterránea dentro del acuífero es simulado mediante una aproximación en diferencias finitas. Las capas que constituyen el modelo puede tener un comportamiento confinado, no confinado o una combinación de ambos. Se puede simular el flujo asociado con factores externos al modelo, tales como pozos, recarga superficial, evapotranspiración, drenajes y ríos. Para la resolución del sistema de ecuaciones en diferencias finitas se puede elegir entre varios métodos iterativos.

Con el fin de obtener una solución numérica para la ecuación del flujo del agua subterránea, se divide el acuífero en elementos discretos mediante la superposición de un mallado tridimensional que establece un conjunto de celdas prismáticas rectangulares, equidimensionales o no, organizadas en filas, columnas y capas. Cada celda representa un prisma cuyas características hidrogeológicas son constantes en todo su volumen.

En el dominio del modelo se pueden definir los siguientes tipos de celdas:

- Celdas de nivel constante: el nivel en estas celdas es fijado previamente a la simulación, y el valor especificado es mantenido fijo a lo largo del período de simulación.
- Celdas inactivas: no se produce flujo de agua desde o hacia estas celdas.
- Celdas de nivel variable: en ellas el nivel varía libremente durante la simulación.

Durante la conceptualización física de un acuífero, los distintos tipos de celdas se utilizan para representar diferentes condiciones hidrogeológicas. Así, por ejemplo, en acuíferos con forma irregular las celdas inactivas se utilizan para definir los límites impermeables del mismo, mientras que las celdas de nivel constante pueden representar zonas en las que el acuífero está en contacto directo con lagos o embalses.

El tiempo durante el que se realiza la simulación es dividido en una serie de períodos, dentro de los cuales los parámetros de los agentes externos que actúan sobre el modelo permanecen constantes. A su vez, cada período está dividido en una serie de intervalos. El sistema de ecuaciones en diferencias finitas que gobierna el movimiento del agua en el modelo es formulado y resuelto para obtener el nivel del agua en el centro de cada celda al final de cada intervalo. La solución del sistema de ecuaciones para cada intervalo de tiempo se realiza mediante cualquiera de los sistemas iterativos que están a disposición del usuario.

Para una correcta definición del funcionamiento hídrico del acuífero, se puede especificar tres tipos de capas en cuanto a su comportamiento:

- Capa confinada: el agua que rellena los poros de la parte superior de la capa está sometida a mayor presión que la atmosférica (Acuíferos situados entre dos niveles poco permeables totalmente saturados).
- Capa libre: la lámina de agua está sometida a la presión atmosférica (Acuíferos superficiales, o profundos desaturados).
- Capa confinada/libre: a lo largo de la simulación, la capa puede variar su comportamiento.

Para cada una de las celdas en que se ha discretizado el acuífero, se pueden definir las siguientes propiedades intrínsecas:

- Permeabilidad horizontal (isótropa o anisótropa)
- Permeabilidad vertical
- Porosidad
- Coeficiente de almacenamiento
- Nivel de agua inicial

Este modelo permite que celdas que se han inactivado, al descender el nivel del agua por debajo del fondo de las mismas durante el desarrollo de la simulación, sean reactivadas automáticamente cuando en las celdas vecinas el nivel del agua supera un umbral fijado de antemano.

La simulación del comportamiento de un acuífero puede realizarse bajo dos tipos de condiciones de funcionamiento:

Régimen permanente

Representación de la situación del acuífero cuando se considera que tanto los distintos factores externos como las características propias de los mismos permanecen constantes durante la simulación. Por tanto, se ha alcanzado una situación de equilibrio dinámico en el que no se produce variación de la piezometría a lo largo del tiempo.

Régimen transitorio

A partir de una distribución de la piezometría inicial en el acuífero, y de la consideración de una serie de factores externos cuya actuación y características pueden variar a lo largo del tiempo, se obtiene la distribución y evolución de la piezometría para cada uno de los intervalos temporales en que se haya dividido el período simulado.

Por su parte, MODPATH es un programa que utiliza la información generada por MODFLOW para calcular la trayectoria tridimensional de las partículas de agua.

A partir de los niveles resultantes en un ajuste en régimen permanente o transitorio, el flujo entre las celdas y la porosidad, se obtiene el movimiento de las partículas a través del sistema de flujo.

Además, especificando la localización de una partícula, MODPATH puede calcular su situación posterior o previa para cualquier período de tiempo, pudiendo determinar así, por ejemplo, el área de recarga de un pozo de abastecimiento para establecer su perímetro de protección.

4.3. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

Con el fin de obtener una solución numérica de la ecuación de flujo del agua subterránea, se ha dividido el acuífero en elementos discretos, consiguiéndose un mallado en el que cada celda representa un prisma cuyas características hidrogeológicas son constantes en todo su volumen.

La consideración de las tres dimensiones del espacio supone que la discretización espacial necesaria para la realización del modelo ha de realizarse, horizontalmente, en filas y columnas, y, verticalmente, en capas.

4.3.1. Mallado superficial

Para cubrir superficialmente la zona de estudio se considerado una extensión rectangular, con sus lados orientados según paralelos y meridianos geográficos. Este rectángulo se extiende entre unas

longitudes de 496500 y 503000 y unas latitudes de 4403500 y 4409500, expresadas ambas en coordenadas UTM según datum ED-50 y huso 31. Por tanto, la extensión superficial de la zona modelada es de 6500 m según el eje X y 6000 m según el eje Y, lo que supone un área de 39 km².

La superficie de la zona modelada se ha discretizado en celdas cuadradas de 100 m de lado, por lo que el modelo consta de 65 columnas y 60 filas.

La extensión superficial del modelo, así como el mallado del mismo, se muestra en la Figura 3.

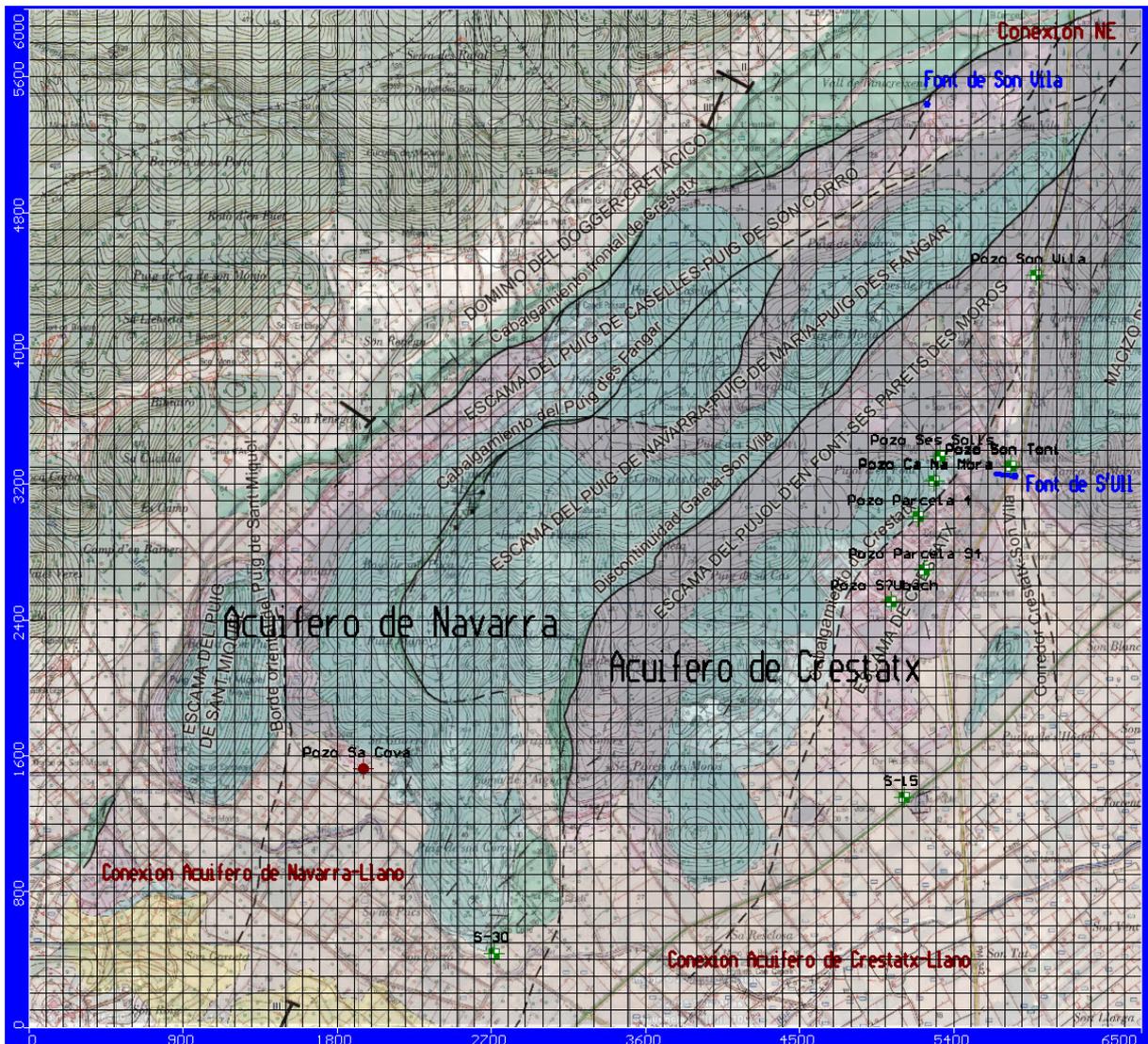


Figura 3. Mallado superficial del modelo

4.3.2. Capas

En los modelos tridimensionales de flujo se suele abordar la discretización en la vertical del modelo intentando hacer corresponder cada unidad hidroestratigráfica considerada (que normalmente está

constituída por una o varias unidades estratigráficas) con una capa del modelo. Estas capas tendrían el espesor de la unidad hidroestratigráfica en cada punto (pudiendo ser, por lo tanto variable), y las cotas de su techo y de su muro corresponderían a los contornos estructurales de la unidad (no siendo, en la mayor parte de los casos, horizontales).

La estructura geológica de la unidad de Crestatx presenta una serie de características que no encuentran buena respuesta en el tipo de discretización vertical descrito. Estas características son las siguientes:

- La unidad de Crestatx consiste, desde el punto de vista geológico, en un apilamiento de escamas tectónicas cada una de las cuales está constituída por los materiales mesozoicos suprayacentes a los materiales plásticos del Keuper. De esta forma, en la vertical pueden producirse repeticiones de la serie sedimentaria y, por consiguiente, de las unidades hidroestratigráficas que se consideren.
- Las escamas tectónicas se encuentran separadas mediante accidentes tectónicos (fallas inversas y cabalgamientos, principalmente) a través de los cuales se han inyectado los materiales impermeables del Keuper. La disposición geométrica de estos materiales, que constituirán barreras al flujo de las aguas subterráneas, tiende a verticalizarse cerca de la superficie. En algunos casos la impermeabilización que provocan estas estructuras inyectadas supera la cota del nivel freático (desconectando hidráulicamente los acuíferos de Crestatx y Navarra, por ejemplo), mientras que en otros los materiales impermeables quedan a cotas inferiores al nivel freático, compartimentando el acuífero en profundidad pero sin llegar a desconectar totalmente porciones del mismo.

Por estas razones, la discretización vertical del modelo ha debido abordarse mediante la adaptación de la geología a una malla geoméricamente sencilla aunque lo suficientemente fina como para reproducir las características geológicas anteriormente descritas.

En la vertical, el ámbito modelado está comprendido entre la superficie topográfica del área modelada, cuya cota máxima en la zona activa supera los 315 m.s.n.m., y una superficie horizontal a la cota 800 m.b.n.m., profundidad máxima que alcanza el techo del Keuper (que constituye el muro de los materiales permeables) en la zona modelada.

Para la discretización vertical del modelo se han utilizado un total de 8 capas.

La primera de las capas (la más superficial) está comprendida entre la superficie topográfica y una superficie horizontal a la cota 100 m.b.n.m. En esta capa tienen lugar los procesos hidrogeológicos fundamentales que determinan el funcionamiento de la unidad de Crestatx y de los acuíferos que la constituyen:

- recarga por infiltración de las precipitaciones
- extracciones por bombeos
- descarga por manantiales
- intercambio de flujo con las planas

además de contener la superficie del nivel freático.

Para las restantes 7 capas se ha definido un espesor constante para cada una de ellas de 100 m, hasta llegar a alcanzar con el muro de la capa 8 los 800 m.b.n.m.

En la Figura 4 se aprecia, gráficamente, la discretización vertical adoptada.

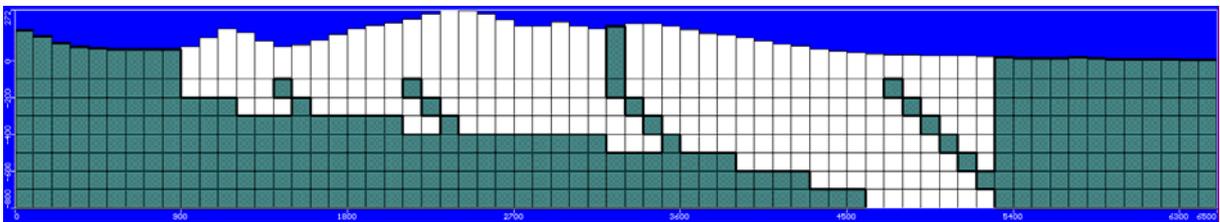


Figura 4. Discretización vertical del modelo

La capa 1 se ha simulado en condiciones de acuífero libre, por lo que la transmisividad es calculada por el programa como producto de la permeabilidad por el espesor saturado correspondiente.

Las restantes 7 capas, no aflorantes, se han simulado como confinadas, de forma que su transmisividad y coeficiente de almacenamiento (que el programa calcula como el producto de la permeabilidad y del almacenamiento específico, respectivamente, por el espesor de la capa) se mantienen constantes a lo largo de la simulación.

4.4. DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

Del mismo modo que el ámbito espacial de la zona modelada ha de ser discretizado, en el caso de una simulación en régimen transitorio el ámbito temporal que se contemple en la misma ha de ser también discretizado. Esto se realiza dividiendo el mismo en una serie de periodos de tiempo durante los cuales se considera que las acciones sobre el sistema (recarga, bombeos, etc.) permanecen constantes.

El ajuste en régimen transitorio del modelo de la Unidad de Crestatx ha abarcado desde enero de 1996 hasta septiembre de 2005.

Para decidir el periodo temporal para el que se ha efectuaría el ajuste en régimen transitorio se han tenido en cuenta las siguientes circunstancias:

- A partir de 1994-95 se dispone de series históricas de piezometría en los pozos de explotación de Crestatx, pero únicamente a partir de 1998 (y hasta 2003) se dispone de datos fiables sobre los volúmenes de agua explotados en esos pozos. Ante la necesidad de extrapolar los datos de extracciones hacia atrás en el tiempo, se optó, como solución de compromiso, comenzar el periodo de ajuste en régimen transitorio en enero de 1996, de forma que únicamente hubiese que extrapolar datos para 2 años.
- Los valores de la recarga por infiltración de las precipitaciones que se han utilizado en el modelo se basan en el estudio titulado “*Evaluación del balance hídrico de la recarga natural del Acuífero de Crestatx*”, realizado por el IGME en el año 2007. El periodo temporal abarcado en dicho estudio estuvo comprendido entre los años 1964 y 2005. Por lo tanto, para el modelo numérico se adoptó esta última fecha como final del periodo de ajuste en régimen transitorio. Esto supuso tener que extrapolar hacia delante 2 años las series de bombeos.

El periodo de calibración del modelo en régimen transitorio consta, en definitiva, de 9 años y 9 meses, y ha sido discretizado en 117 periodos de tiempo equivalentes a meses reales, es decir, con sus duraciones correspondientes de 31, 30, 29 o 28 días.

Durante estos periodos de tiempo mensuales las magnitudes de las acciones sobre el sistema se suponen constantes, obteniendo el modelo una predicción de la piezometría al cabo de cada periodo.

4.5. UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS CONSIDERADAS

Para la realización del modelo se ha utilizado el concepto de unidad hidroestratigráfica en el sentido de considerar de una forma sintética unidades geológicas con propiedades hidráulicas similares, que además presentan comportamientos diferenciados desde el punto de vista del sistema de flujo: varias formaciones geológicas pueden ser unidas para constituir una unidad hidroestratigráfica, y una formación geológica puede ser dividida en acuíferos y unidades confinantes.

En el caso de la unidad de Crestatx se han considerado dos unidades hidroestratigráficas: los materiales del Keuper, por un lado, y el resto de materiales sedimentarios, en conjunto, por el otro.

Los materiales del Keuper se consideran totalmente impermeables, por lo que en el modelo tendrán carácter de borde cerrado o de celdas inactivas.

El hecho de considerar al resto de materiales sedimentarios mesozoicos, terciarios y cuaternarios, en su conjunto, como una única unidad hidroestratigráfica se justifica por las siguientes razones:

- Prácticamente la totalidad de la extensión de la unidad hidrogeológica de Crestatx, tanto en superficie como en profundidad, está constituida por las calizas y dolomías karstificadas del Lías y Dogger.

- Dentro del resto de materiales presentes en la zona modelada hay formaciones poco permeables, como es el caso de las margas del Dogger-Cretácico inferior, y otros con permeabilidad significativa, tales como los conglomerados del Plioceno y los depósitos cuaternarios.
 - Las margas del Dogger-Cretácico inferior, en el interior de la unidad, presentan un escaso desarrollo, y siempre asociadas con la zona superior de las escamas cabalgantes, siendo normalmente laminadas por el frente de cabalgamiento de la escama posterior. De esta forma, constituirían pequeñas barreras de baja permeabilidad entre los materiales permeables carbonatados de las diferentes escamas, aunque normalmente se sitúan por encima del nivel freático de la unidad y, por lo tanto, no influyen en la circulación de las aguas subterráneas.

Estos materiales sí que constituyen un borde impermeable en el cabalgamiento frontal de la escama de Navarra, por lo que en el modelo se han considerado, en esa posición, como un borde cerrado (celdas inactivas).
 - En el caso de los materiales terciarios y cuaternarios, su papel en la zona modelada se limita a cubrir, con escaso espesor, al resto de materiales más antiguos, según una disposición geológica en forma de “plana”.

