

***APLICACION DE LA TECNOLOGIA  
DE LA RECARGA ARTIFICIAL  
EN EL ACUIFERO DE  
GUADIX (GRANADA)  
1.984-1.990***



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

<b>SUPER PROYECTO</b>	<b>AGUAS SUBTERRANEAS (9005 AT.60)</b>		<b>Nº</b>	
<b>PROYECTO AGREGADO</b>	<b>ASESORAMIENTO A ORGANISMOS DE CUENCA Y COMUNIDADES AUTONOMAS</b>		<b>Nº</b>	<b>87.0335</b>
<b>TITULO PROYECTO</b>	<b>PROYECTO PARA ESTUDIOS DE ASESORAMIENTO EN MATERIA DE AGUAS SUBTERRANEAS A ORGANISMOS DE CUENCA Y COMUNIDADES AUTONOMAS (1988-90).</b>			
<b>Nº PLANIFICACION</b>	<b>Nº DIVISION AGUAS, G.A.</b>			
<b>FECHA EJECUCION</b>	<b>INICIO</b>	1989	<b>FINALIZACION</b>	1990

**INFORME (Titulo):**

MAQUETA-SINTESIS SOBRE LA APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE LA RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUIFERO DE GUADIX (GRANADA) 1984-90

<b>CUENCA (S) HIDROGRAFICA(S)</b>	GUADALQUIVIR
<b>COMUNIDAD (S) AUTONOMAS</b>	ANDALUCIA
<b>PROVINCIAS</b>	GRANADA

Esta síntesis ha sido realizada por el Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE), en colaboración con las consultoras Investigaciones Geológicas y Mineras, S.A. (INGEMISA), e Internacional de Ingeniería y Estudios Técnicos, S.A. (INTECSA).

En ella ha intervenido el siguiente equipo técnico:

#### **Dirección técnica, supervisión y redacción**

##### Instituto Tecnológico GeoMinero de España

- D. Juan Antonio López Geta.- Ingeniero de minas. Jefe del Area de Desarrollo Tecnológico de la Dirección de Aguas Subterráneas y Geotecnia.
- D. Juan Carlos Rubio Campos.- Dr. en Ciencias Geológicas.

#### **Equipo colaborador**

##### Investigaciones Geológicas y Mineras, S.A.

- D. Eduardo Lupiani Moreno.- Licenciado en Ciencias Geológicas.
- D. Emilio Castillo Pérez.- Licenciado en Ciencias Geológicas.

##### Internacional de Ingeniería y Estudios Técnicos, S.A.

- D. Sebastián Delgado Moya.- Licenciado en Ciencias Geológicas.
- D. Jesús Suso LLamas .- Licenciado en Ciencias Geológicas.

El equipo técnico que ha colaborado en la realización de esta síntesis quiere agradecer a D. Alfredo Iglesias López, del ITGE, y a D. Manuel del Valle Cardenete y D. Joaquín Delgado García, de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, la iniciativa y esfuerzo que tuvieron, dando lugar a la realización de la primera fase de la recarga, en el año 1.984.

La recarga artificial de acuíferos puede definirse como el conjunto de actuaciones tendentes a potenciar la alimentación de los acuíferos y tiene por objeto incrementar la regulación de excedentes de agua, mejorar las posibles aplicaciones del agua por la introducción en el medio subterráneo de aguas de mejor calidad en origen utilizarlos, en ocasiones, como receptores de efluentes líquidos urbanos, que a la vez sirven de medio depurador de alto rendimiento, o como sistema para frenado del avance de la intrusión marina.

La recarga artificial es una técnica conocida desde antiguo, que comenzó a ser utilizada por romanos y árabes, cuando actuaban sobre las laderas, construyendo represas en cauces o sobredotaban riegos, actuaciones que aún persisten en determinadas comarcas como La Alpujarra granadina, donde se deriva el agua del deshielo para riego de praderas en cotas altas. Este sistema denominado popularmente como "careos" sirve para incrementar y mantener el caudal de los manantiales situados a media ladera.

Más recientemente la recarga artificial se ha mostrado como una herramienta eficaz en la planificación hidrológica de cuencas con escasa regulación superficial o con excedentes estacionales, mostrando su plena vigencia cuando en ellas se dan extracciones de agua subterráneas de entidad o existen riesgos de sobreexplotación o intrusión marina.

A pesar de que en España se dan multitud de áreas favorables para la recarga artificial, centradas en gran parte sobre los acuíferos de la franja mediterránea, no se han prodigado las actuaciones en ésta materia, siendo sólo de destacar las operaciones realizadas en el río Oja (La Rioja), en el valle del Esgueva, en las calcarenitas de Carmona o en el río Llobregat, muchas de ellas realizadas con posterioridad al inicio de la experiencia que se presenta.

En la línea de fomentar su aplicación, el ITGE estableció una metodología de trabajo desde el año 1983 en la que, además de impulsar diferentes ensayos de recarga en Guadix, se profundizó en el estudio de la dinámica de la recarga llegando a formular un manual de operaciones para el desarrollo de la misma, a efectos de optimizar su uso y facilitar la gestión de los dispositivos a utilizar.

Esperamos que los resultados obtenidos sirvan de incentivo para el desarrollo de ésta tecnología en otras áreas, y lleguen a incorporarse como herramienta habitual en la planificación hidrológica.

Agustín Navarro Alvargonzález  
Director de Aguas Subterráneas  
y Geotecnia

## INDICE

	<b>Pág</b>
1.- <u>PRESENTACION</u>	1
2.- <u>ANTECEDENTES</u>	3
3.- <u>DEMANDAS DE AGUA EN LA ZONA. DEFICITS EXISTENTES</u>	5
4.- <u>CARACTERISTICAS DEL ACUIFERO</u>	7
4.1.- NATURALEZA Y GEOMETRIA	7
4.2.- PIEZOMETRIA	8
4.3.- CARACTERISTICAS HIDRAULICAS	8
4.4.- ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO. BALANCE	10
5.- <u>BASES PARA LA MEJOR UTILIZACION DE LOS RECURSOS DEL ACUIFERO</u>	11
5.1.- CONSIDERACIONES SOBRE EL DRENAJE DE LA MINA DEL MARQUESADO	11
5.2.- REGULACION MEDIANTE SONDEOS	13
5.3.- RECARGA DE EXCEDENTES HIDRICOS INVERNALES	14
6.- <u>RECARGA ARTIFICIAL</u>	16
6.1.- HIDROGEOLOGIA DEL AREA DE RECARGA	16
6.2.- <u>DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE RECARGA</u>	17
6.2.1.- <u>Balsas de recarga</u>	17
6.2.2.- <u>Operaciones de control</u>	19
6.2.2.1.- Control de volúmenes infiltrados	19
6.2.2.2.- Diseño del dispositivo de control de la evolución piezométrica	20
6.2.3.- <u>Procedencia y calidad del agua de recarga</u>	23
6.2.4.- <u>Caudales disponibles</u>	23

	<b>Pág</b>
6.3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA RECARGA ARTIFICIAL	25
6.3.1.- <u>Experiencias realizadas entre Diciembre 1.984 y Marzo de 1.987</u>	25
6.3.2.- <u>Experiencia de Diciembre de 1.988 a Marzo de 1.989</u>	26
6.3.2.1.- Cronología e incidencias	26
6.3.2.2.- Climatología durante la experiencia	28
6.3.2.3.- Caudales infiltrados. Capacidad de infiltración	29
6.3.2.4.- Respuesta del acuífero a la recarga	32
6.3.2.5.- Esquema de flujo subterráneo	35
7.- <u>MODELO MATEMATICO</u>	37
7.1.- OBJETIVOS	37
7.2.- PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS	38
7.2.1.- <u>Extensión y límites</u>	38
7.2.2.- <u>Parámetros hidrogeológicos</u>	38
7.2.3.- <u>Programa utilizado</u>	40
7.3.- MODELO EN REGIMEN PERMANENTE	40
7.3.1.- <u>Condiciones iniciales</u>	40
7.3.2.- <u>Calibración y resultados</u>	41
7.4.- MODELO EN REGIMEN TRANSITORIO	42
7.4.1.- <u>Introducción</u>	42
7.4.2.- <u>Condiciones iniciales</u>	43
7.4.3.- <u>Calibración</u>	44
7.4.4.- <u>Resultados</u>	45
7.5.- SIMULACION DEL EFECTO RECARGA-BOMBEO	46
7.5.1.- <u>Planteamiento</u>	46
7.5.2.- <u>Resultados</u>	47
8.- <u>VIABILIDAD TECNICA Y ECONOMICA</u>	54
8.1.- VIABILIDAD TECNICA	54
8.2.- VIABILIDAD ECONOMICA	55
8.2.1.- <u>Inversión</u>	55
8.2.2.- <u>Costes de explotación</u>	55
8.2.3.- <u>Repercusión económica</u>	56