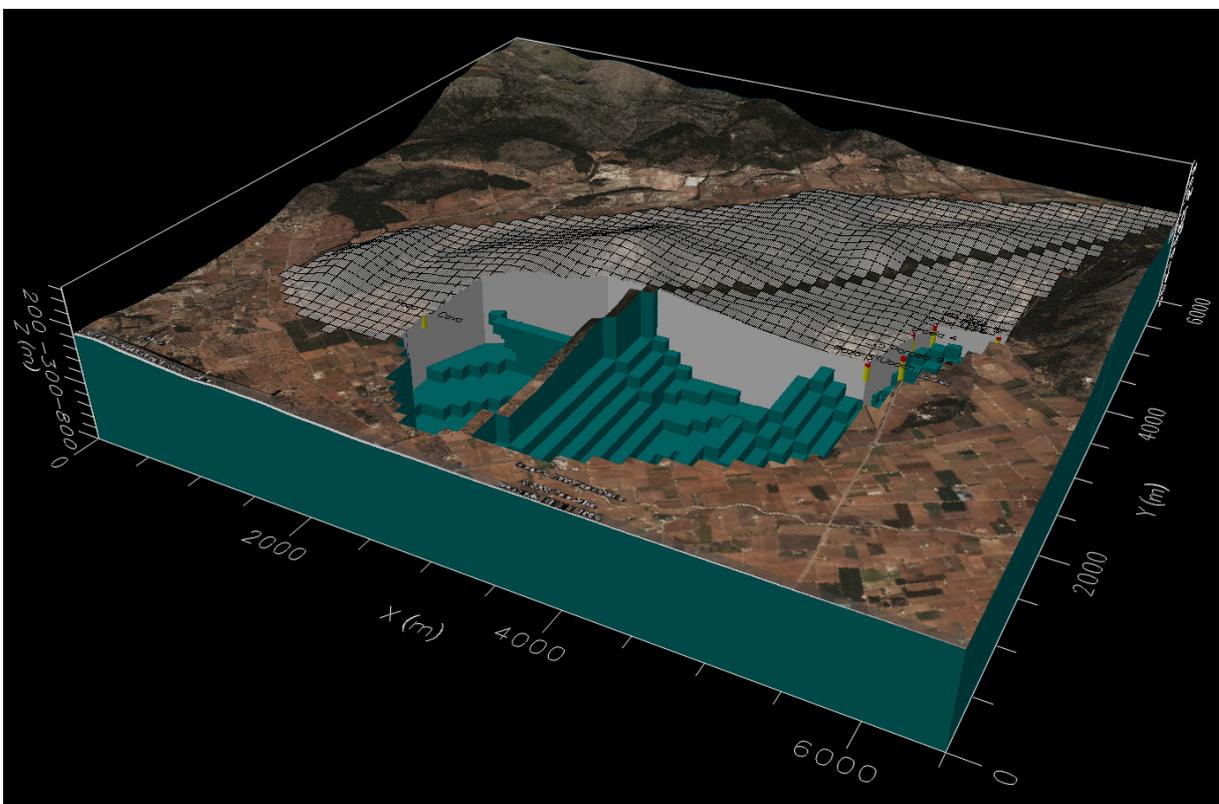


Figura 5. Zona activa (en blanco) y celdas inactivas (en verde) del modelo

La definición geométrica (distribución espacial de las cotas de techo y muro) de las unidades hidroestratigráficas consideradas se ha obtenido a partir de la información aportada por la nueva cartografía geológica realizada, en especial de los cortes geológicos. La extrapolación de la geometría de las unidades hacia los extremos NE, SO y SE, en los que no existe información directa, debe interpretarse como tentativa, aunque se ha intentado respetar el estilo tectónico de la zona.

En la Figura 5 se ha representado, de forma tridimensional, la disposición geométrica de las unidades hidroestratigráficas, apreciándose la complejidad estructural de la unidad hidrogeológica y cómo la asignación de las correspondientes celdas a las unidades hidroestratigráficas ha tratado de respetar los rasgos tectónicos de la zona.

4.6. CONDICIONES DE BORDE

Para llegar a obtener un sistema de ecuaciones que tenga el mismo número de ecuaciones que de incógnitas, con el fin de conseguir una única solución numérica, es preciso definir el comportamiento hidráulico de los límites del acuífero. La definición de este comportamiento se lleva a cabo a través de las condiciones de borde que se imponen al modelo.

En el modelo realizado se han considerado cerrados los siguientes límites:

- El cabalgamiento frontal de la escama de Navarra, que constituye el límite NO de la unidad hidrogeológica de Crestatx. Este cabalgamiento, que discurre superficialmente por el valle del Camí Vell de Pollença, pone en contacto los materiales carbonatados permeables de la unidad con las margas poco permeables del Dogger-Cretácico inferior pertenecientes ya al borde SE de la Sierra de Tramuntana. Este cabalgamiento se encuentra, además, inyectado por los materiales impermeables del Keuper hasta una profundidad no determinada.
- Cabalgamiento o falla inversa que pone en contacto la unidad de Crestatx y la escama del Puig de Son Vila, al E de la zona modelada. Este accidente tectónico se encuentra inyectado con los materiales impermeables del Keuper, que se presentan subaflorantes.

Hay que señalar que en el interior de la zona activa del modelo se han utilizado conjuntos de celdas inactivas (que constituyen límites cerrados al flujo) para definir las barreras al flujo que suponen las inyecciones de los materiales del Keuper a favor de los accidentes tectónicos; en algunos casos estas barreras no alcanzan ni la superficie ni la superficie del nivel freático, por lo que no aíslan recintos estancos, pero en el caso del contacto entre los acuíferos de Navarra y Crestatx, supondrá, en la práctica, la división de la zona modelada en dos submodelos de funcionamiento totalmente independiente que pueden ser considerados y analizados de forma separada a lo largo del modelado, como así ha ocurrido en la realidad.

Los límites abiertos considerados son:

- Borde Sur del acuífero de Crestatx, puesto que aunque se desconoce en detalle la disposición geológica bajo los materiales cuaternarios presentes en esa zona, existe conexión hidráulica entre este acuífero y la Plana de Inca-Sa Pobla, bien por la continuidad de los materiales carbonatados hacia el S o directamente por el contacto lateral de estos con los materiales cuaternarios en profundidad.
- Borde Sur del acuífero de Navarra, por las mismas razones que en el caso anterior.
- Extremo NE del acuífero de Navarra, puesto que en esa dirección existe continuidad cartográfica de los materiales carbonatados de la zona modelada con los situados en el exterior.

La caracterización del comportamiento hidráulico de los bordes abiertos definidos, utilizando celdas de nivel constante, se comentará en el apartado dedicado a acciones sobre el sistema.

En la Figura 6 se muestra la disposición de los límites abiertos del modelo.

4.7. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

4.7.1. Permeabilidad y porosidad/coeficiente de almacenamiento

Dado el carácter interpretativo que, en buena medida, se ha conferido al modelo, y la escasez, poca representatividad e, incluso, inexistencia de datos referidos a los parámetros hidráulicos de los materiales que se han modelado, se ha considerado oportuno efectuar la simplificación de utilizar un único valor para cada uno de los parámetros correspondientes al conjunto de los materiales permeables representados en el modelo, con objeto de no aumentar el número de factores, en este caso poco conocidos, que puedan tener influencia sobre los resultados obtenidos.

Durante las diferentes fases de calibración del modelo, tanto en régimen permanente como transitorio, han sido ajustados estos valores al considerarse que las correcciones repercutían favorablemente en la acomodación del modelo al funcionamiento real conocido. Como condicionantes previos al proceso de calibración, y ante el desconocimiento de las características de la karstificación que han sufrido los materiales carbonatados, se partió de las siguientes premisas:

- Se considera que la permeabilidad general del macizo debe descender con la profundidad, por cuanto la karstificación es un proceso relacionado con procesos vadosos o desarrollados cerca del nivel freático.
- Se considera que la permeabilidad horizontal y vertical en el macizo deben ser iguales (medio isótropo).



Figura 6. Límites abiertos del modelo y acciones sobre el sistema

Los parámetros hidráulicos ajustados finalmente para la capa superficial del modelo (desarrollada entre la superficie topográfica y los 100 m.b.n.m.) han quedado como sigue:

Cuadro 1. Parámetros hidráulicos ajustados

Permeabilidad (m/s)		Coeficiente de almacenamiento específico (1/m)	Porosidad eficaz (%)
Horizontal	Vertical		
4E-6	4E-6	1E-5	0.5

Teniendo en cuenta las premisas enunciadas anteriormente, la permeabilidad (isótropa) de las restantes 7 capas del modelo se reducen gradualmente a partir de ese valor hasta alcanzar 6E-7 m/s en la capa más profunda.

4.7.2. Reactivación de celdas

El programa utilizado permite la reactivación de celdas que se hayan secado en anteriores iteraciones o etapas. Esta reactivación se produce cuando el nivel en las celdas colindantes ha igualado o superado un umbral fijado previamente.

Desde el punto de vista de intentar reproducir de la forma más fidedigna la realidad, cuanto menor es el valor del umbral fijado, mayor es el número de celdas activas que deben estarlo. No obstante, cuanto menor es el valor del umbral, mayor es el número de veces que se producen secados y reactivaciones de celdas, con lo que es posible que no se produzca un proceso convergente de solución única a los sistemas de ecuaciones planteados.

Las oscilaciones del nivel de agua en las celdas que se producen durante la simulación y que, eventualmente, provocan el secado de celdas, pueden deberse a dos causas:

- El proceso iterativo de solución del sistema de ecuaciones planteado.
- Cambios en la magnitud de los factores reales que afectan al sistema durante una simulación en régimen transitorio.

Lógicamente, durante una simulación en régimen permanente únicamente actúa la primera causa, por lo que las oscilaciones de nivel y, por tanto, la posibilidad de que las celdas se sequen, es menor que el caso de una simulación en régimen transitorio.

En cualquier caso, en el modelo de la unidad de Crestatx no ha sido necesario contemplar la posibilidad de reactivación de celdas puesto que, en previsión de la aparición de problemas de convergencia del modelo, se estableció, a propósito, un gran desarrollo vertical de la capa 1 (definida entre la superficie topográfica y 100 m.b.n.m.), de forma que la totalidad de las variaciones del nivel freático durante las diferentes simulaciones efectuadas quedaran contenidas dentro de la misma, evitándose el secado o inactivado de celdas.

4.7.3. Niveles iniciales

Cuando comienza el periodo de simulación en régimen transitorio, en enero de 1996, la unidad hidrogeológica de Crestatx ya se encontraba en explotación. Por otra parte, para esa fecha no existe ningún plano de isopiezas que sirviese de referencia para la obtención de los niveles iniciales necesarios para la simulación.

La solución adoptada ha consistido en adoptar como niveles iniciales para el ajuste en régimen transitorio los obtenidos en una pasada previa en régimen permanente considerando los valores medios de las acciones (recarga, bombeos) sobre el sistema correspondientes al periodo de simulación en régimen transitorio (enero de 1996 a septiembre de 2005).

4.8. ACCIONES SOBRE EL SISTEMA

Una vez establecido el alcance del modelado, definidos sus bordes, discretizado espacialmente y construido virtualmente el modelo, hay que establecer cual es la forma de simular todos y cada uno de los factores externos que intervienen en el funcionamiento de la unidad hidrogeológica. Se consideran factores externos aquellos procesos que introducen o extraen agua del sistema, y que no son, por tanto, características intrínsecas a la unidad.

Los factores que deben ser simulados para reproducir el funcionamiento hidrogeológico de la unidad hidrogeológica de Crestatx son los siguientes:

- Infiltración de las precipitaciones
- Manantiales
- Bombeos
- Transferencias laterales con otros acuíferos o formaciones permeables.

En la Figura 6 se muestra la situación de estas acciones sobre la zona modelada.

4.8.1. Infiltración de las precipitaciones

La infiltración de la precipitación en el terreno se ha simulado en el modelo de la unidad de Crestatx mediante el modulo de recarga (*RECHARGE*) de ModFlow. Este módulo permite representar un aporte de agua al sistema con una distribución superficial. En este módulo se debe definir sobre qué celda se produce la recarga, existiendo tres posibilidades:

- sobre celdas de la capa superior
- sobre cualquier celda que se especifique en una columna vertical
- sobre la celda activa superior en una columna vertical

En el modelo de la unidad de Crestatx la recarga se producirá siempre sobre las celdas activas de la capa superior del modelo, puesto que ya se ha comentado anteriormente que esta capa se ha definido geoméricamente de forma que durante las diferentes simulaciones efectuadas sus celdas el nivel de agua en las mismas no caiga por debajo de su cota de muro (100 m.b.n.m.) y, por lo tanto, no se inactiven.

Para el establecimiento de las series de recarga sobre los materiales permeables de la unidad de Crestatx se ha partido de los datos diarios proporcionados por el estudio titulado “*Evaluación del balance hídrico de la recarga natural del Acuífero de Crestatx*” realizado por el IGME en el año 2007. En este estudio se utilizó el programa Visual Balan para la estimación de la recarga en el periodo 1964-2005 (41 años). Los datos finales del balance hídrico realizado en ese estudio concluyeron que la recarga media unitaria por infiltración de las precipitaciones para el periodo contemplado (1964-

2005) se cifraba en 415 mm/a, lo que suponía un 45% de las precipitaciones (915 mm/a). En este estudio no se estableció la distribución espacial de la recarga sobre la superficie de los acuíferos, obteniéndose un valor único aplicable a toda la superficie para cada día del periodo con considerado.

Como se comentó en el apartado dedicado al planteamiento del modelo, no se consideró lo suficientemente fiable este estudio como para considerar los resultados del mismo no susceptibles de calibración con el modelo ahora realizado. De esta forma, y tras integrar los datos originales del estudio, que estaban a nivel diario, a nivel mensual tal como eran requeridos por el modelo numérico, la serie de recarga resultante fue ajustada contemplando diferentes coeficientes correctores de la misma aplicados de forma lineal a toda la serie, para terminar considerando que con el 55% del valor de la serie de recarga original de Visual Balan se conseguía el mejor ajuste posible.

De esta forma, y considerando el periodo simulado en el modelo (enero de 1996 a septiembre de 2005), se concluye que la recarga unitaria media en la unidad de Crestatx se cifra en 229.2 mm/a, lo que supone aproximadamente un 25% de la precipitación durante ese periodo.

Recarga por infiltración de las precipitaciones

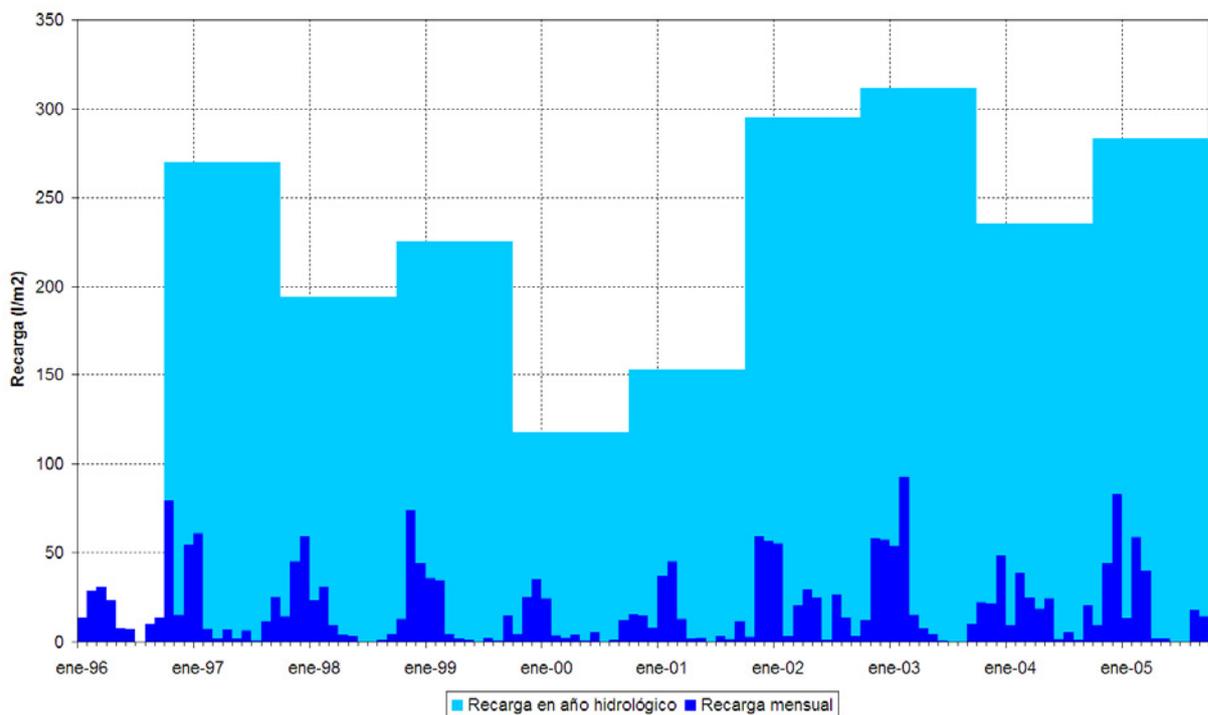


Figura 7. Recarga por infiltración de las precipitaciones

Al no considerarse en el estudio de referencia una distribución espacial de la recarga, en el modelo ahora realizado se ha aplicado la recarga correspondiente a cada paso de tiempo de forma uniforme sobre las celdas activas de la capa superficial del modelo.

En la Figura 7 se muestra la distribución de la recarga mensual e integrada para cada año hidrológico completo durante el periodo simulado.

4.8.2. Manantiales

Las descargas de la unidad de Crestatx que tienen lugar a través de manantiales y galerías se han simulado en el modelo numérico mediante el módulo de dren (*DRAIN*) de ModFlow. Mediante la aplicación de este módulo a una celda del modelo se simula una detracción de agua del acuífero con un caudal que es proporcional a la diferencia entre el nivel del agua en el acuífero y la cota de salida del agua, con la limitación de que cuando el nivel cae por debajo de la cota de salida, cesa el flujo.

El modelo simula la salida de agua por un dren utilizando dos factores: la conductancia entre el dren y el acuífero y la cota de salida del agua.

En el modelo de la unidad de Crestatx se han considerado los siguientes manantiales:

- Font de S'Ull y galerías de captación relacionadas. Se localizan al Este del acuífero de Crestatx, y para su simulación se han considerado dos celdas con una cota de descarga de 20 m.s.n.m. y una conductancia de 10.000 m²/d.
- Font de Son Vila. Se localiza al Norte del acuífero de Navarra, y para su simulación se ha considerado una celda con una cota de descarga de 80 m.s.n.m. y una conductancia de 10.000 m²/d.

4.8.3. Bombeos

Las extracciones de agua a través de pozos de bombeo han sido simuladas utilizando el módulo *WELL* de ModFlow, que permite considerar un caudal de agua que sale o entra en una celda dada, el cual es independiente de la superficie de la celda y del nivel del agua en la misma. El preprocesador del modelo asigna a cada celda el volumen de agua extraído en cada periodo de tiempo por el pozo que se emplace en ella, o integra los volúmenes en el caso de que existan varios pozos en una celda.

En el modelo de la unidad hidrogeológica de Crestatx se han considerado los bombeos efectuados por los pozos de abastecimiento urbano de ACASA en el acuífero de Crestatx y los bombeos que se efectúan en el acuífero de Navarra, concretamente en el sector de Sa Cova, para el abastecimiento de la localidad de Campanet. En ambos casos, estas extracciones suponen, con diferencia, la principal explotación en ambos acuíferos.

Los valores anuales de las extracciones efectuadas desde los pozos considerados en el modelo quedan reflejados en el siguiente Cuadro:

Cuadro 2. Extracciones anuales por pozos

AÑO	VOLÚMENES ANUALES EXTRAIDOS POR POZO (hm ³ /a)							
	CA NA MORA	SES SOLLs	SON VILA	S'UBACH	SON TONI	PARCELA 94	PARCELA 4	SA COVA
1996	0.32*	0.32*			0.10*	0.07*	0.05*	0.26*
1997	0.32*	0.32*	0.19*	0.11*	0.10*	0.07*	0.05*	0.26*
1998	0.32	0.32	0.19	0.11	0.10	0.07	0.05	0.26*
1999	0.45	0.45	0.20	0.12	0.11	0.08	0.06	0.26*
2000	0.37	0.36	0.26	0.12	0.11	0.07	0.06	0.26*
2001	0.33	0.32	0.26	0.13	0.11	0.07	0.06	0.26*
2002	0.40	0.39	0.26	0.11	0.11	0.08	0.06	0.26*
2003	0.38	0.38	0.26	0.12	0.11	0.08	0.06	0.26*
2004	0.38*	0.38*	0.26*	0.12*	0.11*	0.08*	0.06*	0.26*
2005	0.38*	0.38*	0.26*	0.12*	0.11*	0.08*	0.06*	0.26*
MEDIA	0.36	0.36	0.24	0.12	0.11	0.07	0.06	0.26

*: Datos extrapolados

Como quedó señalado anteriormente, ha sido necesario extrapolar los datos de extracciones de los pozos de Crestatx hacia atrás y hacia delante de la serie disponible con el objeto de cubrir el periodo temporal simulado.

Cabe señalar que según la información disponible, los pozos de Son Vila y S'Ubach comenzaron a ser explotados en 1997, mientras que los restantes 5 pozos de ACASA en Crestatx ya se encontraban en explotación con anterioridad a 1996.

Extracciones de los pozos de Crestatx

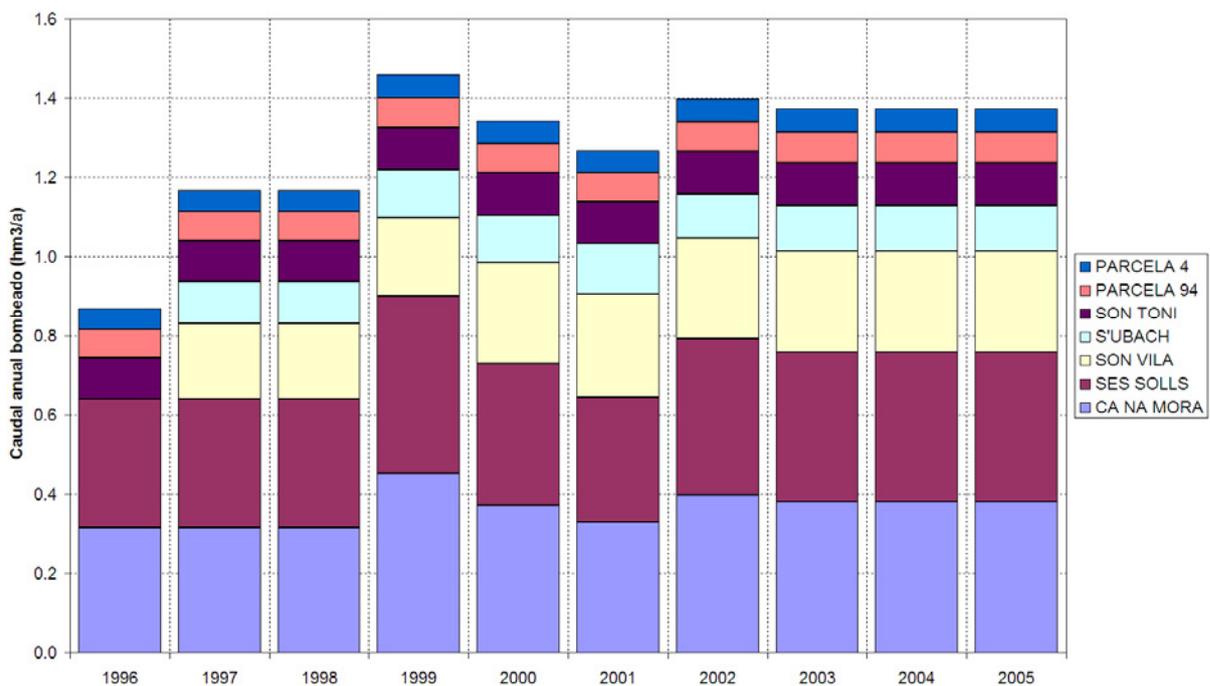


Figura 8. Extracciones anuales de los pozos de Crestatx

En la Figura 8 se muestra la distribución de los caudales extraídos anualmente por cada pozo.

En el caso de la extracción en Sa Cova, dentro del acuífero de Navarra, se ha utilizado el dato de extracción reflejado en el Plan Hidrológico.

Para el establecimiento de la distribución mensual de las extracciones anuales se han utilizado los siguientes coeficientes de reparto, coherentes con las aplicadas en estudios anteriores:

Cuadro 3. Coeficientes de reparto mensuales de las extracciones

TRIMESTRE	MES	COEFICIENTES DE REPARTO	
1º	Enero	5%	25%
	Febrero	10%	
	Marzo	10%	
2º	Abril	12%	36%
	Mayo	12%	
	Junio	12%	
3º	Julio	11%	33%
	Agosto	11%	
	Septiembre	11%	
4º	Octubre	2%	6%
	Noviembre	2%	
	Diciembre	2%	

Estos coeficientes de reparto han sido aplicados a todas las extracciones consideradas en el modelo, puesto que todas ellas son utilizadas para abastecimiento urbano.

4.8.4. Transferencias laterales con otros acuíferos o formaciones permeables.

Para simular las conexiones laterales que presentan los acuíferos de la unidad de Crestatx se han utilizado celdas de nivel constante (o mejor dicho, predeterminado o prefijado) en los bordes correspondientes de la zona simulada. En las simulaciones con ModFlow el nivel de agua en estas celdas es fijado previamente a la simulación, siendo, por tanto, un valor de partida y no un resultado del modelado. En cada celda a la que se aplique la condición de nivel prefijado puede fijarse un valor predeterminado para cada periodo de simulación.

En el modelo de la unidad de Crestatx se han utilizado celdas de nivel predeterminado para simular las siguientes transferencias laterales:

- Conexión del acuífero de Crestatx con el Llano de Inca-Sa Pobra
 Como se comentó anteriormente, la única información cuantitativa, aunque indirecta, relacionada con el intercambio de agua entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Inca-Sa Pobra proviene de la serie piezométrica del sondeo S-15, situado al E de la zona de conexión entre ambos (Figura 6).

Esta serie carece de deriva temporal y muestra, a nivel intraanual, un carácter claramente estacional.

A partir de los niveles medidos en este sondeo se ha ajustado una curva de evolución anual que refleja, con un elevado grado de coincidencia, el comportamiento estacional del nivel del agua, y que repetida a lo largo de los años simulados, proporciona una evolución del nivel de agua simplificada, pero muy representativa de la realidad. En la Figura 9 se representan los datos medidos y la serie sintética ajustada, cuyo nivel máximo se ha fijado en 9 m.s.n.m., mientras que el mínimo corresponde a 1 m.s.n.m.

Es esta evolución sintética del nivel del agua la que se ha utilizado para caracterizar el conjunto de celdas de nivel predeterminado que representarán en el modelo la conexión entre el acuífero de Crestatx y el llano.

- Conexión del acuífero de Navarra con el Llano de Inca-Sa Pobla

Al igual que en el caso anterior, para caracterizar esta conexión únicamente se dispone de la serie piezométrica proporcionada por un sondeo, el S-15, situado al E de la zona de conexión entre ambos (Figura 6).

La serie de este sondeo presenta, básicamente, las mismas características que la del sondeo S-30, y se procedió igualmente a obtener una serie sintética de la misma. Esta serie sintética, representada en la Figura 9, muestra un valor máximo de 27 m.s.n.m. y un mínimo de 3.5 m.s.n.m.

Mientras que en el caso del acuífero de Crestatx su serie sintética se ha aplicado, tal cual, a todas las celdas de nivel predeterminado con las que se ha simulado su conexión lateral con el llano, en el caso del acuífero de Navarra la aplicación no ha sido tan simple, puesto que en el borde S del acuífero de Navarra la piezometría desciende desde los 40 m.s.n.m. al O de la zona de contacto entre acuífero y llano, hasta los 20 m.s.n.m. al E de dicha zona, según el mapa de isopiezas representativas del modelo conceptual de funcionamiento. Dado que el sondeo S-15 se emplaza en esta última zona, se ha establecido un gradiente lineal ascendente hacia el O para determinar los niveles prefijados que corresponderán a las celdas de nivel predeterminado que se han definido en esa dirección, de forma que se reproduzca la “caída” de la piezometría real.

- Prolongación del acuífero de Navarra hacia el NE

En el sector septentrional del acuífero los materiales permeables se prolongan hacia el NE fuera de la zona modelada. En esta zona los datos piezométricos proporcionados por medidas puntuales en algunos pozos apuntan a un nivel de agua situado en torno a una cota de 40 m.s.n.m.

De forma semejante a los dos casos anteriores se ha simulado esta conexión hidráulica mediante la definición de celdas con nivel predeterminado. Ante la falta de series de evolución piezométrica, se ha adoptado la serie sintética de niveles con la misma amplitud que la utilizada para la conexión entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Inca Sa Pobla, aunque centrada en torno a los 40 m.s.n.m. En la Figura 9 se muestra la serie adoptada para esta conexión.

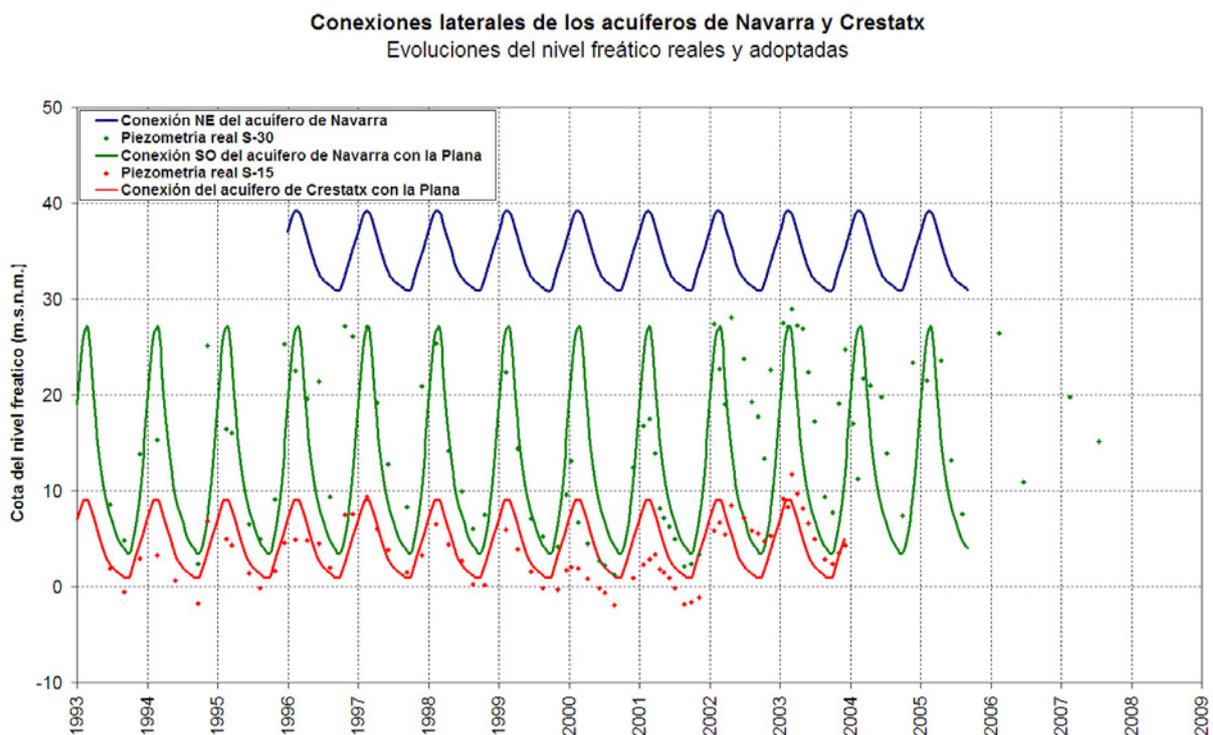


Figura 9. Evoluciones del nivel freático adoptadas para los límites abiertos del modelo

4.9. CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.9.1. Criterio de calibración

El criterio básico que se ha perseguido durante el proceso de ajuste del modelo ha sido reproducir de la forma más fidedigna posible las series de evolución piezométrica disponibles en la unidad hidrogeológica de Crestatx. Estas series pertenecen a los 7 pozos de explotación de ACASA en Crestatx y a los 2 sondeos, S-15 y S-30, emplazados en los contactos entre los acuíferos de Crestatx y Navarra con el Llano de Inca-Sa Pobla, respectivamente. Debido a que estos dos últimos sondeos se emplazan, dentro del modelo, en celdas con nivel predeterminado, sus medidas reales no han podido ser susceptibles de comparación con las evoluciones piezométricas proporcionadas por el modelo, puesto que éstas están impuestas por los datos de entrada del modelo.

Por tanto, únicamente se dispuso de 7 series piezométricas de datos reales con las que comparar los resultados del modelo. Estas series reales presentan la particularidad de que corresponden a medidas efectuadas en los propios pozos de explotación del acuífero, por lo que en determinadas ocasiones corresponderán a niveles dinámicos o en recuperación tras bombeos.

Además hay que tener en cuenta que mientras las medidas de nivel reales efectuadas en un pozo de bombeo en explotación o recientemente parado corresponden a los máximos descensos en ese sector, los datos calculados por el modelo para ese “piezómetro” corresponden al nivel medio de agua en la celda en que se emplaza el pozo, por lo que, por definición, siempre será más alto (descenso inferior) que el realmente medido en el pozo. Por este motivo, en la comparación entre series piezométricas reales y calculadas habrá que buscar la coincidencia sobre todo entre la parte “superior” y “media” de las series en detrimento de los descensos más acusados.

4.9.2. Ajuste en régimen permanente

Con el ajuste en régimen permanente que se efectuó en la fase inicial del modelado únicamente se pretendió comprobar que el modelo construido podía reproducir el funcionamiento hidrogeológico de la unidad de Crestatx tal como quedó establecido en el modelo conceptual: en definitiva, reproducir a grandes rasgos el mapa de isopiezas representativo de la unidad y obtener unos valores del balance hídrico “razonables”.

En la Figura 10 se muestra el mapa piezométrico resultado de la calibración en régimen permanente, mientras que en la Figura 11 se muestra la representación del mismo en un bloque diagrama.

Hay que tener en cuenta que al igual que el mapa de isopiezas representativo de la unidad representado en la Figura 2 no corresponde a una fecha en concreto, el ajuste en régimen permanente tampoco constituirá la situación hidrogeológica inicial del ajuste en régimen transitorio que se efectuó con posterioridad.

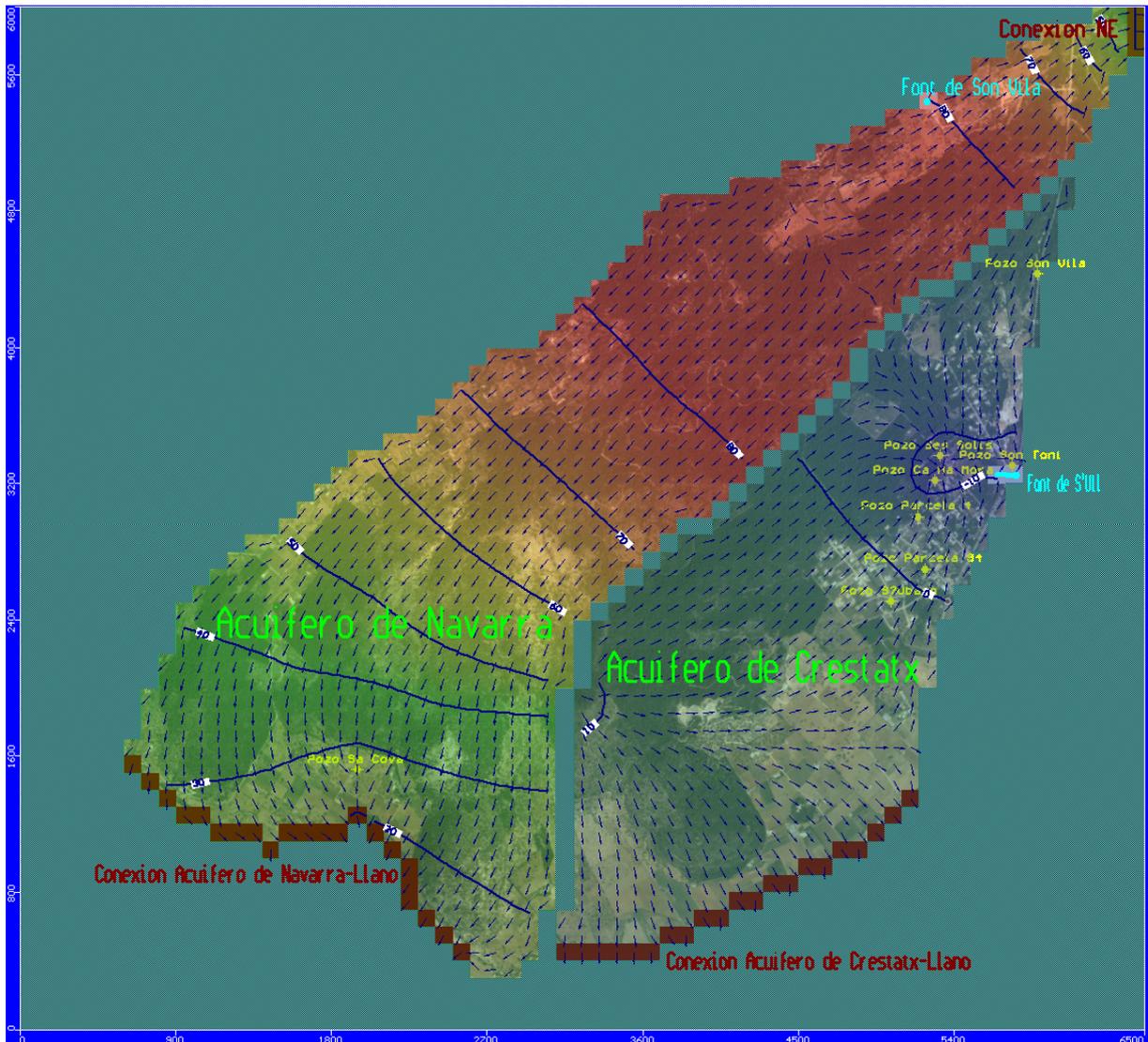


Figura 10. Isopiezas resultantes de la calibración en régimen permanente

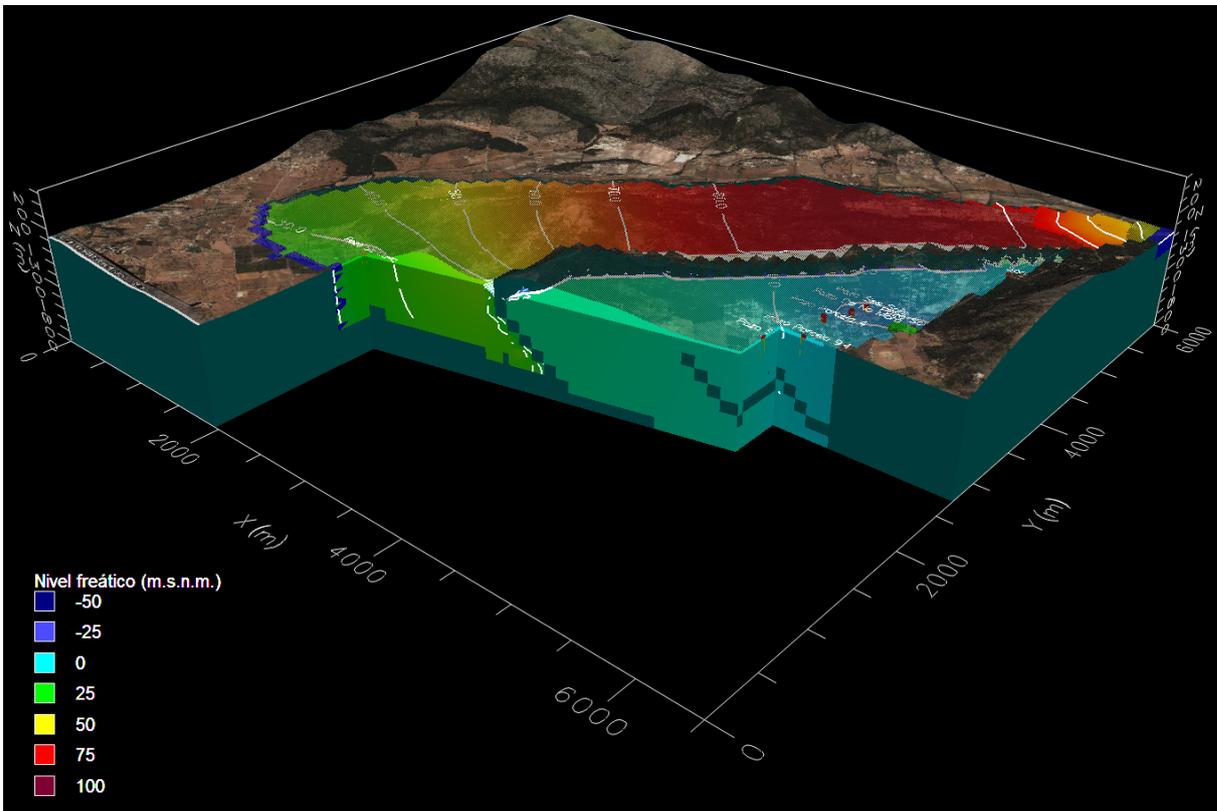


Figura 11. Bloque diagrama con la representación de la piezometría ajustada para el régimen permanente

4.9.3. Ajuste en régimen transitorio

Tomando como punto de partida el conjunto de parámetros y valores utilizados en el ajuste en régimen permanente se procedió a calibrar el modelo en régimen transitorio para el periodo comprendido entre enero de 1996 y septiembre de 2005, considerando pasos de tiempo mensuales.