	<b>Pág</b>
9.- <u>MANUAL DE OPERACIONES DE LA RECARGA</u>	58
9.1.- SISTEMA DE OPERACION	58
9.2.- SISTEMA DE CONTROL	59
9.2.1.- <u>Volumen de agua infiltrado</u>	59
9.2.2.- <u>Evolución de niveles en las proximidades de las balsas</u>	60
9.2.3.- <u>Volúmenes de agua recuperados</u>	60
9.3.- MANTENIMIENTO	61
10.- <u>ASPECTOS LEGALES</u>	62
10.1.- ANTECEDENTES	62
10.2.- NORMATIVA RELACIONADA CON LA RECARGA ARTIFICIAL	65
11.- <u>BIBLIOGRAFIA</u>	70

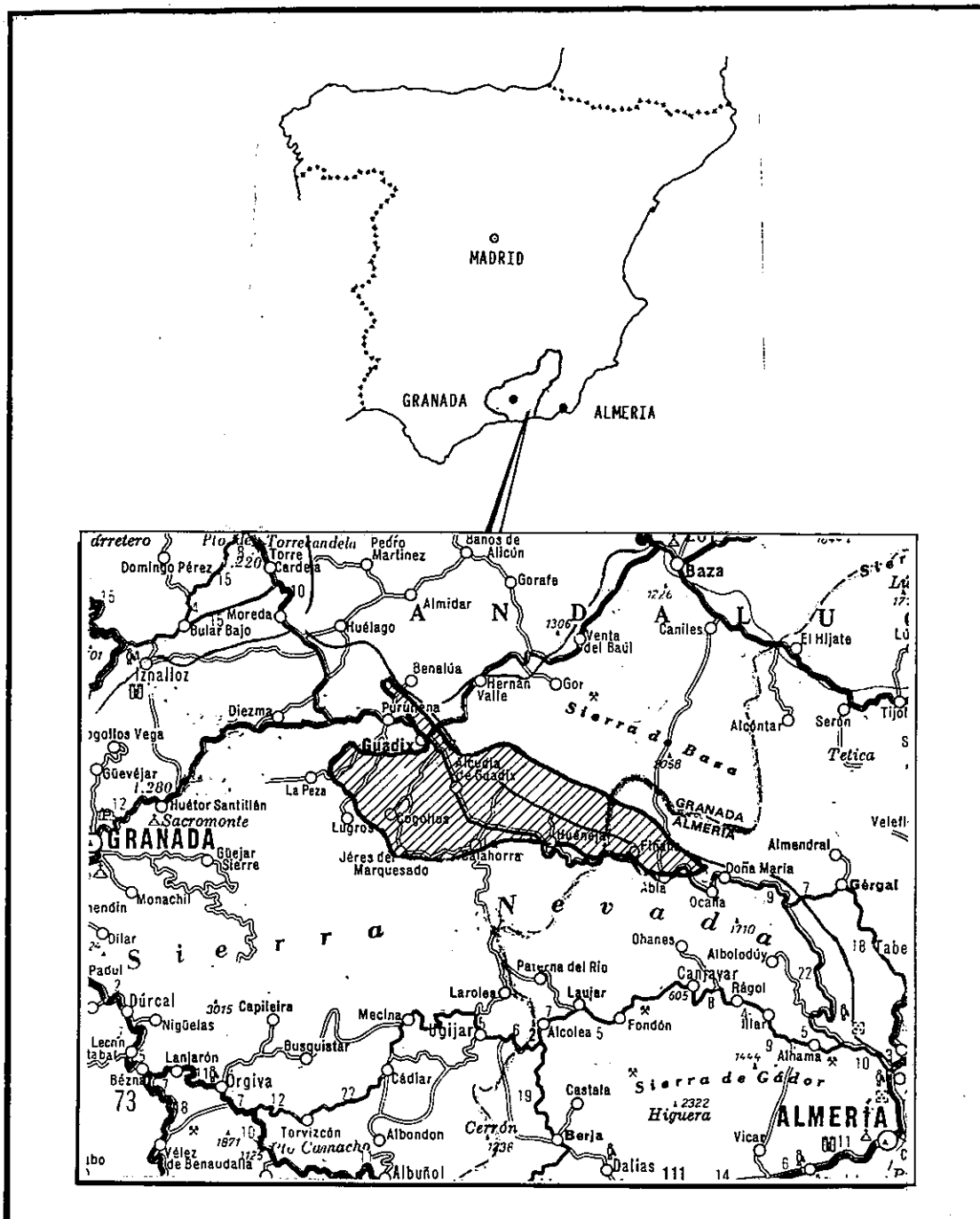


## **1.- PRESENTACION**

En el Noreste de la provincia de Granada se sitúa la Comarca de Guadix, que corresponde a una zona de economía deprimida y dependiente, mayoritariamente, de la agricultura. En ella se encuentra una superficie de 3.000 Has de regadío, a ambos márgenes del río Verde, en la que se dan situaciones de déficit hídrico en el estiaje. Ante esta situación la Administración ha diseñado un programa de mejora de los regadíos, en el que se emplearán dotaciones procedentes del acuífero de Guadix y del Embalse del Peñón de los Gitanos, de próxima construcción.

En este contexto, el ITGE ha llevado a cabo una serie de actuaciones que sirvan de apoyo a la gestión de los recursos hídricos del acuífero, por el organismo competente, entre las que se encuentran la realización de cuatro sondeos de explotación y diversas experiencias de recarga artificial, aprovechando las aguas procedentes del drenaje de la Mina de Alquife.

Todas estas actuaciones han sido realizadas en coordinación con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, a quien queremos hacer patente nuestro agradecimiento por la colaboración prestada en todo momento.



**Figura 1.- Situación del acuífero de Guadix**

En esta síntesis se recogen los resultados obtenidos en las diferentes experiencias de recarga artificial y en particular la realizada dentro del "Proyecto para la Realización de una Experiencia de Recarga Artificial en Guadix con el Dispositivo Hidráulico Actual", efectuada en el invierno de 1.988 a 1.989.

## **2.- ANTECEDENTES**

El acuífero de la Vega de Guadix y del Llano del Marquesado fué definido y estudiado por primera vez en el "Proyecto de Investigación Hidrogeológica de la Cuenca del Guadalquivir (AGL: SF/SPA 9)", realizado conjuntamente por el IGME (actual ITGE) y la FAO en 1.970; como consecuencia de este trabajo, en 1.972 se realizó el "Proyecto de Utilización de las Aguas Subterráneas para el Desarrollo Agrícola de la Zona de Guadix" (AGL: SF/SPA16, informe técnico nº 3), en el que se cuantificaron los recursos del acuífero y se realizaron anteproyectos de mejora de los actuales regadíos y de puesta en marcha de otros nuevos.

Las recomendaciones de estos proyectos incluían, entre otras, el control de bombeos para evitar la explotación desordenada del acuífero. Esta recomendación fué recogida por el Decreto 735/71 de 3 de Abril, en el que se establecía una "Zona de Explotación Controlada" (Zona nº 7) para el sector, y se limitaba el volumen de extracción a 30 Hm<sup>3</sup>/año.

Desde entonces el ITGE y a petición de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, informa sobre nuevos permisos de concesión de aguas, para lo que estableció un control sistemático de las explotaciones, y de la evolución piezométrica,

hidrométrica y de calidad del acuífero. Además siguió profundizando en su conocimiento mediante otros estudios hidrogeológicos, entre los que destacan: "Informe de Evolución Piezométrica y Estado de Explotación del Sistema Acuífero de Guadix" (1.981); "Modelo Matemático de la Depresión de Guadix" (1.981); "Proyecto para el Estudio de Optimización en el Uso de los Recursos Hidráulicos de la Vega de Guadix mediante Bombeo y Recarga Artificial del Acuífero (1.983-1.984)"; "Proyecto para el Estudio Experimental de las Relaciones Acuífero-Río (1.985)" y el "Proyecto para la Realización de una Experiencia de Recarga Artificial en Guadix con el Dispositivo Hidráulico Actual (1.988-1.989)".

En estos tres últimos se plantea la posibilidad de recarga artificial del acuífero con excedentes invernales y se realizan experiencias de recarga en el río Verde, utilizando unas balsas de decantación de mineral abandonadas, propiedad de la Compañía Andaluza de Minas (CAM). En estos mismos proyectos se construye la batería de sondeos de explotación, que en la actualidad alcanzan el número de cuatro.

Las experiencias de recarga artificial se han efectuado con el objetivo de analizar la viabilidad técnica y económica que tendría la regulación de los excedentes hídricos invernales existentes en la cabecera de la Vega de Guadix y en particular, de los volúmenes vertidos por la explotación minera de Alquife al cauce del río Verde.

Estos trabajos también han servido de base para la confección de un modelo matemático de simulación, en el que se integra la recarga artificial con la potencial regulación del acuífero mediante bombeos desde los sondeos realizados, que se puede utilizar como base para una propuesta de gestión de parte de los recursos del acuífero.

Como aspectos complementarios se ha revisado el tratamiento que da la Ley de Aguas y el Reglamento del Dominio Público Hidráulico a las operaciones de recarga artificial.

### **3.- DEMANDAS DE AGUA DE LA ZONA. DEFICITS EXISTENTES**

Las aguas del acuífero de Guadix se utilizan para el abastecimiento de siete núcleos de población: Albuñán, Alcudía, Benalúa de Guadix, Cogollos, Exfilliana, Guadix y Paulenca, con unos 24.000 habitantes, y para el riego de cerca de 3.000 has situadas en las márgenes del río Verde. Con una dotación teórica para el abastecimiento a los núcleos urbanos de 250 l/hab/día, y con la dotación real media empleada para riego de 8.100 m<sup>3</sup>/ha/año, se pueden estimar unos consumos medios de agua, procedente del acuífero, próximos a 26'5 hm<sup>3</sup>/año.

En el caso de considerar los volúmenes evacuados de la explotación minera de Alquife como un consumo añadido de agua, y teniendo en cuenta que el caudal evacuado es utilizado en primavera y verano para complementar dotaciones de los regadíos del entorno, los consumos medios globales de agua de la zona se estiman en 33 hm<sup>3</sup>/año.

La superficie regable está agrupada en 22 comunidades de regantes que se disponen a lo largo del cauce del río Verde. En cabecera de cada comunidad se encuentra una galería y, en ocasiones, un pozo convencional de excavación que exclusivamente capta el aluvial. Durante los meses de invierno y primavera las galerías dan caudales elevados, pero a finales de verano sufren una gran merma.

Los pozos tienen un comportamiento similar, ya que captan y regulan las salidas del acuífero al aluvial del río Verde y no los recursos del acuífero en si.

Con este sistema de captaciones se llegan a situaciones deficitarias en los periodos de riego intensivo, hecho que los agricultores tienen asumido y en verano sólo siembran de un 30% a un 50% de la superficie disponible, la cual varía por comunidades en función de la capacidad de sus captaciones.

Según estimaciones realizadas en trabajos previos, los déficits para la globalidad de la vega, en años medios, se situarían en torno a 5'7 hm<sup>3</sup>/año, mientras que para las siete comunidades ubicadas en cabecera de la misma, que son las que van a pasar a dotarse exclusivamente desde el acuífero, tal déficit se sitúa entre los 0'9 hm<sup>3</sup> en años medios y 2'3 hm<sup>3</sup> en años secos. En estas últimas comunidades el déficit punta se da en el mes de Julio con unos caudales continuos de 221 y 430 l/seg, respectivamente.

DEFICITS POR COMUNIDADES DE REGANTES (en l/seg.)

COMUNIDAD	AÑO MEDIO						AÑO SECO					
	A	M	J	J	A	S	A	M	J	J	A	S
Regantes del desagüe del Berral	0	0	139	278,1	192,1	71,8	38	120,5	264	343,6	251	106,3
Chirivaile	0	0	0	0	0	0	0	0	34,2	52,8	16	0
Ciudad	0	0	0	4	0	0	0	0	9,1	8,9	0	0
Almencin	0	0	0	57,2	19,3	0	0	0	42,5	70,6	36	0
Lupe	0	0	22,8	81	40,4	0	0	0	67	107,6	64	11,6
Rapales	0	0	20,6	74	34,5	0	0	0	51,8	86,8	48,9	1,8
Ranas	0	0	0	47,5	11	0	0	0	54,3	90,3	51,4	4,8
Vertido minas Alquife	-320	-320	-320	-320	-320	-320	-320	-320	-320	-320	-320	-320
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>221,8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>202,9</b>	<b>430,6</b>	<b>147,3</b>	<b>0</b>

## **4.- CARACTERISTICAS DEL ACUIFERO**

### **4.1.- NATURALEZA Y GEOMETRIA**

El Sistema Acuífero de Guadix abarca la altiplanicie del Marquesado y el valle del río Verde. Se asocia a los depósitos detríticos de la denominada Formación Guadix, que corresponden a unas secuencias de gravas, arenas y limos del Pliocuaternario que rellenan una amplia depresión entre Sierra Nevada y Sierra de Baza, y a los aluviales relacionados con el río Verde (Figura 2).

La Formación Guadix se compone de un sistema de abanicos aluviales coalescentes, que han denudado la vertiente septentrional de Sierra Nevada; en dirección Noroeste disminuyen de granulometría y pasan, mediante un cambio de facies, de gravas y arenas a limos y arcillas de carácter poco permeable; el paso entre estos sedimentos groseros y finos se ubica, aproximadamente, a la altura de la ciudad de Guadix.

Gran parte de la base del acuífero está marcada por la presencia de esquistos y filitas de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas; hacia el Oeste reposa sobre margas del Mioceno, y hacia el Norte se produce el mencionado cambio de facies a materiales de menor permeabilidad.

El espesor de sedimentos detríticos oscila entre 80 metros en la transversal de Huéneja, y 300 metros en las proximidades de Albuñán, cerca del lugar donde se han efectuado las experiencias de recarga. (Figura 2).

En la mencionada transversal de Huéneja se ubica un umbral del substrato impermeable, que condiciona una divisoria hidrogeológica; el acuífero, por consiguiente, muestra dos zonas de sentido de flujo subterráneo opuesto, hacia la cabecera del río Nacimiento en la provincia de Almería, y hacia la Vega de Guadix.

La superficie de los materiales permeables supera los 300 km<sup>2</sup>, de los que 250 km<sup>2</sup> corresponden al sector que drena por la Vega de Guadix.

#### **4.2.- PIEZOMETRIA**

El nivel piezométrico en el acuífero se sitúa entre las cotas 1.080 y 840 m.s.n.m. Las primeras se encuentran en la divisoria hidrogeológica con la cuenca del río Nacimiento, y las más bajas en el aluvial del río Verde.

Las isopiezas se disponen en dirección Norte-Sur en la mayor parte del Llano del Marquesado, con un gradiente del 0'5% hacia el Oeste. Al aproximarse al borde meridional y cauce del río Verde, las isopiezas se inflexionan y giran hacia el Oeste, con lo que indican una descarga del acuífero hacia este curso.

En las proximidades de Alquife se define un conoide de bombeo muy acusado, motivado por el desagüe de la explotación minera de la Compañía Andaluza de Minas (CAM), lo que produce una perturbación en las direcciones de flujo subterráneo regionales.

#### **4.3.- CARACTERISTICAS HIDRAULICAS**

En las proximidades de Sierra Nevada, donde los sedimentos son heterogéneos, y en Guadix, donde dominan los materiales limosos, las transmisividades del acuífero son inferiores a 50 m<sup>2</sup>/día, mientras que en el centro del Llano del Marquesado, con una granulometría homogénea, se llegan a superar los 5.000 m<sup>2</sup>/día.