El proceso de calibración del modelo fue laborioso, dada la complejidad intrínseca del mismo y el elevado grado de incertidumbre relacionado con algunos parámetros y factores. Los cambios que fue necesario introducir en las condiciones iniciales del modelo han quedado reflejados en los apartados anteriores pero, en resumen, los parámetros y factores que ha sido necesario modificar para lograr el ajuste son:

- Parámetros hidrogeológicos (permeabilidad, almacenamiento).
- Condiciones iniciales (piezometría).
- Recarga por infiltración de las precipitaciones (disminución de los valores proporcionados por Visual Balan).

A la hora de analizar el grado de bondad del ajuste realizado mediante la comparación entre los niveles de agua medidos realmente y los predichos por el modelo cabe hacer las siguientes consideraciones:

- Se ha conseguido una reproducción muy buena para 6 de las 7 series de piezometría disponibles: las correspondientes a los pozos de Ca Na Mora, S'Ubach, Ses Solls, Son Toni, Parcela 94 y Parcela 4. Esta bondad del ajuste corresponde tanto a la amplitud relativa de las series como a los valores absolutos medidos realmente (Figura 12).

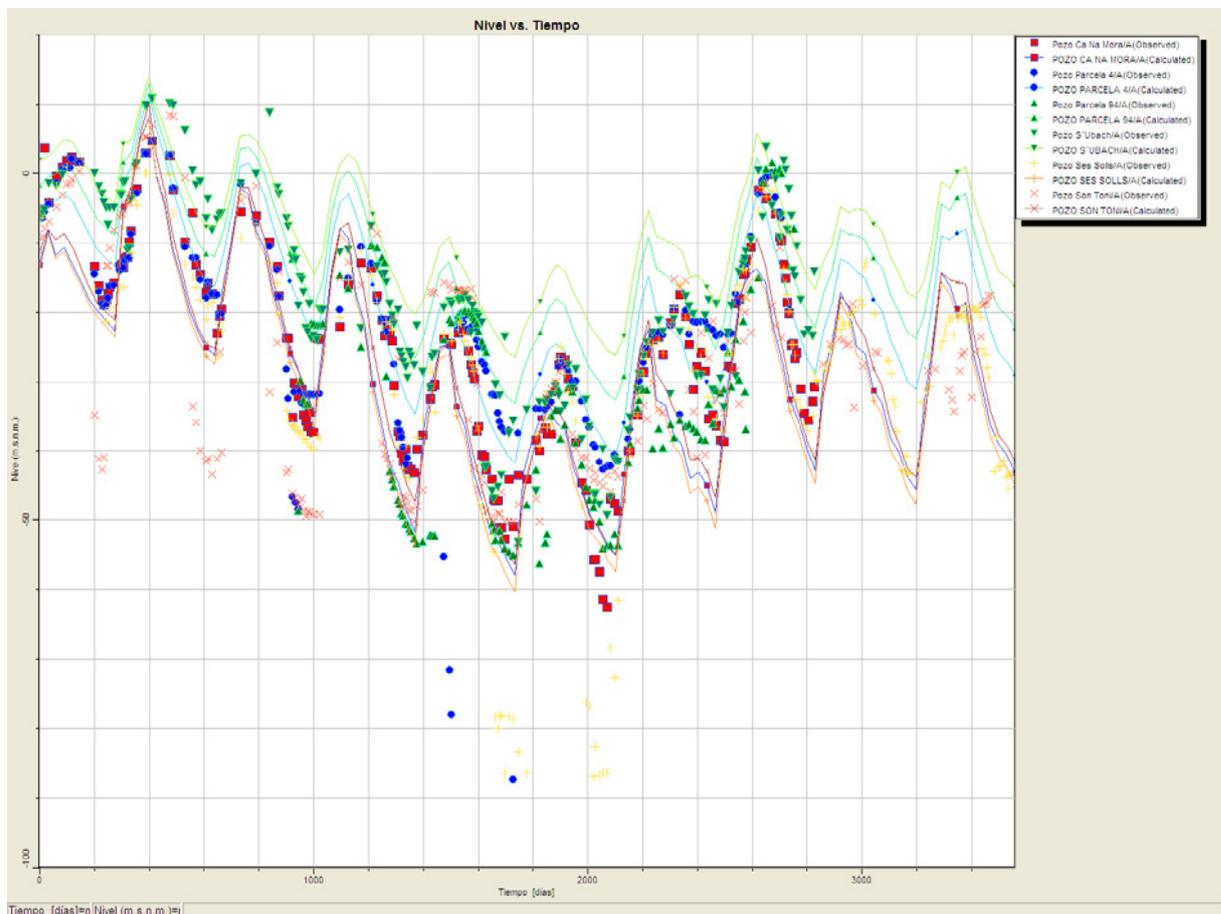


Figura 12. Evoluciones piezométricas reales y calculadas de los pozos de explotación de Crestatx (salvo pozo de Son Vila)

En la Figura 13 se muestra el gráfico de correlación entre niveles medidos y calculados de estos pozos, mientras que en la Figura 14 se aprecia el histograma representativo de la distribución de residuales.

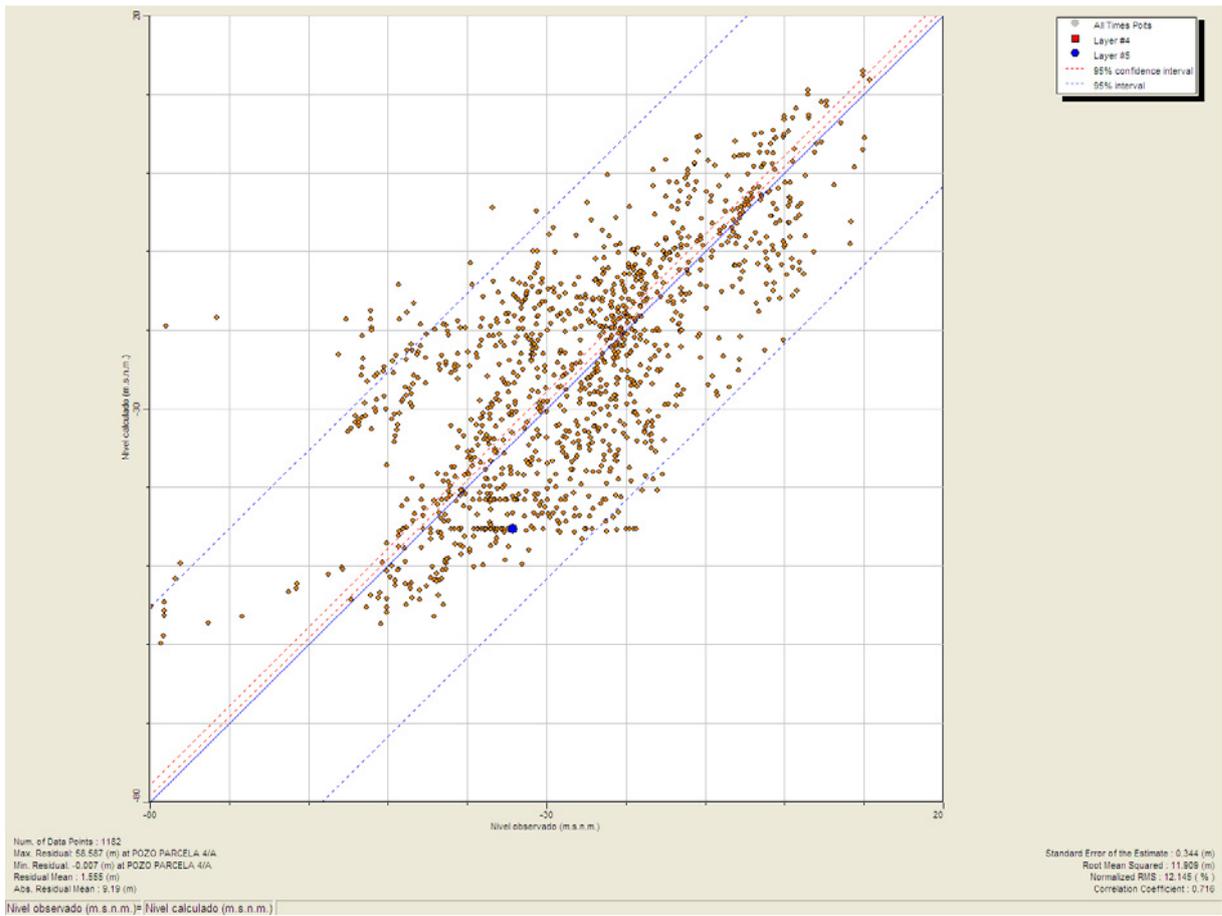


Figura 13. Correlación entre niveles medidos y calculados de estos pozos en los pozos de explotación de Crestatx (salvo pozo de Son Vila)

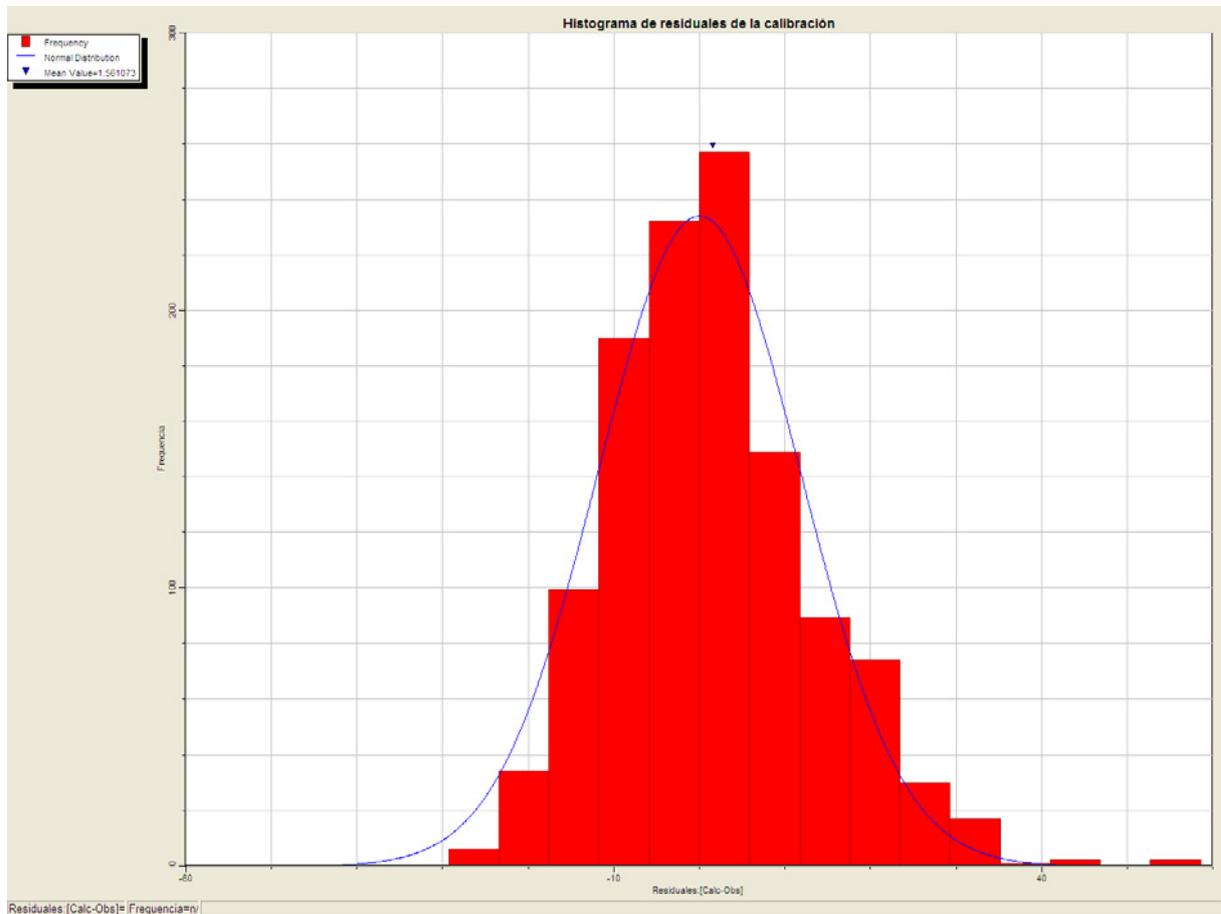


Figura 14. Histograma de los residuales de la calibración de los niveles de los pozos de explotación de Crestatx (salvo pozo de Son Vila)

- Por lo que respecta a la serie de piezometría del pozo de Son Vila, el modelo es capaz de reproducir el la tendencia de la serie, pero no así los valores absolutos reales: la serie simulada por el modelo queda entre 30 y 40 m por debajo de la realidad (Figura 15).

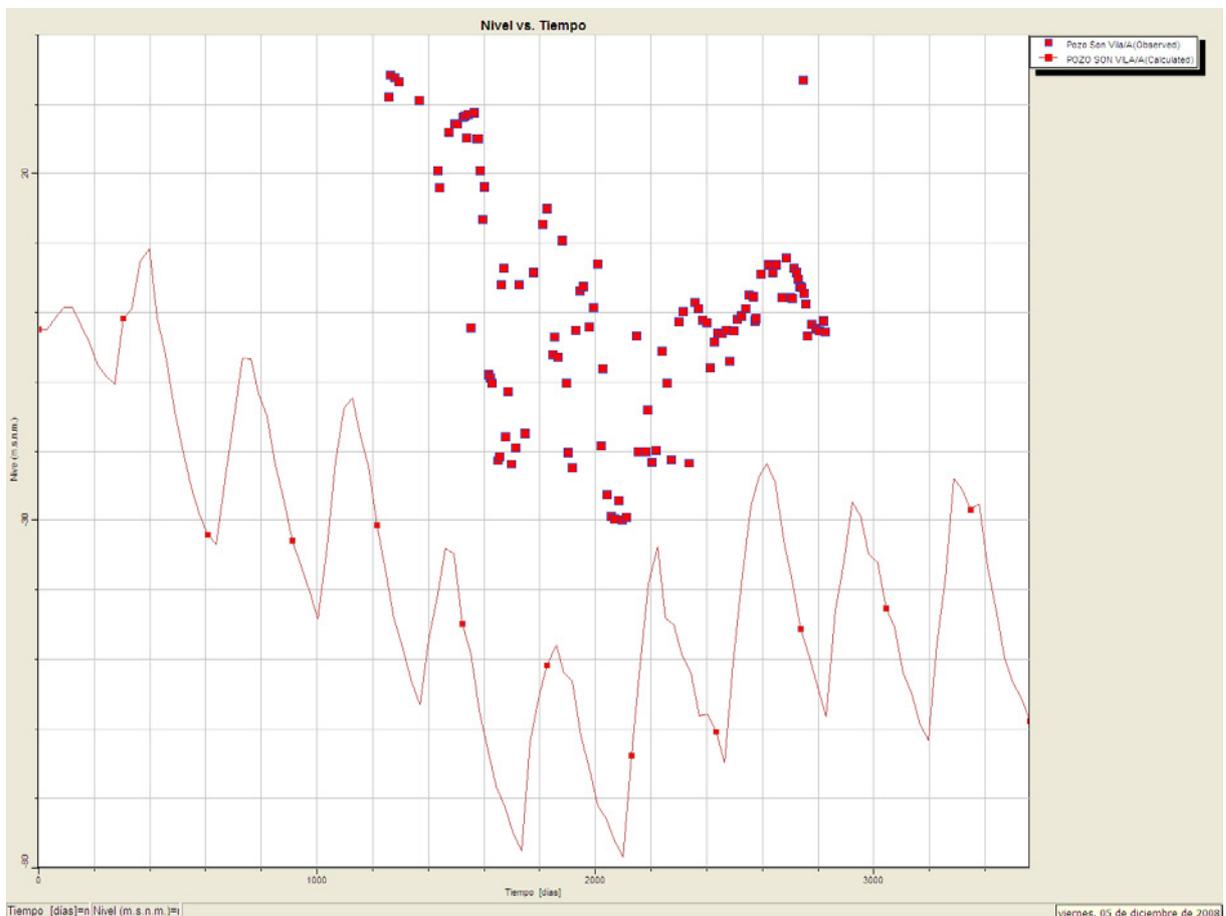


Figura 15. Evolución piezométrica real y calculada del pozo de Son Vila

Una mejora en el ajuste de esta serie sin empeorar el correspondiente a las restantes 6 series bien reproducidas hubiera pasado por efectuar unos cambios “ad hoc” en parámetros y valores de la zona cercana al pozo sin que existiesen otros datos objetivos que corroborasen estas modificaciones, por lo que se decidió no intentar dicha mejora al no tener garantías de conseguirla.

4.9.4. Consideración sobre la fiabilidad del modelo numérico para cada uno de los acuíferos de la unidad de Crestatx

Hay que destacar que las únicas series piezométricas disponibles para la calibración pertenecen a puntos situados en el acuífero de Crestatx, por lo que, en definitiva, la bondad del ajuste conseguido hace únicamente referencia a dicho acuífero. Por tanto, mientras que el funcionamiento hidrogeológico representado por el modelo y los resultados que éste proporciona se consideran bastante fiables para el acuífero de Crestatx, en el caso del acuífero de Navarra no dejarán de ser un pronóstico plausible.

5. RESULTADOS Y EXPLOTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Una vez que se consideró, mediante la calibración en régimen transitorio, que el modelo es capaz de reproducir el funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Crestatx, fue utilizado para dar respuesta a una serie de interrogantes que, básicamente, fueron los siguientes:

- Establecimiento del balance hídrico de los acuíferos que constituyen el acuífero de Crestatx para el ajuste en régimen transitorio realizado, así como el correspondiente a su eventual funcionamiento en régimen natural (sin considerar bombeos) para el mismo periodo temporal.
- Cálculo del vaciado del acuífero producido por los bombeos.
- Influencia de los bombeos en el intercambio de recursos entre el acuífero y el Llano
- Predicción del comportamiento del acuífero de Crestatx ante un eventual aumento de extracciones.
- Simulación de hipotéticos escenarios de recarga.

5.1. BALANCE HÍDRICO

Los modelos numéricos de flujo obtienen como resultado un balance hídrico en el que quedan reflejados los volúmenes de agua correspondientes a los distintos tipos de flujos de entrada y de salida.