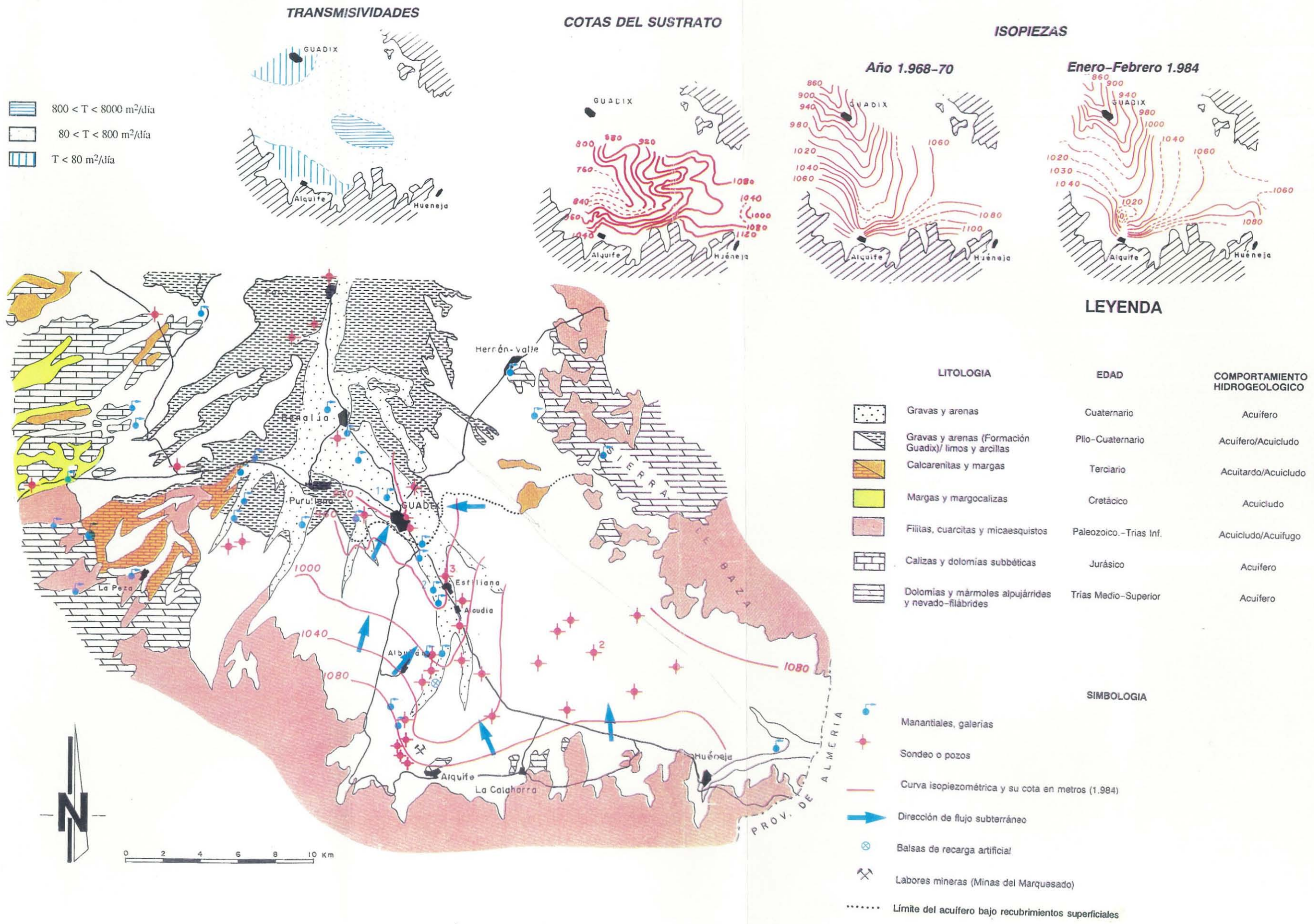


Figura 2.- Mapa Hidrogeológico

Para la mayor parte del acuífero se puede hablar de una transmisividad comprendida entre 80 y 800 m<sup>2</sup>/día (10<sup>-2</sup> y 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/seg).

Próximos al sector donde se ha efectuado la recarga se encuentran cuatro sondeos de explotación, parcialmente penetrantes en el acuífero, tres de los cuales han sido instalados. Las transmisividades obtenidas en ellos varían entre 105 y 2.900 m<sup>2</sup>/día, correspondiendo el valor más alto al obtenido en el sondeo más profundo (Guadix IV), con 200 metros.

La porosidad eficaz deducida de los bombeos de ensayo se aproxima al 1%.

#### **4.4.- ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO. BALANCE**

El acuífero de Guadix, tipificado como libre en toda su extensión, presenta unos recursos medios anuales, según los últimos balances realizados, en torno a 49'5-51'5 hm<sup>3</sup>.

El sistema se alimenta, fundamentalmente, de la infiltración de las precipitaciones y de la escorrentía de Sierra Nevada, contabilizando ambos conceptos del 75 al 80% de las entradas. La escorrentía de Sierra Nevada percola al acuífero desde los cauces y acequias que la derivan, en su mayor parte sin revestir, y por sobredotación en los riegos invernales que se dan en el altiplano del Marquesado. Otros componentes de la alimentación de menor importancia corresponden a percolación de la escorrentía de Sierra de Baza, flujo subterráneo desde pequeños afloramientos carbonatados que puntualmente conectan con el acuífero, y por retorno de riegos en las vegas desarrolladas al pie de Sierra Nevada y márgenes del río Verde.

Las descargas se reparten entre los 28 a 30 hm<sup>3</sup>/año correspondientes a surgencias naturales, mayoritariamente galerías de drenaje realizadas en el aluvial del río Verde; 17'5 hm<sup>3</sup>/año en concepto de bombeos, de los que 13 hm<sup>3</sup>/año corresponden al desagüe de la mina de Alquife; y 4 hm<sup>3</sup>/año a descargas subterráneas al río Fardes.

## **5.- BASES PARA LA MEJOR UTILIZACION DE LOS RECURSOS DEL ACUIFERO**

La situación deficitaria creada en los riegos de la zona puede ser superada mejorando la regulación de los recursos del acuífero de Guadix.

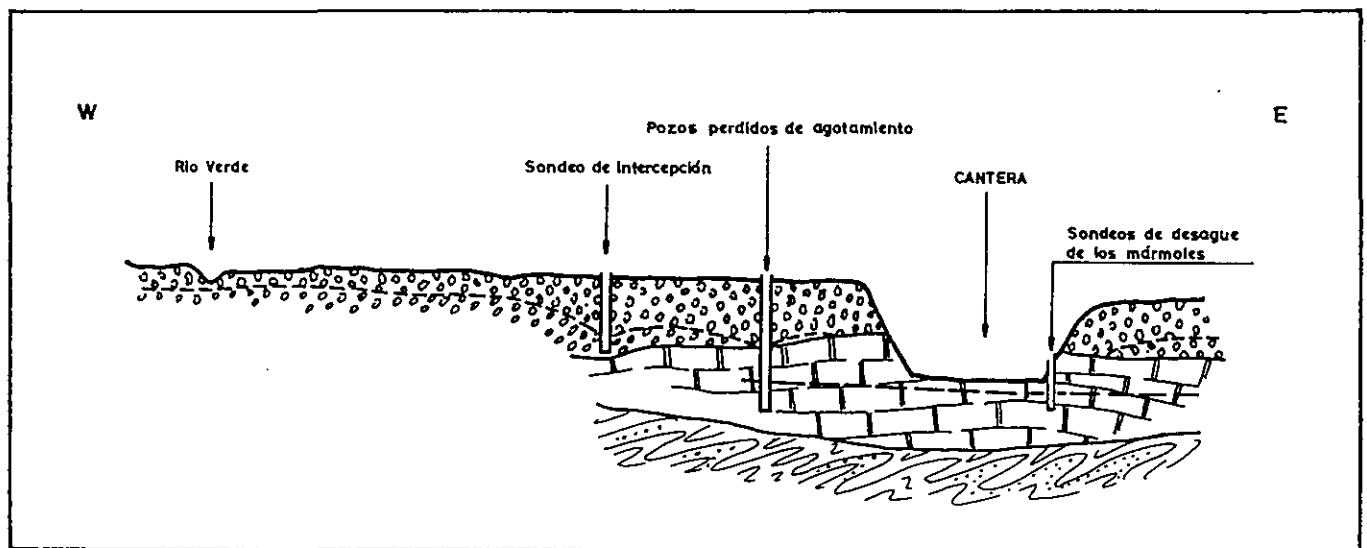
En principio, esta regulación se ha planteado mediante dos actuaciones diferentes: realización de baterías de sondeos y recarga de excedentes hídricos invernales. Se han considerado excedentes, los caudales evacuados por la explotación minera de Alquife, vertido al río Verde por el tunel del Berral, así como la escorrentía superficial de la vertiente septentrional de Sierra Nevada, la cual es parcialmente utilizada para el riego eventual de los Llanos del Marquesado durante otoño e invierno.

### **5.1.- CONSIDERACIONES SOBRE EL DRENAJE DE LA MINA DEL MARQUESADO**

El yacimiento minero de Alquife se asocia a masas irregulares de óxido de hierro que arman en mármoles del Complejo Nevado-Filábride; estos, a su vez, se encuentran recubiertos por sedimentos detríticos de la Formación Guadix y descansan sobre esquistos del mismo complejo.

Desde 1.967 la explotación se lleva a cabo en una cantera a cielo abierto, de forma subcircular, de cerca de 200 metros de profundidad y más de 2 Km. de diámetro, cuyo fondo se sitúa por debajo del nivel piezométrico regional, lo que obliga a su drenaje continuo.

En la actualidad este drenaje se realiza con un triple dispositivo: barrera de sondeos al Suroeste de la cantera, sondeos de agotamiento y sondeos dentro de la cantera.



**Figura 3.- Esquema de drenaje de la mina de Alquife**

Los primeros se han realizado en los sedimentos detríticos superiores y su objeto es cortar la vía preferencial de alimentación de agua de los mármoles mineralizados. Los sondeos de agotamiento se sitúan por detrás de los anteriores y comunican los sedimentos detríticos con los mármoles, lo que produce un agotamiento o secado del acuífero superior. Los sondeos situados en la cantera se encargan de deprimir el nivel en los mármoles y mantener seca la explotación.

El caudal global que se bombea es algo inferior a 400 l/s., lográndose con él una estabilización de niveles en la cantera, lo que evidencia que la alimentación hídrica de los mármoles mineralizados es de ese orden.

## 5.2.- REGULACION MEDIANTE SONDEOS

El acuífero de Guadix es susceptible de ser regulado mediante la explotación por sondeos, ya que cuenta con unos excedentes invernales importantes y sus características hidráulicas permiten buenos rendimientos en este tipo de obras de captación.

Con estos antecedentes se ha construído una batería de sondeos, que se ha emplazado bajo criterios de minimizar costos infraestructurales, de explotación y mantenimiento. Así dicha batería se ha situado en cabecera del área deficitaria, en una zona con buenas características hidráulicas y con el nivel piezométrico próximo a superficie; estas condiciones se cumplen en la margen derecha del río Verde, entre el túnel de desagüe de la mina de Alquife y las comunidades de regantes más altas.

Esta batería consta en la actualidad de cuatro sondeos, que se disponen según una línea paralela al cauce del río Verde a una equidistancia de 200-300 metros. Las captaciones fueron construidas entre 1.985 y 1.988.

Los sondeos han alcanzado profundidades comprendidas entre 160 y 200 metros y se han realizado por el sistema de rotación a circulación inversa, con un diámetro de 600-630 mm, excepto en uno de ellos que termina a 480 mm; han sido acondicionados con tubería metálica de 400 mm de diámetro, y los tramos considerados productivos se han entubado con filtros de puentecillo de 1,5-2 mm de abertura. Entre la tubería y la pared se ha acondicionado un macizo filtrante de gravas silíceas de calibre comprendido entre 4 y 8 mm, excepto los 18-20 metros superiores que se encuentran cementados. Con posterioridad se han desarrollado mediante polifosfatos y aire comprimido y se han llevado a cabo bombeos de ensayo en los que se han determinado las características hidrodinámicas del acuífero, el caudal óptimo de explotación y las pérdidas de carga.

Los caudales bombeados, las depresiones producidas y los valores de transmisividad deducidos, han sido:

SONDEO	CAUDAL (l/s)	DEPRESION (m)	TIEMPO DE BOMBEO (Horas)	TRANSMISIVIDAD (m <sup>2</sup> /día)	NIVEL ESTABILIZADO
I	79,5	31,10	40	440	Si
II	48,2	53,68	14	105	No
III	55,0	16,76	24	1000	Si
IV	60,0	7,84	40	2900	Si

La explotación conjunta de estos sondeos podría aportar un caudal de 300-350 l/seg.

En el último sondeo (nº IV) se ha deducido una porosidad eficaz del 1%.

### 5.3.- RECARGA DE EXCEDENTES HIDRICOS INVERNALES

Otra posibilidad de mejorar la regulación del acuífero corresponde a la recarga de exedentes invernales, actuación que conllevaría la recuperación de las depresiones producidas por un bombeo hipotético desde la batería de sondeos mencionada.

Genéricamente, para que la recarga fuera lo más efectiva posible debería realizarse en la zona de alimentación del acuífero, aguas arriba de la zona regable y a una distancia suficiente de las salidas como para evitar la rápida evacuación de los volúmenes infiltrados.

Estas tres condiciones se cumplen en el cauce del río Verde, en cabecera del área de demanda, en el mismo sector donde se han construido los sondeos de explotación. En esta zona se podría disponer de los caudales vertidos por el sistema de drenaje de la mina de Alquife a través del tunel del Berral y ocasionalmente de la escorrentía superficial del río Verde.

La elección del dispositivo de recarga idóneo, sondeos o balsas, depende de varios factores:

- Características hidráulicas de la zona (transmisividad y porosidad eficaz).
- Profundidad del nivel piezométrico.
- Calidad del agua a recargar (turbidez, calidad bacteriológica)
- Infraestructura hidráulica existente.
- Disponibilidad de terrenos.

Para el caso del sector próximo al desagüe del tunel del Berral, se dan condiciones más ventajosas para la utilización de balsas de infiltración respecto a otros dispositivos, por la poca profundidad a que se encuentra el nivel piezométrico y por la eventualidad de recoger agua turbia de caudal muy variable procedente de la esorrentía del río Verde.

Como paso previo al diseño definitivo de tales dispositivos se han realizado diversas experiencias de recarga en esa zona, para lo que se han adaptado unas antiguas balsas de decantación de aguas cargadas en mineral, que se encuentran a la salida del mencionado tunel.

Los trabajos realizados y los resultados de la experiencia mencionada se describen en los capítulos siguientes.

## **6.- RECARGA ARTIFICIAL**

### **6.1.- HIDROGEOLOGIA DEL AREA DE RECARGA**

Las balsas de infiltración utilizadas en la recarga se encuentran en la margen derecha del río Verde, a unos 4 Km al Suroeste de la localidad de Alcudia de Guadix.

En este lugar el acuífero Pliocuaternario está recubierto por depósitos aluviales, con anchura entre 200 y 300 metros y cerca de 20 metros de potencia.

El aluvial está conectado hidráulicamente con el acuífero y aguas arriba de las balsas la escorrentía del río se va infiltrando de forma progresiva hasta perderse totalmente. Aguas abajo, sin embargo, es el acuífero quien aporta caudal al río, y posteriormente es drenado por numerosas galerías para el riego de la zona. Solo en ocasiones circula escorrentía superficial por el río Verde a la altura de las balsas de infiltración.

A unos 70 metros de cota por encima del curso del río, se encuentra el altiplano del Marquesado, en el que se desarrollan cultivos de cereales con riegos eventuales durante los meses invernales. Para ello se deriva la escorrentía de la



vertiente septentrional de Sierra Nevada, mediante un complejo sistema de acequias sin revestir en su mayor parte, realizándose el riego por inundación. Ante la pequeña evapotranspiración existente en estos meses, la mayor parte del agua utilizada pasa a alimentar al acuífero.

La piezometría en el entorno de las balsas de recarga oscila entre las cotas 1.025 y 1.000 metros, con un gradiente hidráulico próximo al 1% en sentido Noreste. Esta tendencia del sector está distorsionada por un domo piezométrico bastante pronunciado, situado en el punto de vertido de las aguas del drenaje de la mina al aluvial, en el que el nivel llega a la cota 1.027 metros.

Los piezómetros dobles existentes en las proximidades de este domo presentan dos niveles piezométricos distintos, correspondiendo el de menor cota al piezómetro más profundo. Este doble nivel es propio de una zona de recarga con flujo de agua en sentido descendente, pero también puede deberse a la existencia de un nivel de agua en el aluvial, colgado respecto al acuífero principal.

La evolución de niveles al construir los piezómetros, en los que no se observó ningún cambio brusco en la posición del nivel, apoyaría la primera afirmación.

De la interpretación de las oscilaciones de nivel en los piezómetros en las primeras experiencias de recarga, se han deducido unos valores de transmisividad de 300 a 700 m<sup>2</sup>/día para la Formación Guadix y de 800 a 1.100 m<sup>2</sup>/día para el aluvial.