5.1.1. Régimen influenciado

En el caso del acuífero de Crestatx, la explotación de las aguas subterráneas había comenzado previamente al periodo para el que se efectuó el ajuste en régimen transitorio. Por tanto, al inicio de la simulación se parte de una situación de vaciado del acuífero por los bombeos previos que no se verá reflejada en el balance hídrico del periodo simulado

Esta circunstancia sí ha sido tenida en cuenta a la hora de definir los niveles iniciales del modelo: la solución adoptada consistió en adoptar como niveles iniciales para el ajuste en régimen transitorio los obtenidos en una pasada previa en régimen permanente considerando los valores medios de las acciones (recarga, bombeos) sobre el sistema correspondientes al periodo de simulación en régimen transitorio (enero de 1996 a septiembre de 2005).

Durante el periodo de tiempo que ha contemplado la calibración en régimen transitorio, desde enero de 1996 hasta septiembre de 2005, el modelo realiza un balance hídrico para cada uno de los 117 periodos de tiempo mensuales que se han considerado.

El análisis del balance hídrico del acuífero de Crestatx se ha efectuado considerando años hidrológicos y los siguientes términos de balance:

- Recarga por infiltración
- Bombeos
- Salidas por las galerías de la Font de S'Ull
- Transferencias laterales con el Llano de Inca-Sa Pobla (*signo positivo: salidas del acuífero hacia el Llano; signo negativo: entradas desde el Llano al acuífero*)
- Variación del almacenamiento (*signo positivo: incremento de almacenamiento; signo negativo: vaciado*)

A partir de los resultados del modelo para el ajuste en régimen transitorio, el resultado del balance hídrico del acuífero de Crestatx para ese periodo se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen influenciado)

AÑO HIDROLÓGICO	BALANCE DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (hm ³)			
	RECARGA	BOMBEO	LLANO (1)	ALMACEN. (2)
1996-1997	1.59	1.15	0.55	-0.11
1997-1998	1.16	1.17	0.30	-0.31
1998-1999	1.36	1.45	0.18	-0.27
1999-2000	0.70	1.35	-0.32	-0.34
2000-2001	0.93	1.28	-0.38	0.03
2001-2002	1.74	1.40	0.02	0.32
2002-2003	1.89	1.38	0.35	0.17
2003-2004	1.41	1.38	0.10	-0.07
2004-2005	1.70	1.38	0.24	0.08
MEDIA	1.39	1.33	0.12	-0.06

(1) *Signo positivo: Salida hacia el Llano; Signo negativo: Entrada desde el Llano*

(2) *Signo positivo: Incremento de almacenamiento; Signo negativo: Vaciado*

En la Figura 16 se muestra, de forma gráfica, la evolución temporal de los diferentes términos del balance.

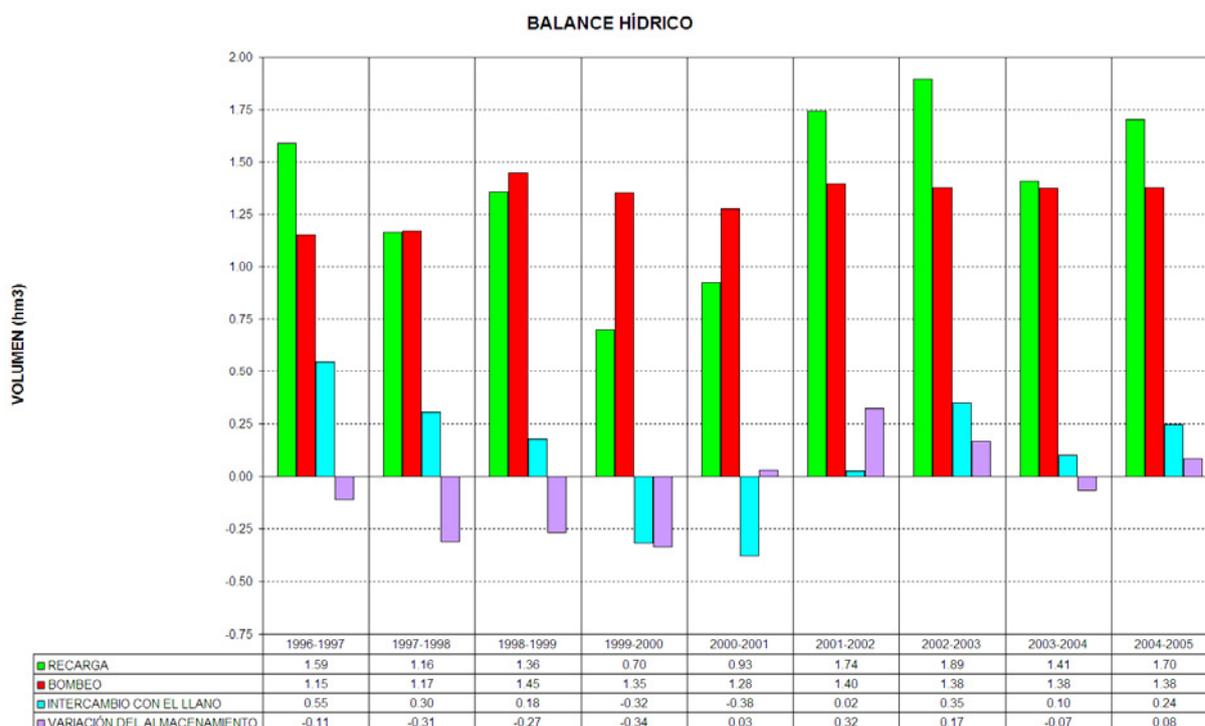


Figura 16. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen influenciado)

Las conclusiones más relevantes de los datos del balance hídrico del acuífero de Crestatx son las siguientes:

- Durante el periodo simulado, el volumen medio bombeado es muy similar al volumen recargado por infiltración de las precipitaciones.
- No se producen salidas del acuífero a través de las galerías de la Font de S'UII.
- Los años en los que los bombeos superan claramente a la recarga, como fue el caso de los años 1999-2000 y 2002-2001, no solamente se reducen las aportaciones laterales del acuífero hacia el Llano, sino que se invierte el sentido de la transferencia, aportando agua el Llano al acuífero de Crestatx.

En la Figura 17 se muestra, de forma gráfica, el caudal mensual intercambiado entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Inca-Sa Pobla.

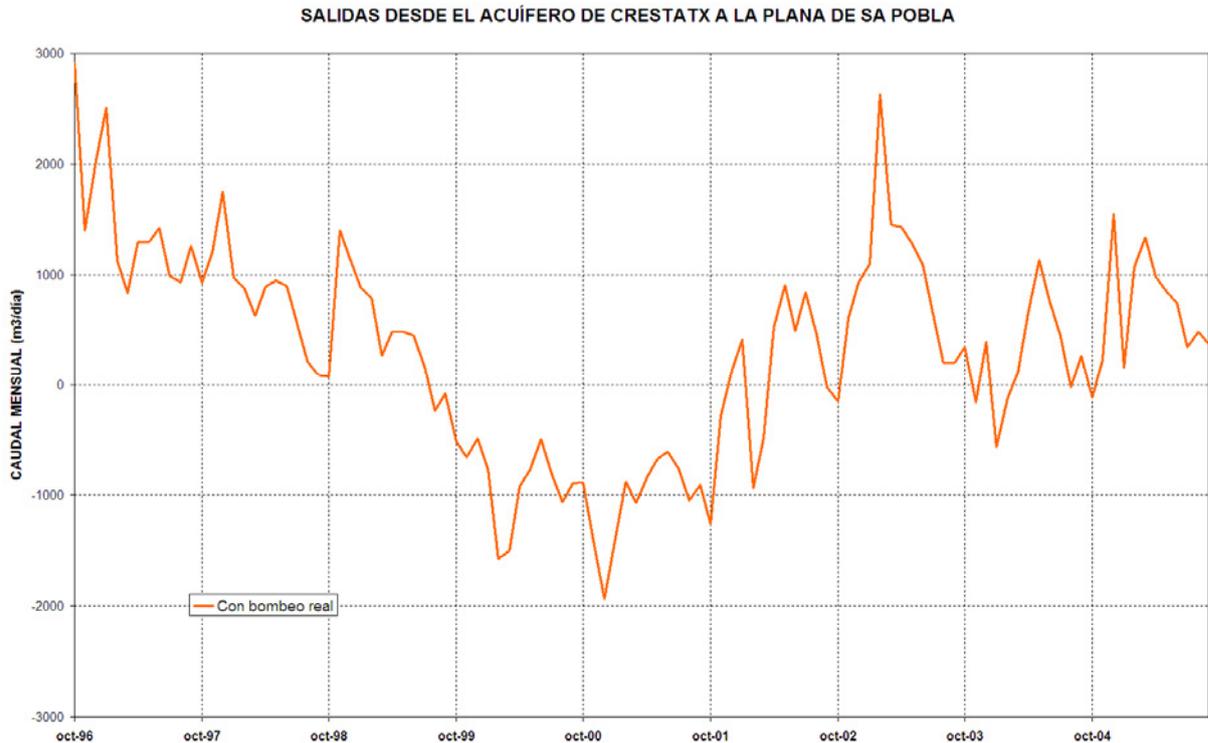


Figura 17. Evolución mensual de los caudales intercambiados entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Inca-Sa Pobla

- Para el conjunto del periodo simulado no hay prácticamente variación neta en el volumen de agua almacenado en el acuífero; es evidente que el vaciado del acuífero producido por los bombeos ya ha sido descontado antes del periodo simulado, quedando reflejado en el modelo en unos niveles iniciales que ya se situarán por debajo de la piezometría que correspondería al régimen natural (este vaciado previo será calculado cuando se comente la simulación de la serie en régimen natural).

5.1.2. Régimen natural (sin bombeo)

Para conseguir el balance hídrico correspondiente al régimen natural, es decir, si no se hubiesen producido bombeos, se efectuó una nueva pasada con el modelo considerando el mismo periodo de tiempo simulado en el ajuste en régimen transitorio, pero sin contemplar los bombeos.

Los resultados del balance se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen natural)

AÑO HIDROLÓGICO	BALANCE DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (hm ³)			
	RECARGA	FONT DE S'ULL	LLANO (1)	ALMACEN. (2)
1996-1997	1.59	0.29	1.27	0.03
1997-1998	1.16	0.23	1.10	-0.17
1998-1999	1.36	0.22	1.09	0.05
1999-2000	0.70	0.08	0.76	-0.14
2000-2001	0.93	0.08	0.79	0.06
2001-2002	1.74	0.26	1.21	0.27
2002-2003	1.89	0.39	1.49	0.01
2003-2004	1.41	0.26	1.18	-0.03
2004-2005	1.70	0.32	1.33	0.05
MEDIA	1.39	0.24	1.14	0.02

(1) Signo positivo: Salida hacia el Llano; Signo negativo: Entrada desde el Llano

(2) Signo positivo: Incremento de almacenamiento; Signo negativo: Vaciado

En la Figura 18 se muestra, de forma gráfica, la evolución temporal de los diferentes términos del balance.

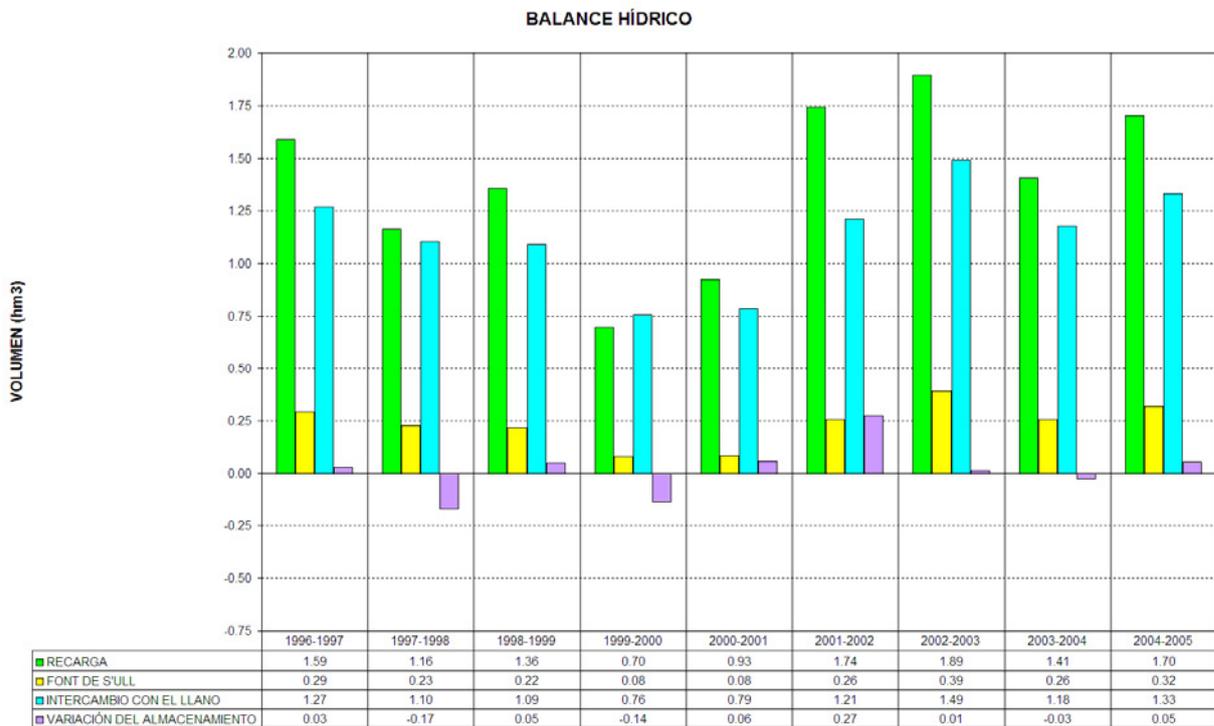


Figura 18. Balance hídrico del acuífero de Crestatx (régimen natural)

Las conclusiones más relevantes de los datos del balance hídrico del acuífero de Crestatx en régimen natural serían las siguientes:

- En régimen natural, el principal mecanismo de descarga de las aguas subterráneas del acuífero de Crestatx sería la transferencia lateral de recursos hacia el Llano de Inca-Sa Pobla.
- El responsable del secado de la Font de S'Ull y de las galerías relacionadas son los bombeos a que ha sido sometido el acuífero.
- Se comprueba que una buena parte del vaciado a que ha sido sometido el acuífero por los bombeos se produjo antes del comienzo del periodo simulado, puesto que la variación neta del almacenamiento del acuífero en régimen natural no es significativamente diferente de la correspondiente al régimen influenciado.

Para establecer los niveles iniciales en esta pasada del modelo en régimen natural se utilizó el mismo método que en el caso del régimen influenciado: realizar una pasada previa en régimen permanente con los valores medios de los factores considerados.

5.2. VACIADO DEL ACUÍFERO PRODUCIDO POR LOS BOMBEOS

Para el establecimiento del vaciado del acuífero producido por los bombeos que han tenido lugar en el acuífero de Crestatx con el modelo numérico realizado hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Previamente al comienzo del periodo modelado en régimen transitorio (enero de 1996) ya se estaban produciendo extracciones en el acuífero de Crestatx por parte de 5 pozos de ACASA. Por lo tanto, en el acuífero ya se habría producido un vaciado previo a dicho periodo.
- En 1997 comienza el bombeo desde los pozos de Son Vila y S'Ubach, por lo que a partir de ese momento se producirá un vaciado adicional del acuífero.

5.2.1. Cálculo del vaciado inicial del acuífero

Para calcular, de forma aproximada, el vaciado del acuífero producido por los bombeos que tuvieron lugar antes del periodo simulado, se ha sustraído a la superficie freática inicial considerada en la simulación del régimen natural la correspondiente al régimen influenciado. Calculado de esta manera, el volumen de acuífero vaciado es de 106 hm^3 . Aplicando a este volumen de acuífero la porosidad eficaz ajustada en el modelo, que fue de 0.5%, se puede cifrar el vaciado producido por los bombeos que tuvieron lugar antes del periodo para el que se efectuó la simulación en 0.53 hm^3 de agua.

5.2.2. Evolución del vaciado del acuífero durante el periodo de ajuste

En la Figura 19 se muestran las evoluciones de la variación del almacenamiento en el acuífero de Crestatx para el periodo modelado en régimen natural y en régimen influenciado. En el primer caso la variación del almacenamiento es producida por la diferencia entre las entradas y salidas naturales de agua del acuífero, mientras que en el segundo tienen influencia los bombeos producidos en ese periodo y se parte de un vaciado inicial cuya justificación y valor se ha comentado anteriormente. La diferencia entre ambas evoluciones supone el vaciado del acuífero debido a los bombeos producidos en el mismo.

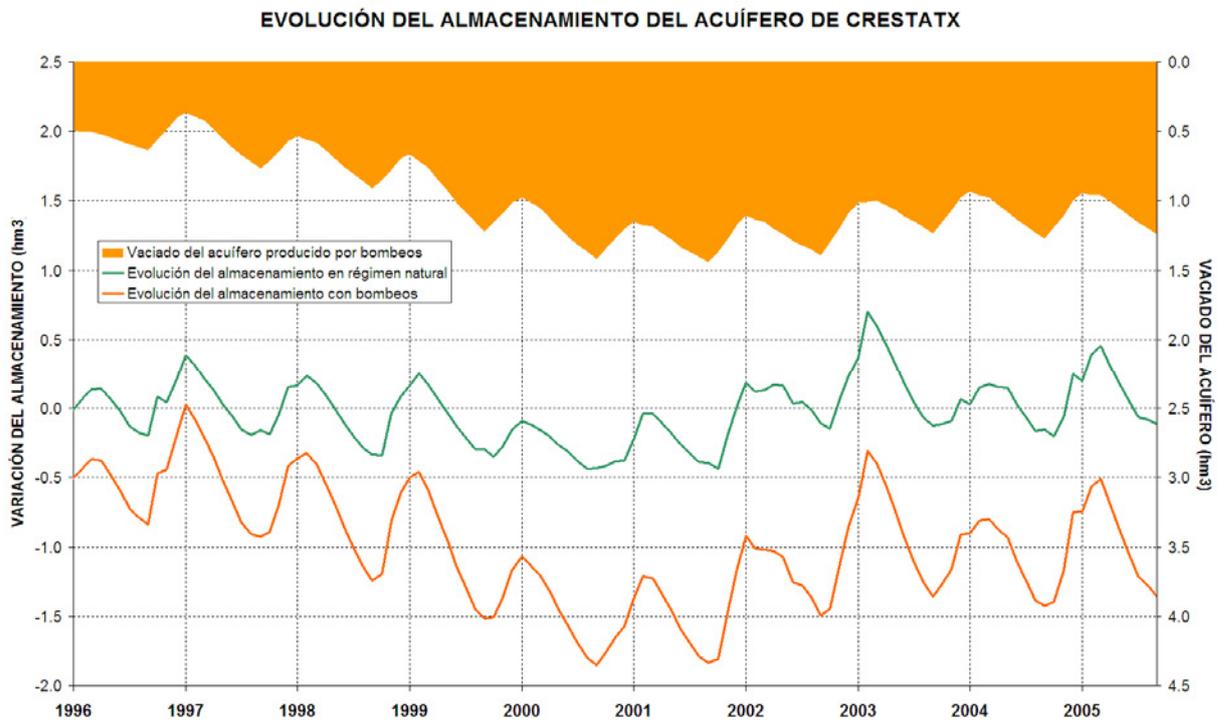


Figura 19. Evolución del vaciado del acuífero de Crestatx debido a los bombeos

Puede observarse como, partiendo de un vaciado inicial de 0.53 hm^3 , la puesta en funcionamiento de los pozos de Son Vila y S'Ubach en 1997 provoca un incremento en el vaciado que, a partir de el año 2000, oscila de forma estacional en torno a un valor ligeramente superior a 1 hm^3 .

5.3. INFLUENCIA DE LOS BOMBEOS EN LA TRANSFERENCIA DE RECURSOS ENTRE EL ACUÍFERO DE CRESTATX Y EL LLANO

En la Figura 20 se muestran las evoluciones del caudal intercambiado entre el acuífero y el Llano para el periodo simulado en régimen natural e influenciado.