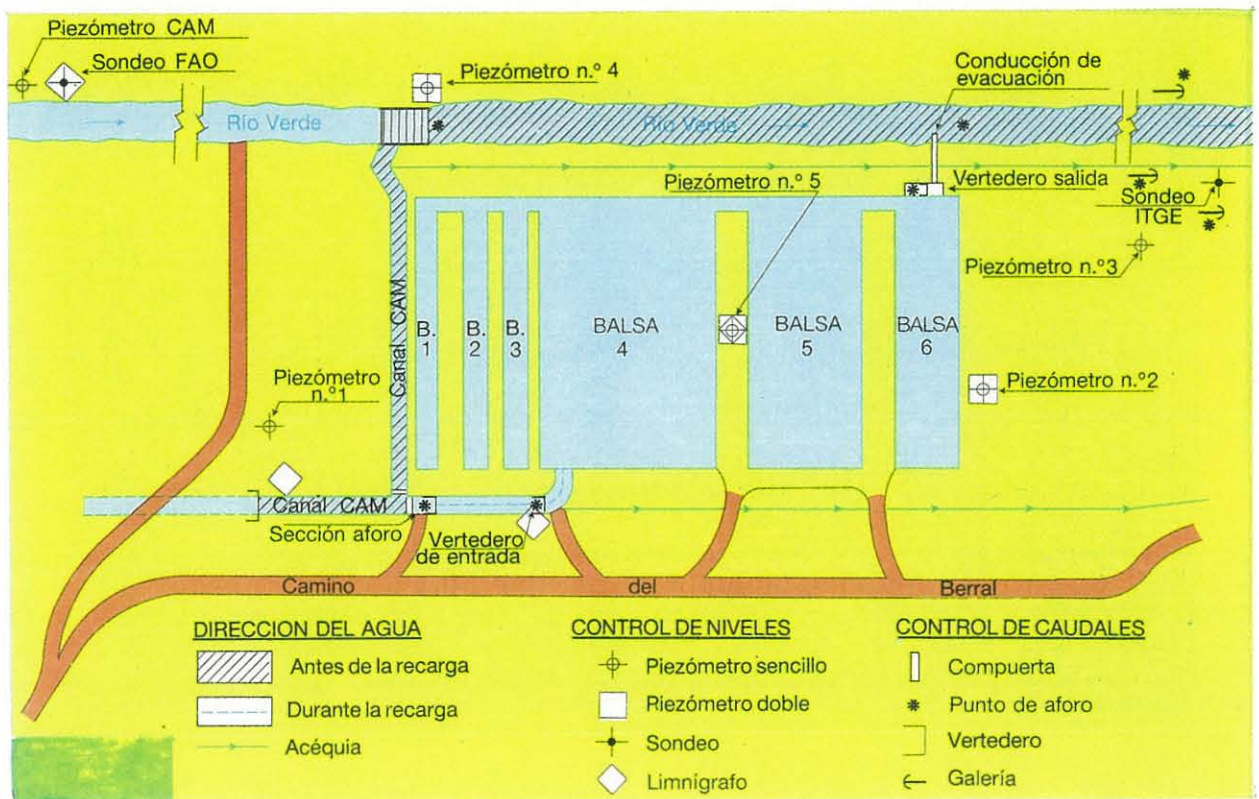
## **6.2.- DISEÑO DEL DISPOSITIVO DE RECARGA**

### **6.2.1.- Balsas de recarga**

Algunas de las balsas utilizadas para la recarga se encontraban colmatadas de mineral, con fracción limo-arena fina, y otras estaban parcialmente destruidas por avenidas del río, por lo que se ha procedido a su reconstrucción.

Por expresa petición de los propietarios del terreno, ha tenido que respetarse la configuración original de las balsas de decantación. En una primera fase se procedió a la limpieza y acondicionamiento de las tres mayores, logrando una

superficie útil del fondo de las balsas de 5.805 m<sup>2</sup> y una capacidad de 18.400 m<sup>3</sup>. En una segunda fase, previa a la realización de la última experiencia de recarga, se acondicionaron tres nuevas balsas, alcanzándose una superficie de infiltración de 11.550 m<sup>2</sup> y un volumen máximo de agua almacenado de 35.100 m<sup>3</sup> (Figuras 5 y 6).



**Figura 4.- Esquema hidráulico de la recarga**

La entrada de agua se realiza por la balsa n<sup>o</sup> 4, a través de un canal no revestido de 80 metros de longitud, que parte de la salida del túnel de desagüe; los caudales a recargar son controlados por un limnígrafo en un vertedero y pasan a la balsa por una rampa que se encuentra cementada para evitar la erosión del talud. Para evacuar y cuantificar los volúmenes no infiltrados, se ha acondicionado en la balsa n<sup>o</sup> 6 un aliviadero de cemento, con un vertedero rectangular de pared delgada. La máxima altura de agua que permite la cota del rebosadero respecto a la base del jalón situado en la balsa n<sup>o</sup> 4 es de 3,75 metros.

## 6.2.2.- Operaciones de control

### 6.2.2.1.- Control de volúmenes infiltrados

Para conocer el agua recargada en el acuífero se ha medido, en los diferentes ensayos, el caudal de entrada a las balsas y la variación del volumen embalsado.

El volumen embalsado se determina midiendo la altura de agua en las balsas, en una escala graduada o jalón instalada en la balsa nº 4. Mediante un detallado levantamiento topográfico se conoce con precisión la relación entre la altura de agua y la capacidad del dispositivo de recarga, de tal modo que con la lectura de altura de agua es posible conocer el volumen embalsado.

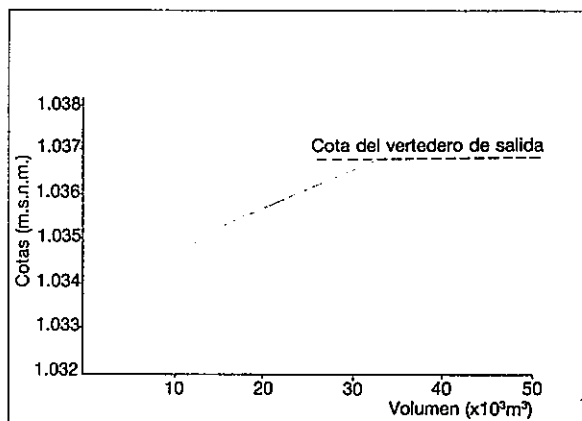


Figura 5.- Volúmenes de agua en las balsas en relación con la altura del agua

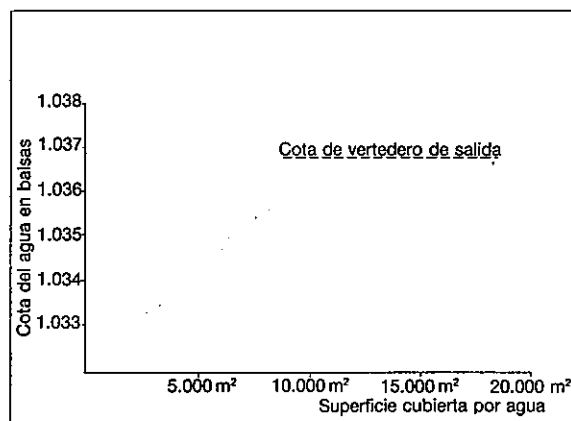


Figura 6.- Superficie de infiltración en la altura del agua en las balsas

Los volúmenes de agua vertidos a las balsas se han controlado en el canal de entrada, mediante aforos diarios, en las primeras experiencias, y de manera continua mediante limnógrafo en la última experiencia.

Los volúmenes infiltrados se han deducido de la expresión:

$$V_i = V_v - V_r + V_e$$

donde:  $V_I$ = Volumen infiltrado  
 $V_V$ = Volumen vertido a las balsas.  
 $V_R$ = Volumen excedente medido en el aliviadero.  
 $V_E$ = Variación del agua embalsada.

En todas las experiencias realizadas no se ha llegado a la máxima capacidad de almacenamiento, por lo que nunca ha salido agua por el aliviadero:  $V_R=0$ .