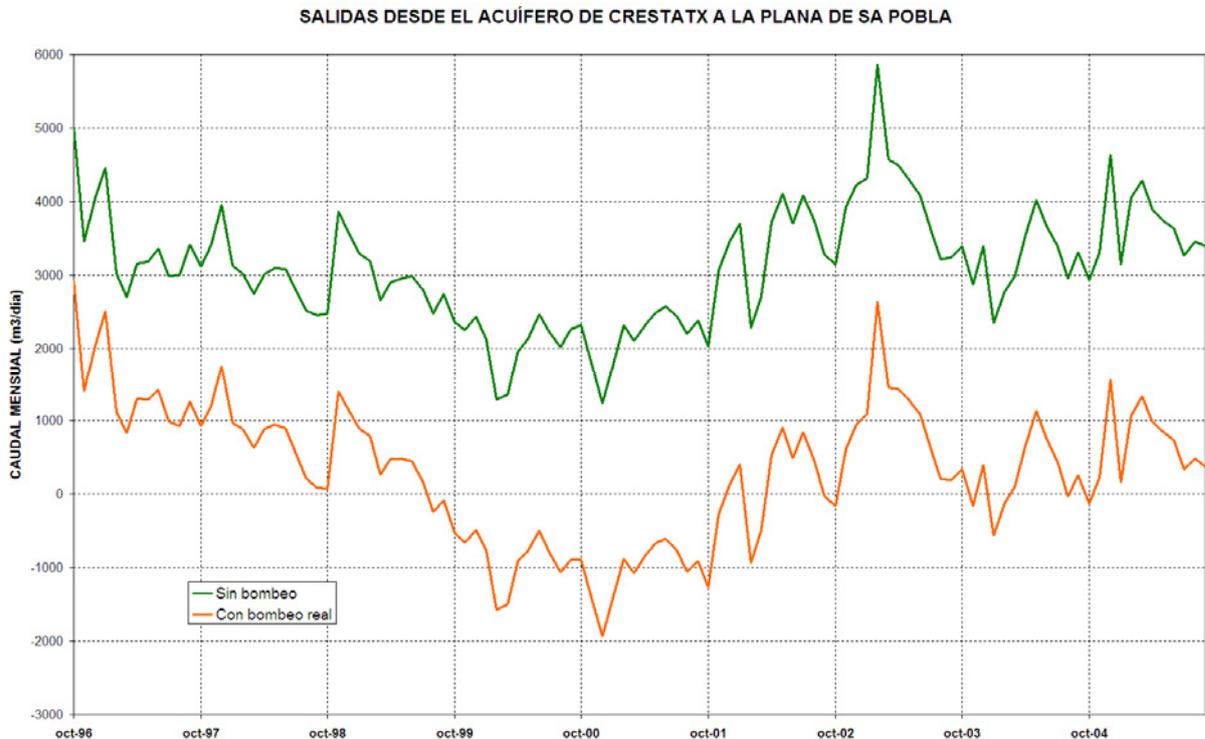


Figura 20. Influencia del bombeo en las descargas del acuífero de Crestatx hacia el Llano de Sa Pobla

Se observa cómo el bombeo en el acuífero ha producido una notable reducción en la transferencia natural de recursos del acuífero al Llano. Esta reducción se cifraría en unos 2000 m³/d antes de la puesta en funcionamiento de los pozos de Son Vila y S'Ubach en 1997, para aumentar a unos 3000 m³/d una vez estabilizada la influencia de ambos en el acuífero.

La magnitud de esta reducción de salidas al Llano habría llegado, incluso, a invertir el sentido del flujo en los dos años más secos de la serie (1999 y 2000), y puntualmente en algunos meses de los años posteriores.

5.4. COMPORTAMIENTO DEL ACUÍFERO DE CRESTATX ANTE UN EVENTUAL AUMENTO DE EXTRACCIONES

Para evaluar las consecuencias de un eventual aumento de las extracciones en el acuífero de Crestatx se ha efectuado una nueva pasada en el modelo considerando que durante el periodo de ajuste en régimen transitorio se hubiera producido un incremento de las extracciones del 30%, repartido linealmente entre los 7 pozos de explotación de ACASA en Crestatx. Como niveles iniciales de esta pasada se han utilizado los mismos que los empleados en el ajuste en régimen transitorio, lo que supone que se parte, tanto para la simulación de la serie de bombeos real como para la incrementada, de un vaciado inicial de 0.53 hm³.

Mediante la comparación entre los términos del balance para ambos escenarios que se refleja en el Cuadro 6, se puede establecer que el incremento de un 30% de los bombeos se cubriría en un 87% por aporte adicional de recursos desde el Llano al acuífero y únicamente en un 13% por aumento de vaciado del acuífero de Crestatx.

Cuadro 6. Consecuencias del incremento de extracciones en el acuífero de Crestatx

ESCENARIO	BOMBEO (hm ³ /a)	CONSECUENCIAS DEL BOMBEO		
		Anulación de la descarga por la Font de S'UII (hm ³ /a)	Flujo desde el Llano al acuífero (hm ³ /a)	Vaciado del acuífero (hm ³ /a)
BOMBEO REALES	1.33	0.24	1.02	0.08
BOMBEO INCREMENTADOS EN UN 30%	1.72	0.24	1.36	0.13
Diferencia	0.39	-	0.34	0.05

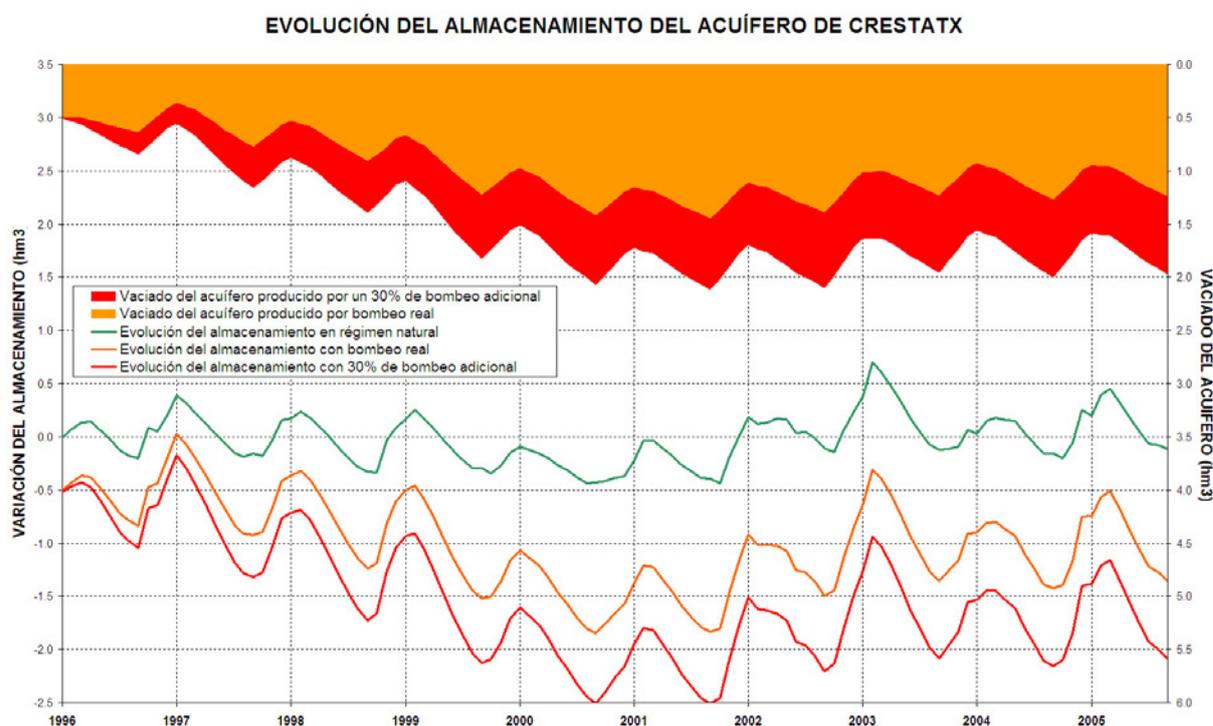


Figura 21. Evolución del vaciado del acuífero de Crestatx considerando un bombeo adicional del 30%

En la Figura 21 y Figura 22 se comparan la evolución del vaciado del acuífero y del intercambio de recursos entre el acuífero y el Llano, respectivamente, para el régimen natural, la simulación con bombes reales y la correspondiente a los bombes incrementados en un 30%. En la primera de las

figuras se aprecia que al final de la serie temporal se hubiese incrementado el vaciado del acuífero en una cuantía superior a 0.5 hm³ respecto al vaciado producido por los bombeos reales. En la segunda se aprecia cómo el incremento de los bombeos provocaría que el aporte de agua desde el Llano hacia el acuífero se hubiese producido, de forma prácticamente ininterrumpida, desde el año 1998 hasta el final de la serie.

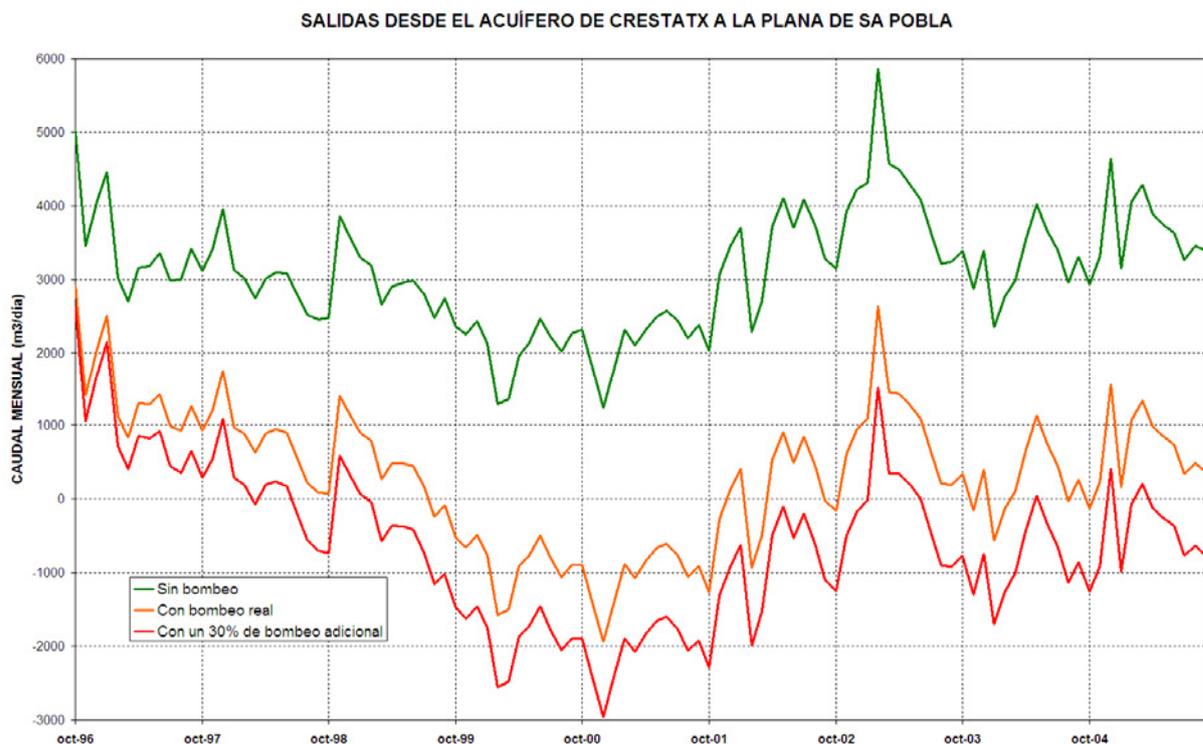


Figura 22. Influencia de un bombeo adicional del 30% en las descargas del acuífero de Crestatx hacia el Llano de Sa Pobra

5.5. SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECARGA ARTIFICIAL

El modelo de flujo subterráneo del acuífero de Crestatx ha sido utilizado para simular el comportamiento del acuífero ante una serie de escenarios de recarga artificial. El análisis de los resultados de estas simulaciones ha permitido resolver las siguientes cuestiones:

- viabilidad del escenario de recarga atendiendo a los volúmenes inyectables, número de pozos necesarios y caudales punta admisibles.
- valoración de los efectos de la recarga artificial de cara a conseguir una explotación sostenible del acuífero.

5.5.1. Antecedentes

La caracterización de los escenarios de recarga que han sido simulados mediante el modelo de flujo subterráneo se recoge en el *"Estudio de viabilidad de la recarga artificial del embalse subterráneo de Crestatx con recursos superficiales de las fuentes Les Ufanes de Gabellí"*, enmarcado en el proyecto titulado "Actuaciones de Uso Conjunto y Recarga Artificial encaminadas a mejorar la gestión ambiental y el uso sostenible de los acuíferos ligados a la arteria transversal de la Isla de Mallorca". Este proyecto se incluye en el ámbito del convenio firmado entre la Dirección General de Recursos Hídricos del Gobierno Balear y el Instituto Geológico y Minero de España.

En dicho estudio, la recarga artificial que se plantea para el acuífero de Crestatx se realizaría con excedentes procedentes de la descarga de las fuentes de Les Ufanes de Gabellí, las cuales constituyen un recurso de origen subterráneo, drenaje natural de un acuífero kárstico de marcado carácter estacional. Estas descargas son puntuales y responden a episodios de fuertes lluvias, atenuándose en un breve espacio de tiempo.

En la actualidad, la falta de infraestructuras de regulación impide el aprovechamiento de estos recursos hídricos, los cuales, a través de los cursos superficiales alcanzan la Albufera de Alcudia, desembocando al mar.

La captación de parte de estos recursos y su incorporación a un sistema de recarga artificial programado, aprovechando la capacidad de almacenamiento y regulación del acuífero de Crestatx, permitirá llevar a cabo la gestión sostenible de estas descargas, adecuando la disponibilidad de las mismas a las demandas, al tiempo que se respeta el caudal ecológico de la Albufera de la Alcudia, receptor natural del drenaje subterráneo que tiene lugar a través de las Fuentes de Les Ufanes de Gabellí.

En el proyecto se definieron distintas alternativas de captación de estas fuentes con la finalidad de minimizar al máximo cualquier posible afección al medio en el entorno de las Fuentes Ufanes de Gabellí, declarado en la actualidad Monumento Natural. De igual forma se ha operado al definir el resto de los elementos que constituirían el dispositivo de recarga artificial.

En la Figura 23 se muestra la distribución espacial del dispositivo de recarga planteado, en el que los principales elementos que lo constituyen son:

- Elementos de regulación y decantación
 - Embalse de regulación (Cantera de Coma S'aigua)
 - Dispositivo de decantación
- Elementos de conducción.
 - Captación

- Conducción desde la captación al elemento intermedio de regulación
- Aliviadero
- Conducción desde el embalse de regulación hasta el dispositivo de decantación
- Impulsión desde el dispositivo de decantación hasta la planta de recarga.
- Planta de recarga
 - Sondeos de inyección
 - Dispositivo de medida y control

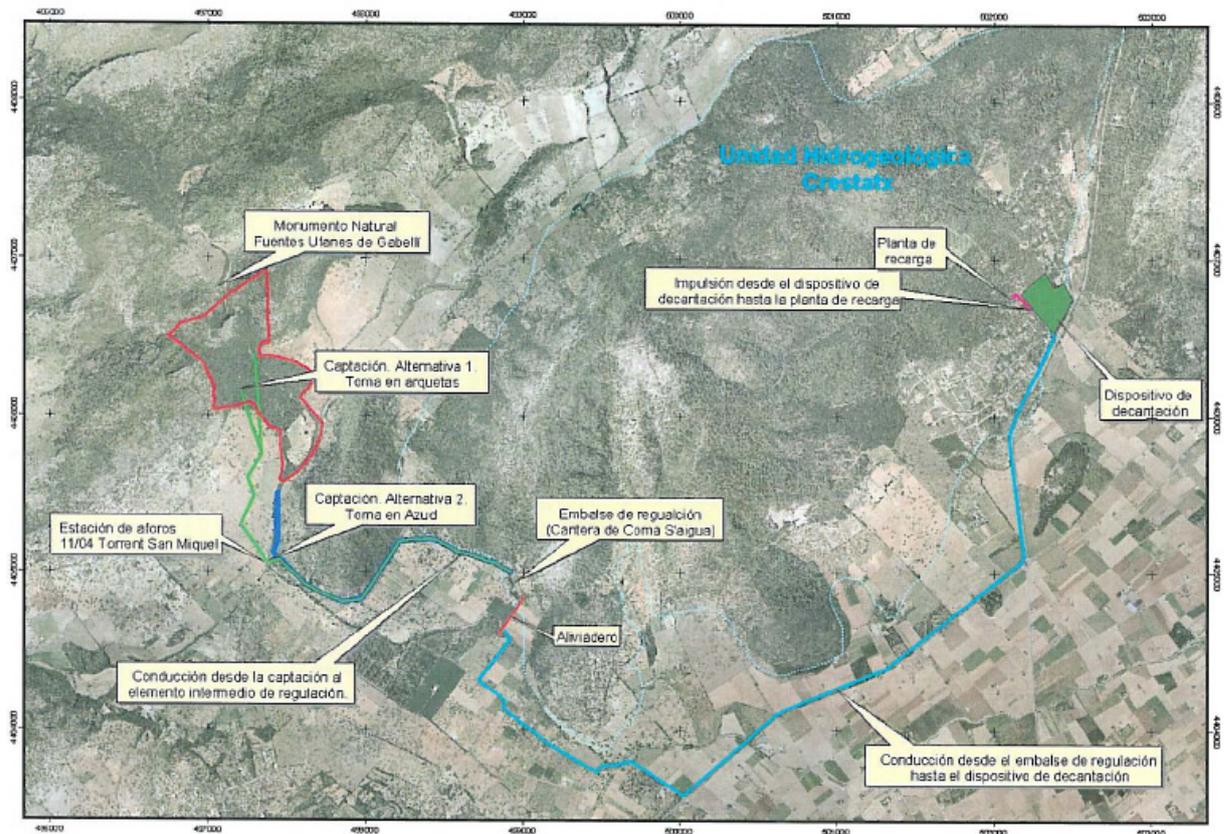


Figura 23. Localización de los elementos del dispositivo de recarga artificial propuesto

El dispositivo de recarga artificial diseñado constituye un sistema mixto, en el que se combinan infraestructuras hidráulicas superficiales y subterráneas, aprovechando de esta forma los factores positivos técnico-ambientales que proporcionan cada uno de los sistemas. Por un lado las infraestructuras superficiales permiten la captación, transporte y regulación de los recursos de una manera rápida y controlada, al mismo tiempo que se reutiliza un espacio medioambientalmente

degradado, como es la cantera de Coma de S'aigua y se crea un humedal artificial que funciona como infraestructura de decantación, otorgando, de esta forma, un valor ecológico y social añadido al entorno. Por otro lado, la utilización de pozos de inyección permite reducir costes de inversión, al necesitar mucho menos suelo, muy caro en la isla de Mallorca, que las infraestructuras de recarga de tipo superficial. Además, el aprovechamiento del acuífero del Crestatx como embalse subterráneo, permitiría regular el recurso, adaptándolo a la demanda, reduciendo el coste que supone la construcción de un embalse superficial y eliminando las pérdidas por evaporación ligadas a este tipo de infraestructura. Al mismo tiempo, la recarga artificial del acuífero de Crestatx permitiría aumentar el volumen de extracciones actual, modulando este incremento en función de los periodos de recarga.

En base a las conclusiones obtenidas del análisis de la serie de aportaciones registradas en la estación de aforos E 11/04 (Torrent de San Miquel), y de una primera evaluación de las características intrínsecas del acuífero receptor, previa a la construcción y ajuste del modelo numérico de flujo, se establecieron distintos escenarios de trabajo, para los cuales se evaluó la capacidad de regulación del sistema y la garantía del caudal disponible para ser recargado.

Los escenarios de trabajo evaluados, se definieron en función de los siguientes parámetros fundamentales:

Capacidad de almacenamiento del elemento intermedio de regulación. En el dispositivo de recarga planteado se consideró la opción de incrementar la capacidad de embalse actual de la cantera mediante la construcción de un muro de recrecimiento que aumentase la cota de rebose en 5 y 10 m. De esta manera la capacidad de embalse útil correspondiente a la cota de rebose natural (41 m.s.n.m.), que es de 0.042 hm³, sería del orden de 0.10 hm³ para una cota de rebose de 46 m.s.n.m. y de 0.22 hm³ para una cota de rebose de 51 m.s.n.m.

Capacidad de la toma. Se definió en función de los caudales instantáneos observados en la serie de aportaciones de la estación E 11/04. Los valores considerados en el análisis de la regulación para este parámetro fueron 1, 2 y 3 m³/s, correspondiendo con los caudales del 50, 75 y 90% de la serie.

Demanda de la planta de recarga. En función de los parámetros hidrodinámicos bibliográficos del acuífero de Crestatx y de la capacidad de infiltración del mismo, calculada esta última de forma analítica mediante la aplicación de las fórmulas de Jacob y Dupuit, se establecieron 3 escenarios de recarga en los cuales los caudales inyectados serían de 100, 150 y 200 l/s.

El análisis de la capacidad de regulación del sistema se llevó a cabo partiendo de la serie de aportaciones diarias registradas en la estación de aforos E 11/04 (Torrent de San Miquel) para el periodo septiembre de 1976-octubre de 2007. De la serie diaria de caudales iniciales se desestimaron los días con un caudal superior a 5.61 m³/s, ya que se consideró que caudales superiores a este valor son susceptibles de acarrear un contenido de sólidos en suspensión superior a 2 mg/l, valor adoptado

en el marco del presente estudio, como valor de referencia máximo aceptable para poder asegurar un correcto funcionamiento del dispositivo de recarga artificial diseñado.

De esta forma, combinando los factores expuestos, se analizaron un total de 9 escenarios de regulación, obteniéndose para cada uno de ellos el volumen anual regulado, la garantía de disponibilidad del recurso y el número de días con fallo en el suministro a la planta de recarga, que se muestran en la Figura 24.

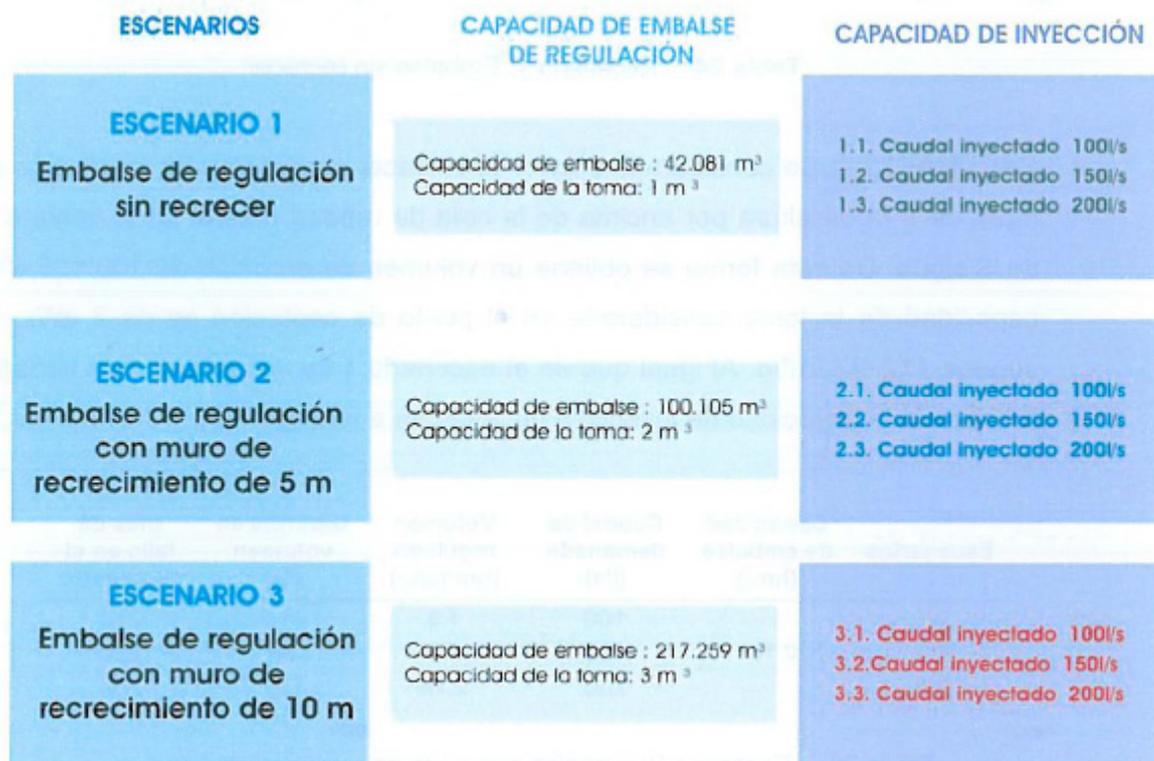


Figura 24. Escenarios de regulación considerados en el estudio de viabilidad de la recarga artificial

De cara a su aplicación en el modelo de flujo, para cada uno de estos escenarios el estudio proporciona la serie diaria de caudales inyectables desde octubre de 1976 hasta diciembre de 2007.

5.5.2. Planteamiento inicial para la simulación de la recarga artificial

Con el objetivo de introducir las mínimas incertidumbres posibles a la hora de valorar con el modelo de flujo los efectos de un escenario de recarga artificial se decidió efectuar la simulación del mismo para el periodo considerado durante el ajuste en régimen transitorio del modelo, es decir, entre enero de 1996 y septiembre de 2005. De esta forma, se dispondrá, a efectos comparativos, de las series hidrológicas mensuales (niveles piezométricos, descarga al Llano, drenaje por la Font S'UII) proporcionadas por el modelo para 3 situaciones:

- régimen natural (sin bombeos)
- régimen influenciado (con bombeos reales)
- escenario de recarga (con bombeos reales + recarga artificial)

A la vista de que la explotación media anual del acuífero de Crestatx durante ese periodo se cifró en 1.33 hm^3 , y que, según los resultados del modelo, el vaciado producido por el bombeo en el acuífero se sitúa ligeramente por encima de 1 hm^3 , se decidió simular inicialmente una alternativa cuyo volumen anual medio inyectable para el periodo considerado fuese próximo a esas cantidades. Por otra parte, se considero conveniente seleccionar una alternativa en la que la capacidad de inyección no fuese muy elevada. Según estos condicionantes, la Alternativa seleccionada fue la denominada 1.1.

La Alternativa 1.1 presenta las siguientes características:

- Se utiliza la cantera de Coma de S'aigua con su capacidad de almacenamiento actual, es decir, sin recrecimiento, con lo que la capacidad de embalse es de unos 42.000 m^3 .
- La capacidad de la toma se cifra en $1 \text{ m}^3/\text{s}$.
- El dispositivo de recarga consiste en un único pozo de inyección de 450 m de profundidad y 600 mm de diámetro, situado en la zona de explotación principal del acuífero de Crestatx. La cota de emboquille de dicho sondeo sería próxima a los 35 m.s.n.m.

Para la simulación de este escenario de recarga mediante el modelo numérico de flujo se introdujo en la pasada final del ajuste en régimen transitorio, es decir, en la que se consideran los bombeos reales producidos en el acuífero durante el periodo simulado (enero de 1996 a septiembre de 2005), condición de pozo de recarga en la celda correspondiente a la situación prevista para dicho sondeo.

Los valores de caudal inyectado en el modelo se obtuvieron mediante agregación a nivel mensual de los valores diarios originales proporcionados por el estudio de viabilidad de la recarga. Para el periodo que se simulará, el valor medio de los recursos inyectados se cifraría en $1.08 \text{ hm}^3/\text{a}$.

5.5.3. Simulación de la Alternativa 1.1

El resultado principal de la simulación de la Alternativa 1.1 mediante el modelo de flujo es que el acuífero no es capaz de aceptar la totalidad del caudal inyectable, produciéndose en los periodos de inyección ascensos del nivel de agua por encima de la superficie del terreno ("rebose" o "encharcamiento") en una amplia zona que rodea al pozo de inyección, cuya cota de emboquille se situaría en torno a los 35 m.s.n.m.

Esta circunstancia puede apreciarse en la Figura 25, en la que se observa que el vértice del domo de inyección en torno al pozo de recarga se sitúa por encima de la cota 70 m.s.n.m.

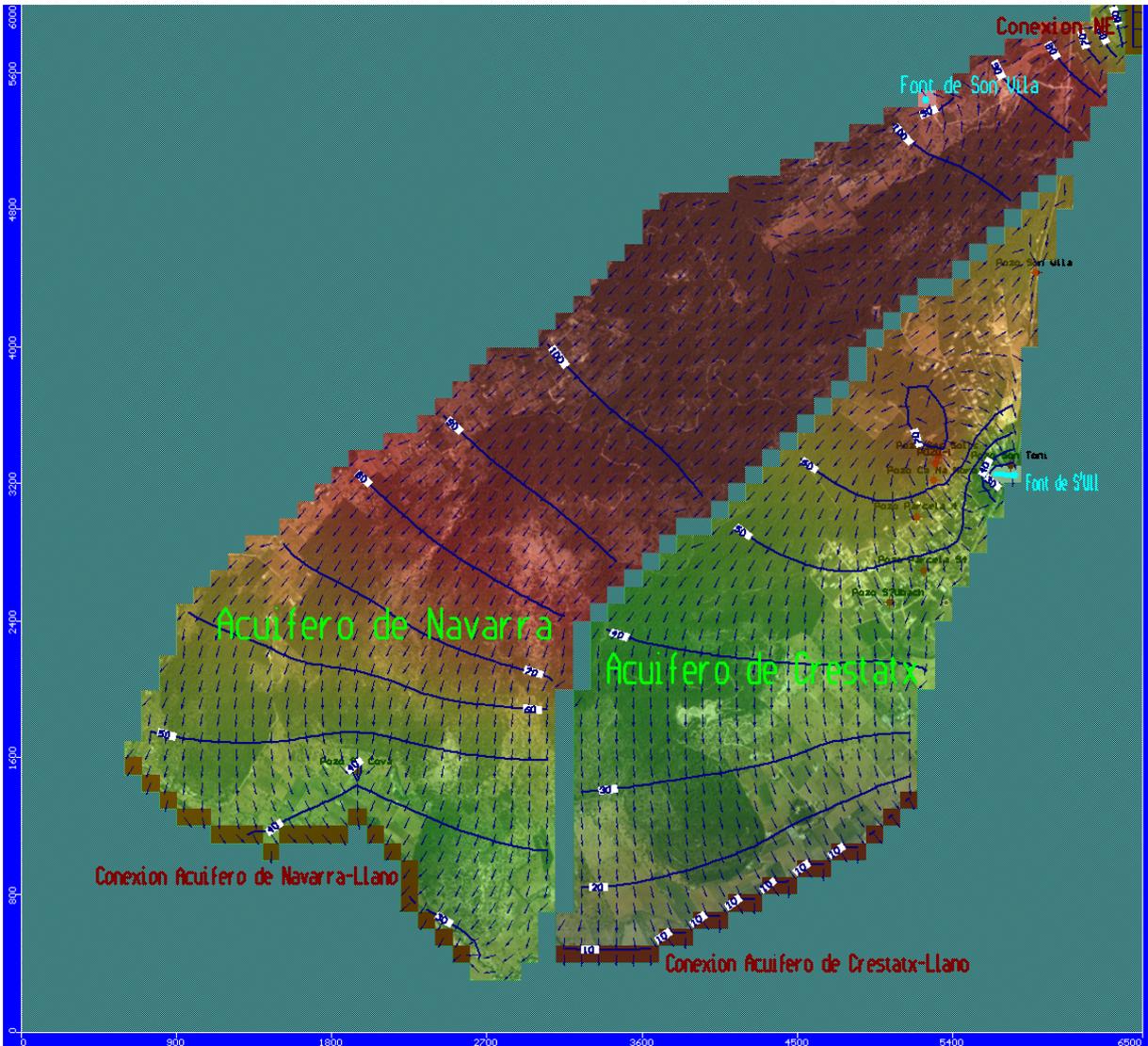


Figura 25. Simulación de la Alternativa 1.1 (único pozo de recarga con caudal inyectable máximo de 100 l/s)

La explicación de esta contradicción entre el estudio de viabilidad de la recarga, según el cual un caudal de inyección de 100 l/s en un único pozo sería admitido por el acuífero, y los resultados del modelo reside en la toma en consideración en cada uno de ellos de diferentes valores de los parámetros hidrogeológicos del acuífero. En el Cuadro 7 se muestran los valores de los parámetros hidrogeológicos del acuífero utilizados en los cálculos analíticos realizados en el estudio de viabilidad de la recarga para determinar el máximo caudal inyectable, y se comparan con los valores procedentes del ajuste del modelo del acuífero de Crestatx efectuado en el presente estudio. Se aprecia que los valores de permeabilidad, transmisividad, porosidad eficaz y difusividad procedentes del ajuste del modelo son sensiblemente inferiores a los utilizados en los cálculos analíticos

realizados con anterioridad. En definitiva, el acuífero reproducido por el modelo tiene unas peores características hidrodinámicas que el considerado en el estudio de las alternativas de recarga.

Cuadro 7. Comparación de parámetros hidrogeológicos utilizados

Parámetros hidrogeológicos	Estudio de viabilidad de la recarga	Modelo de flujo ajustado
Permeabilidad (m/d)	0.58	0.35 (máx.)
Transmisividad (m ² /d)	400	210
Porosidad eficaz (%)	2	0.5
Difusividad (m ² /d)	20000	42000

Respecto a la cuestión de cual de los dos conjuntos de parámetros hidrogeológicos representa mejor las características hidrodinámicas del acuífero de Crestatx, cabe efectuar un comentario respecto al tipo de explotación a que es sometido el acuífero. La principal explotación del acuífero de Crestatx corresponde a los 7 pozos de bombeo pertenecientes a la empresa ACASA, que extraen, en conjunto, en torno a 1 hm³/a, lo que significaría un caudal continuo cercano a los 100 l/s. El pozo más productivo de ACASA (Ca Na Mora) ha presentado un caudal medio de 12 l/s considerando el periodo 1990-2003, mientras que el caudal máximo mensual ha sido de 21 l/s. En estas circunstancias, parece poco probable que, por ejemplo, en este pozo, el más productivo de los perforados en el acuífero de Crestatx, se pudiese inyectar cerca de 1 hm³/a, lo que supondría un caudal medio de 31 l/s y que durante algunos meses el caudal inyectado fuese de 100 l/s. En definitiva y como conclusión, se considera que el acuífero de Crestatx podría recargarse artificialmente de una forma similar a como es explotado por lo que respecta a los caudales anuales y punta implicados, y al número de pozos necesarios.

5.5.4. Simulación de la Alternativa 1.1 considerando 5 pozos de recarga

Teniendo en cuenta la reflexión efectuada en el apartado precedente se efectuó una nueva pasada del modelo considerando la misma disponibilidad de caudales que en el caso anterior, pero repartida entre 5 pozos de inyección, de las mismas características que el correspondiente a la Alternativa 1.1, alineados según una dirección NE-SO y separados entre si una distancia aproximada de 400 m. De esta forma, el caudal máximo inyectado en cada pozo sería de 20 l/s, manteniéndose el valor medio de caudal inyectado durante el periodo de simulación en 1.08 hm³/a.

Considerando este escenario de recarga, el modelo sigue prediciendo ascensos del nivel del agua por encima de la superficie del terreno durante los periodos de inyección, de menor cuantía pero en una mayor extensión del acuífero, tal como se aprecia en la Figura 26.

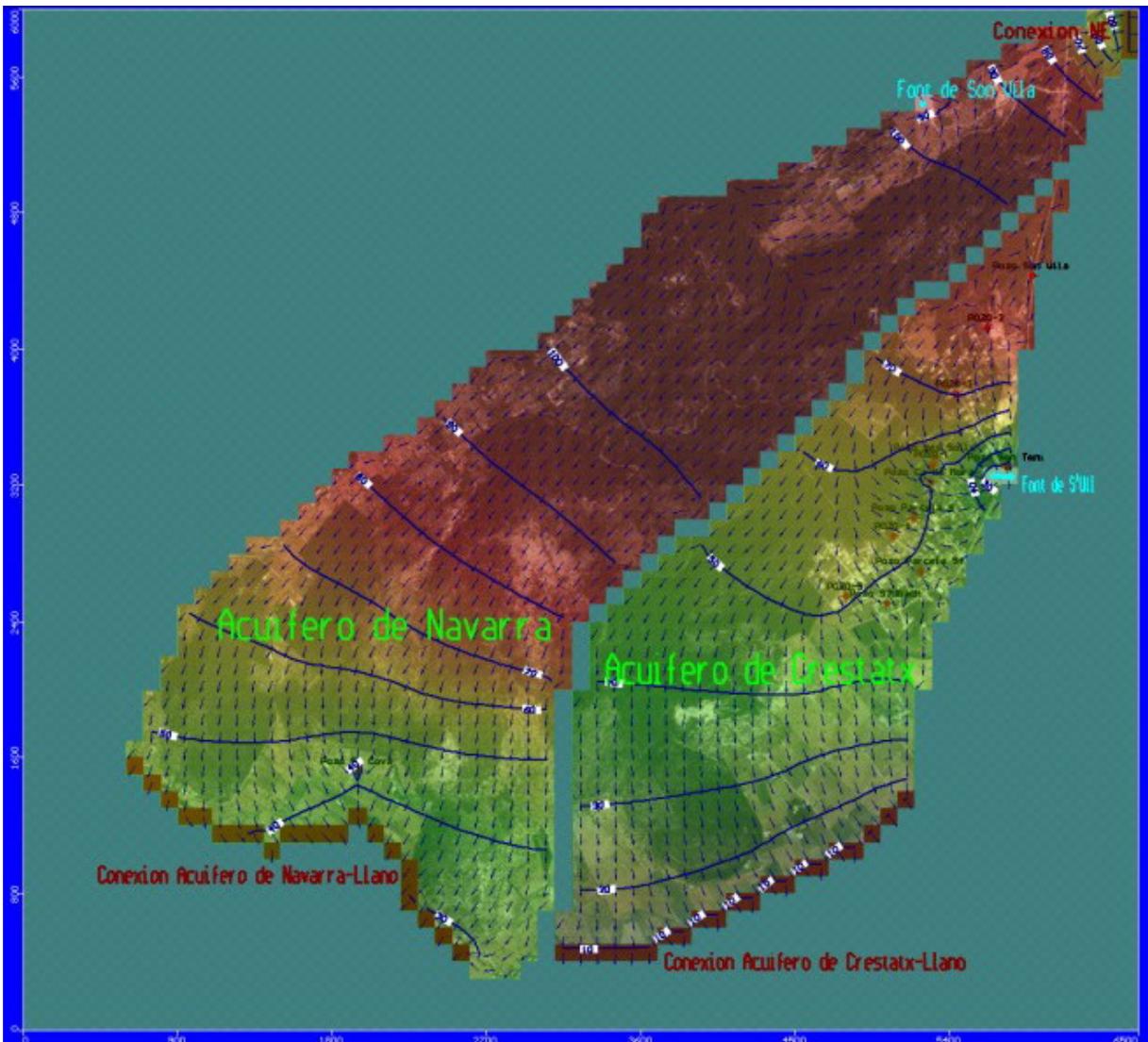


Figura 26. Simulación de la Alternativa 1.1 con 5 pozos de recarga

5.5.5. Simulación de la Alternativa 1.1 considerando 5 pozos de recarga y un caudal máximo de inyección de 10 l/s

A la vista de los resultados de la simulación anterior, considerando que resultaría difícil la construcción de más pozos de inyección, y con el objetivo de simular un escenario de recarga "realista" en el que no se produzcan ascensos del nivel del agua por encima de la superficie del terreno durante los periodos de inyección, se efectuó una nueva pasada del modelo considerando los mismos 5 pozos de recarga que en la pasada anterior pero limitando el caudal mensual inyectado en cada uno de ellos a un máximo de 10 l/s, lo que supondría un truncamiento por la parte superior de la serie de caudales inyectables. En definitiva, supondría no utilizar todo el caudal disponible para la

recarga: frente a una inyección media anual de 1.08 hm³/a, este truncamiento supondría la inyección de 0.70 hm³/a, es decir, el 65% del caudal disponible para la inyección en la Alternativa 1.1.