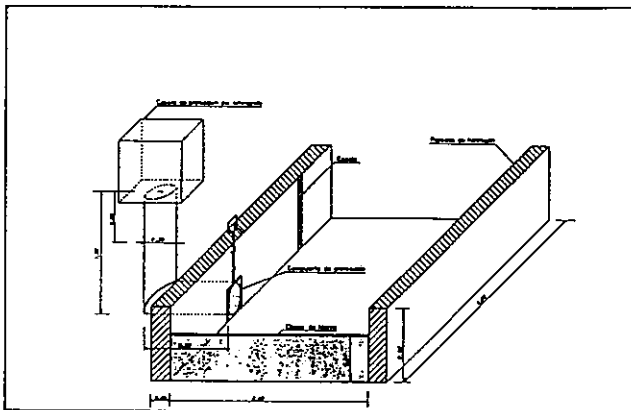


Figura 7.- Croquis acotado de la instalación del limnógrafo en el vertedero de entrada

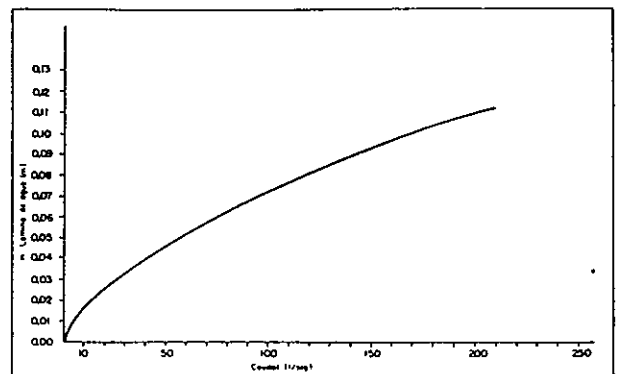


Figura 8.- Curva de tarado del vertedero de entrada

#### 6.2.2.2.- Diseño del dispositivo de control de la evolución piezométrica

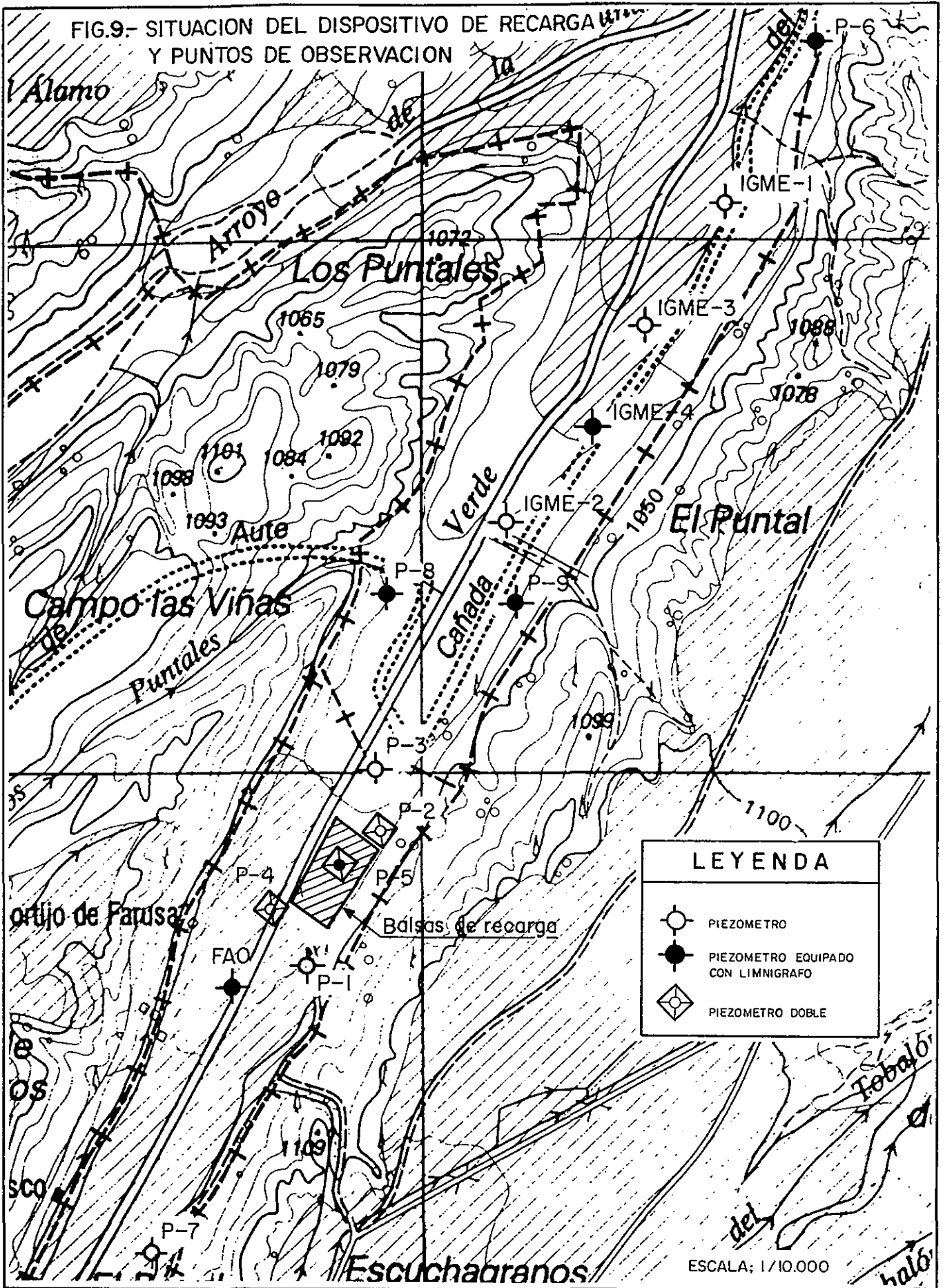
Para registrar la evolución piezométrica durante las experiencias de recarga se han construido nueve piezómetros, que junto con el sondeo FAO y cuatro sondeos de explotación del ITGE, han formado la red de control. A estos puntos se añaden las galerías y surgencias aforados en el río Verde. En total se ha contado con 20 puntos de observación, de los que seis son piezómetros simples, tres son piezómetros dobles con tramos de filtro a distintas profundidades, cinco son sondeos de explotación sin instalar y tres corresponden a manantiales o galerías.

**CARACTERISTICAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL PIEZOMETRICO**

<b>Nº INVENTARIO</b>	<b>Nº ORDEN RECARGA</b>	<b>COTA (m.s.n.m.)</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD TRAMO RANURADO</b>	<b>ACUIFERO MEDIDO</b>
2141-5-26	P-1	1038,40	35,0	5-25	Formación Guadix
2141-5-27	P-2 (1)	1031,99	16,5	15-16	Formación Guadix
	P-2 (2)	1031,99	12,5	11-12	Aluvial
2141-5-28	P-3	1030,90	30,0	5-22	Aluvial
2141-5-29	P-4 (1)	1037,91	18,5	17-18	Aluvial
	P-4 (2)	1037,91	12,0	10-11	Aluvial
2141-5-30	P-5 (1)	1038,29	35,0	16-32	Formación Guadix
	P-5 (2)	1038,29	12,0	9,5-11	Aluvial
2141-5-35	P-6	1015,31	50,0	18-36	Formación Guadix
2141-5-36	P-7	1049,00	50,0	12-40	Formación Guadix
2141-5-37	P-8	1025,27	50,0	18-36	Formación Guadix
2141-5-37	P-9	1022,41	50,0	12-36	Formación Guadix
2141-5-19	FAO	1038,29	50,0	15-44	Formación Guadix
2141-5-25	IGME-1	1010,83	160,0	24-150	Formación Guadix
2141-5-32	IGME-2	1019,94	180,0	78-169	Formación Guadix
2141-5-39	IGME-3	1012,89	180,0	14-149	Formación Guadix
2141-5-41	IGME-4	1016,91	200,0	20-196	Formación Guadix

En seis de estos puntos se han instalado limnigrafos de eje vertical, para el registro continuo de niveles: P-5 (1), P-6, P-8, P-9, FAO e IGME-4. En el resto de los piezómetros la cadencia de medidas ha sido de 1 a 3 días.

FIG.9.- SITUACION DEL DISPOSITIVO DE RECARGA AUTOMATICA Y PUNTOS DE OBSERVACION



### **6.2.3.- Procedencia y calidad del agua de recarga**

El agua utilizada en la recarga procede del drenaje de la mina de Alquife. Este drenaje se lleva a cabo por bombeo, mediante sondeos, desde los mármoles donde arma la masa mineralizada y desde los depósitos detríticos que los recubren (Formación Guadix); en consecuencia el agua a utilizar procede del mismo acuífero del que se efectúa la recarga.

El agua carece de materia en suspensión y presenta unas bajas concentraciones de flora bacteriana. La temperatura con que sale del túnel es bastante constante, entorno a 15 °C.

Desde el punto de vista químico, el agua es de facies bicarbonatada cálcico – magnésica, con una baja concentración salina (247 mg/l de sólidos disueltos). Por su parte el agua del acuífero en las cercanías de las balsas es de una composición muy similar, como puede observarse en la figura nº 10.

En estas condiciones no es previsible que se produzcan problemas de colmatación ni incrustación.