Los resultados del modelo para esta simulación muestran la consecución del objetivo perseguido, tal como se muestra en la Figura 27, por lo que este escenario de recarga se considera viable.

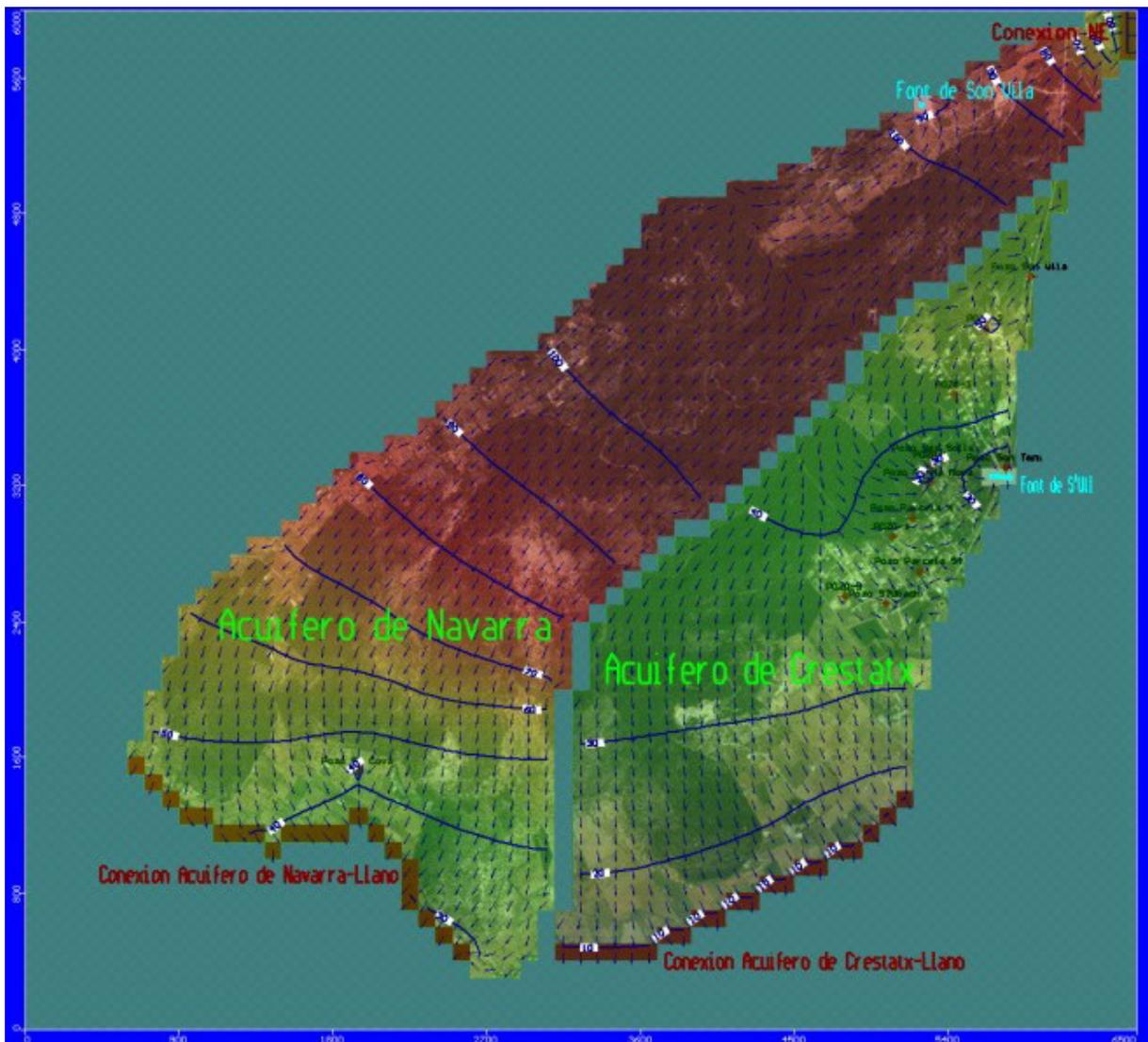


Figura 27. Simulación de la Alternativa 1.1 con 5 pozos de recarga y caudal máximo de inyección individual de 10 l/s

5.5.6. Análisis de los resultados de la simulación del escenario de recarga viable

A continuación se efectuará el análisis de los resultados de la simulación mediante el modelo numérico de flujo del escenario de recarga viable mediante su comparación con los resultados de la simulación del acuífero en régimen natural (sin bombeo) e influenciado (con los bombeos reales).

El análisis se efectuará atendiendo a dos aspectos fundamentales: el balance hídrico anual del periodo de simulación considerado y las series mensuales de descarga del acuífero de Crestatx a través de la Font S'Ull y mediante la transferencia subterránea al Llano.

5.5.6.1. Balance hídrico

En el Cuadro 8 se muestran los balances hídricos del acuífero de Crestatx para el régimen natural, el régimen influenciado y el escenario de recarga contemplado.

Cuadro 8. Comparación de los balances hídricos de Crestatx

SIMULACIÓN	BALANCE DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (hm3)																	
	RECARGA NATURAL			RECARGA ARTIFICIAL			BOMBEO			FONT DE S'ULL			LLANO (1)			ALMACEN. (2)		
	Natural	Influenciado	Recarga art.	Natural	Influenciado	Recarga art.	Natural	Influenciado	Recarga art.	Natural	Influenciado	Recarga art.	Natural	Influenciado	Recarga art.	Natural	Influenciado	Recarga art.
1996-1997	1.59	1.59	1.59	-	-	0.75	-	1.15	1.15	0.29	-	0.13	1.27	0.55	1.06	0.03	-0.11	-0.01
1997-1998	1.16	1.16	1.16	-	-	0.73	-	1.17	1.17	0.23	-	0.07	1.10	0.30	0.92	-0.17	-0.31	-0.27
1998-1999	1.36	1.36	1.36	-	-	0.59	-	1.45	1.45	0.22	-	0.02	1.09	0.18	0.81	0.05	-0.27	-0.34
1999-2000	0.70	0.70	0.70	-	-	0.16	-	1.35	1.35	0.08	-	0.00	0.76	-0.32	0.15	-0.14	-0.34	-0.64
2000-2001	0.93	0.93	0.93	-	-	0.56	-	1.28	1.28	0.08	-	0.00	0.79	-0.38	0.06	0.06	0.03	0.15
2001-2002	1.74	1.74	1.74	-	-	1.07	-	1.40	1.40	0.26	-	0.00	1.21	0.02	0.62	0.27	0.32	0.80

Cuadro 8. Comparación de los balances hídricos de Crestatx

	BALANCE DEL ACUÍFERO DE CRESTATX (hm ³)																	
	RECARGA NATURAL			RECARGA ARTIFICIAL			BOMBEO			FONT DE S'ULL			LLANO (1)			ALMACEN. (2)		
2002-2003	1.89			-			-			0.39			1.49			0.01		
		1.89			-			1.38			-			0.35			0.17	
			1.89			0.96			1.38			0.16			1.28			0.04
2003-2004	1.41			-			-			0.26			1.18			-0.03		
		1.41			-			1.38			-			0.10			-0.07	
			1.41			0.83			1.38			0.02			0.99			-0.15
2004-2005	1.70			-			-			0.32			1.33			0.05		
		1.70			-			1.38			-			0.24			0.08	
			1.70			0.62			1.38			0.06			1.06			-0.18
MEDIA	1.39			-			-			0.24			1.14			0.02		
		1.39			-			1.33			-			0.12			-0.06	
			1.39			0.70			1.33			0.05			0.77			-0.07

(1) Signo positivo: Salida hacia el Llano; Signo negativo: Entrada desde el Llano

(2) Signo positivo: Incremento de almacenamiento; Signo negativo: Vaciado

Las conclusiones que pueden extraerse del análisis de los datos son las siguientes:

- En el escenario de recarga considerado y para el periodo de cálculo de los balances (1996/97-2004/05), el caudal anual medio inyectado ascendería a 0.70 hm³/a. Esta cantidad representaría el 65% del total del caudal inyectable según la Alternativa 1.1 (1.08 hm³/a), y el 53% del caudal medio realmente extraído a lo largo de esos 9 años (1.33 hm³/a).
- El escenario de recarga considerado supondría que el acuífero de Crestatx volvería a drenarse a través de la Font de S'Ull, aunque únicamente en 6 años de los 9 simulados y con un caudal muy inferior al que correspondería al régimen natural (0.05 hm³/a frente a 0.24 hm³/a). En la realidad, la Font de S'Ull ha permanecido seca prácticamente desde el inicio de los bombeos en el acuífero.
- Lo que sí consigue el escenario de recarga considerado es que se recupera, en términos anuales, el carácter excedentario del acuífero de Crestatx frente al acuífero del Llano de Sa Pobla.

Considerando el régimen natural, en todos los años simulados habría transferencia desde el acuífero de Crestatx al Llano; el caudal medio anual de esta transferencia sería de 1.14 hm³/a.

Si se considera el régimen influenciado, el balance entre el caudal transferido desde el acuífero de Crestax al Llano y viceversa desciende a 0.12 hm³/a, habiéndose producido inversión neta anual de flujo en 2 de los 9 años considerados.

En el escenario de recarga artificial simulado y en términos anuales, el acuífero de Crestatx es excedentario todos los años, ascendiendo el caudal medio anual de transferencia a 0.77 hm³/a, lo que supone el 68% del correspondiente al régimen natural.

5.5.6.2. Descarga por la Font de S'Ull

En la Figura 28 se han representado las series mensuales de caudales drenados por la Font de S'Ull en régimen natural y en la simulación del escenario de recarga. Cabe recordar que durante la simulación del régimen influenciado, y tal como ocurrió en realidad, la Font de S'Ull permanece totalmente seca.

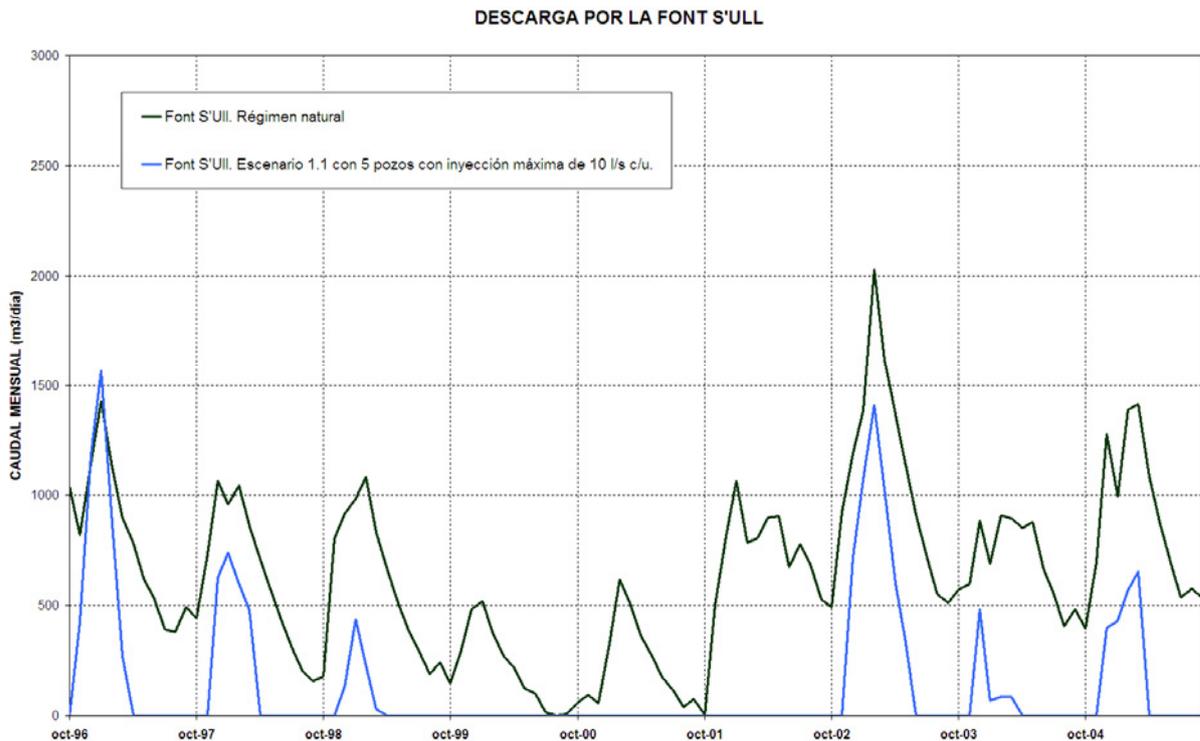


Figura 28. Evolución de caudales drenado por la Font de S'Ull

Tal como se comentó en el apartado anterior, la recarga artificial simulada provocaría que la Font de S'Ull hubiese vuelto a manar, aunque no durante todo el periodo de tiempo simulado. El volumen drenado hubiese sido, además, sensiblemente inferior al correspondiente al régimen natural.

5.5.6.3. Transferencia al Llano de Sa Pobla

En la Figura 29 se han representado las series mensuales de intercambio hídrico entre el acuífero de Crestatx y el acuífero del Llano de Sa Pobla correspondientes a las simulaciones del régimen natural, del régimen influenciado y del escenario de recarga artificial.

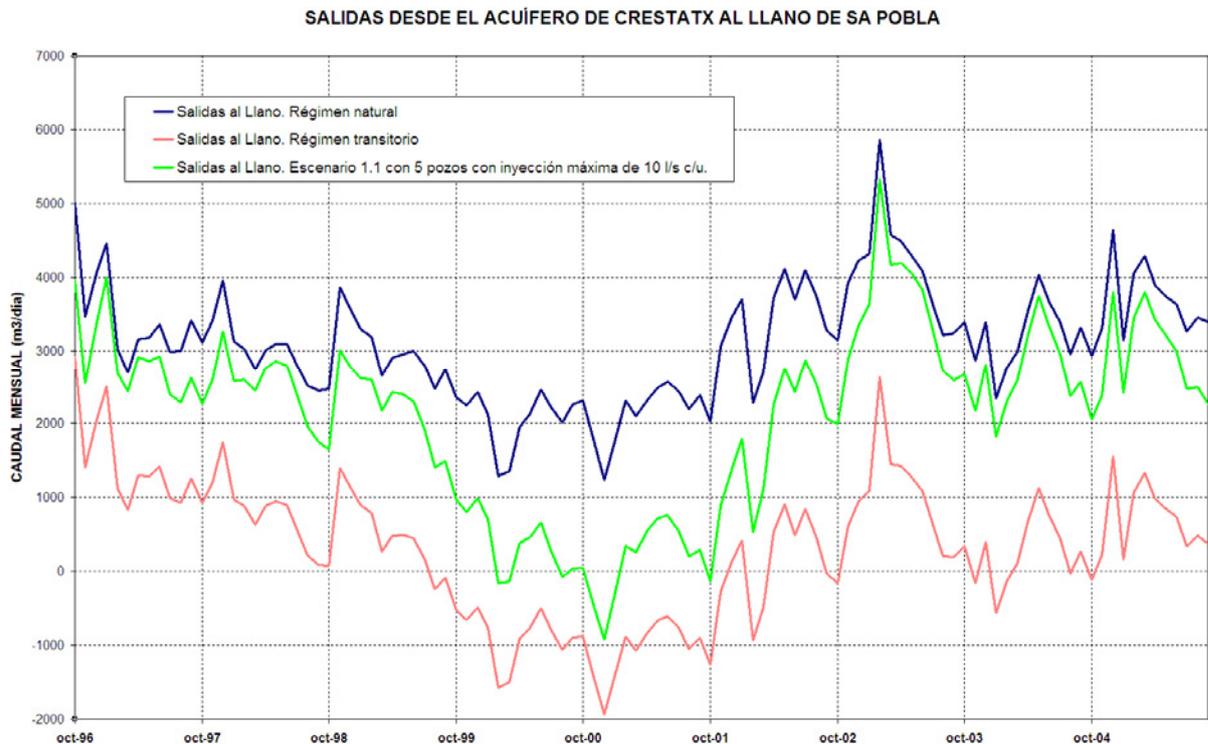


Figura 29. Evolución de los caudales intercambiados entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Palma

Puede apreciarse que, con el escenario de recarga considerado, se consigue prácticamente reproducir la serie de caudales de transferencia del régimen natural para los primeros y últimos años del periodo simulado, mientras que en los años intermedios, a pesar de que la transferencia hacia el acuífero del Llano se reduce sensiblemente con respecto al régimen natural, únicamente se invierte durante dos periodos de escasos meses cada uno de ellos, mientras que en el régimen influenciado esta inversión de flujo tiene lugar durante un periodo de tiempo superior a los dos años.

5.5.7. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos mediante la simulación de una serie de escenarios de recarga artificial con el modelo numérico de flujo del acuífero de Crestatx cabe concluir lo siguiente:

- Se considera que la capacidad de inyectabilidad que se atribuye a los sondeos que constituyen la planta de recarga del dispositivo proyectado en el "*Estudio de viabilidad de la recarga artificial del embalse subterráneo de Crestatx con recursos superficiales de las fuentes Les Ufanes de Gabellí*" está sobreestimada, por lo que el número de sondeos necesario para las diferentes alternativas analizadas en dicho estudio sería sensiblemente superior.

- No parece razonable plantear alternativas de recarga cuyos volúmenes anuales inyectables sean sensiblemente superiores a los volúmenes anuales bombeados, por cuanto el vaciado del acuífero producido por los bombeos en el acuífero de Crestatx es del orden del volumen anual medio de bombeo durante la explotación del acuífero.
- En el caso de que se produjese un aumento de los bombeos en el acuífero y, por consiguiente, un mayor grado de vaciado del mismo, la capacidad del acuífero de admitir recarga artificial aumentaría, aunque siempre con el límite del volumen bombeado.
- El efecto beneficioso de la recarga artificial en el acuífero de Crestatx no sería únicamente la posibilidad de conseguir una mayor explotación del mismo, sino que además se podría conseguir, bajo determinadas circunstancias, que volviese a manar la Font de S'Ull e impedir la inversión del flujo subterráneo que pudiera tener lugar entre el acuífero de Crestatx y el Llano de Sa Pobla.

6. BIBLIOGRAFÍA

Gelabert, B. (2006). *Cartografía geológica de la zona de Crestatx (Mallorca). Interpretación geológica e hidrogeológica de datos geofísicos (Técnica magneto-telúrica).*

IGME-DGRH (2008) *Estudio de viabilidad de la recarga artificial del embalse subterráneo de Crestatx con recursos superficiales de las fuentes Les Ufanes de Gabellí*

IGME-DGRH (2009). *Establecimiento del modelo conceptual de funcionamiento del Acuífero de Crestatx (Mallorca).*