### **6.2.4.- Caudales disponibles**

La explotación minera de Alquife mantiene para su drenaje, desde 1.972, un bombeo continuado próximo a 400 l/seg; el agua extraída es parcialmente utilizada en la planta de tratamiento del mineral, y los sobrantes, unos 300 l/seg, son evacuados por el túnel del Berral al cauce del río Verde. Este caudal de vertido es constante a escala anual, pero puede sufrir oscilaciones de hasta 150 l/seg en función de las necesidades hídricas de la propia explotación, o bien por averías de los grupos impulsores. Salvo en estos últimos casos, el caudal no baja de 200 l/seg.

Este agua se vierte al cauce del río Verde o es derivada a una acequia para riego. Su utilización por los agricultores es intensiva entre los meses de Abril a mediados de Octubre y parcial en el mes de Marzo, si bien en años de escasa precipitación hay una cierta demanda durante todo el invierno. En estos casos y coincidiendo con las épocas de recarga se utilizan las compuertas de derivación para variar el caudal de entrada a las balsas.

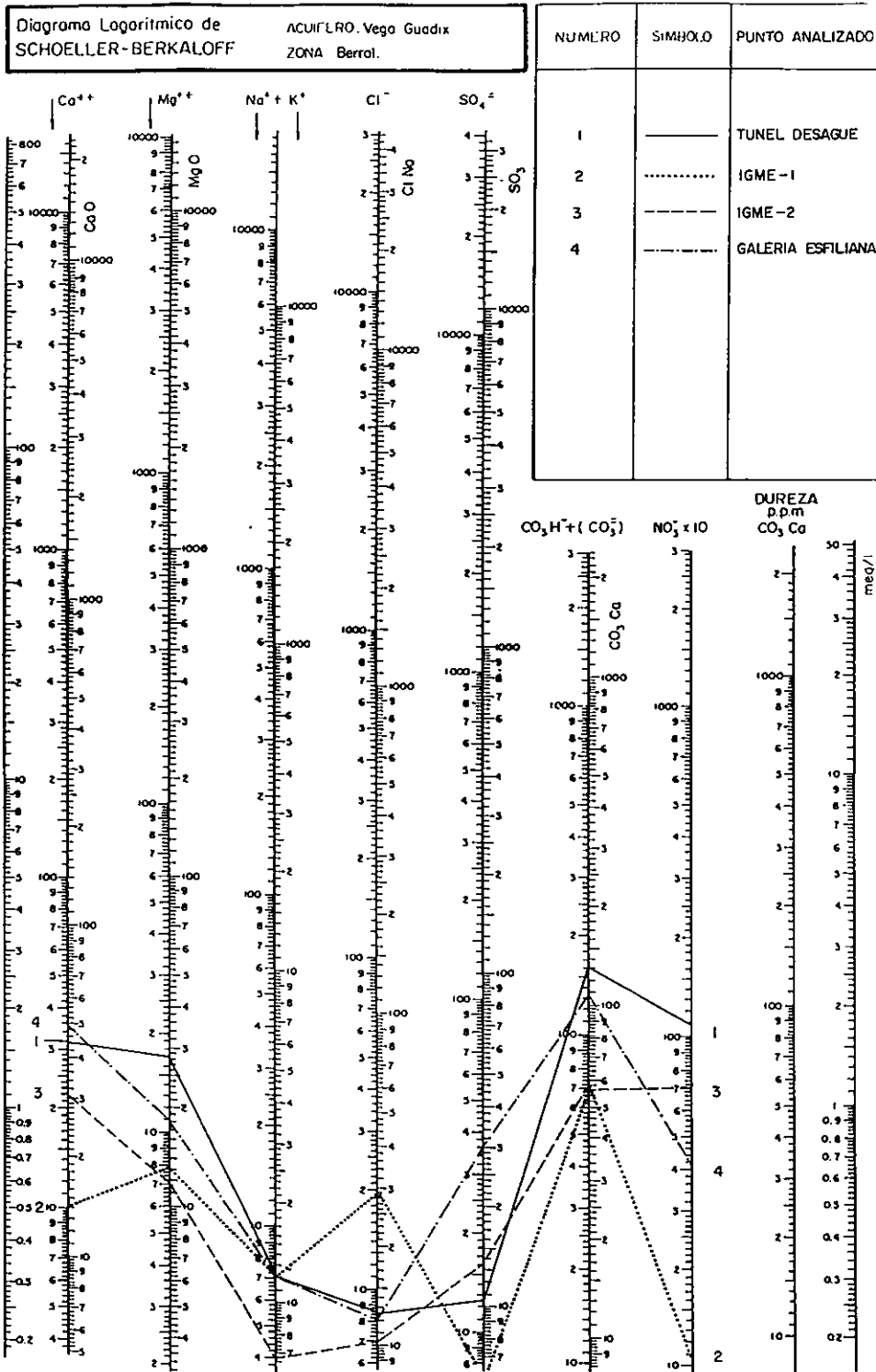


Figura 10.- Diagrama Schoeller-Berkaloff de las aguas del acuífero de la Formación Guadix



### 6.3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA RECARGA ARTIFICIAL

#### 6.3.1.- Experiencias realizadas entre Diciembre de 1.984 y Marzo de 1.987

La primera experiencia de recarga se realizó en el invierno de 1.984 a 1.985, de Diciembre a Febrero, para lo que se acondicionaron las tres balsas más extensas y se construyeron cinco piezómetros. Durante 62 días se recargó un caudal medio de 205 l/seg, hasta totalizar 1,1 hm<sup>3</sup>, produciendo en el acuífero un domo piezométrico alargado en la dirección del flujo subterráneo natural, de unas 650 has de extensión, en el que el ascenso medio fué de 1,7 m. El domo no llegó a alcanzar los drenajes principales del acuífero, por lo que podría haber admitido más volumen de agua antes de alcanzar su estabilización. En esta misma experiencia se analizaron otros aspectos, como la compatibilidad química entre el agua de recarga y la del acuífero, esquema de flujo bajo las balsas, parámetros hidráulicos del acuífero según las admisiones del agua, etc, y se diseñó un plan de explotación conjugando extracciones mediante sondeos y sobrealimentación con la recarga artificial.

Los principales datos de esta experiencia se pueden resumir de la siguiente forma:

	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
Precipitación (m <sup>3</sup> /día)	21,1	0,0	0,0	19,6	7,0
Evaporación (m <sup>3</sup> /día)	8,8	5,0	6,3	9,8	14,2
Infiltración (m <sup>3</sup> /día)	-	16.378,6	17.765,5	17.111,3	-
Volumen infiltrado (m <sup>3</sup> /mes)		343.951	550.731	208.654 (*)	

(\*) Incluyen el volumen residual embalsado.

Si se tiene en cuenta el volumen medio infiltrado (17.400 m<sup>3</sup>/día) y la superficie de la base de las balsas, la capacidad de infiltración media resultó ser cercana a 3 m/día, entendiendo por capacidad de infiltración el caudal infiltrado por unidad de superficie.

Durante los dos inviernos siguientes a la experiencia controlada (85-86 y 86-87), los regantes de la zona utilizaron las balsas inyectando del orden de 90

l/seg continuos durante 3 o 4 meses, produciendo en el acuífero un domo similar al observado en la primera experiencia, pero de menores dimensiones.

Las avenidas originadas en el río Verde destruyeron los muros de las balsas más próximos al cauce, e imposibilitaron la recarga en el invierno de 1.987 a 1.988.

Con posterioridad a este último año el ITGE reparó y limpió las tres balsas utilizadas hasta la fecha, y se acondicionaron otras tres más para aumentar la superficie filtrante, a la vez que se construyeron nuevos piezómetros.

La respuesta del acuífero ante las sucesivas recargas puede observarse en los hidrogramas de la figura 11.

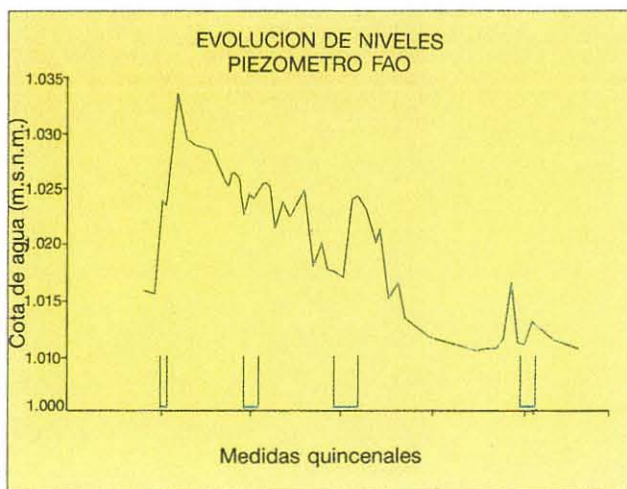
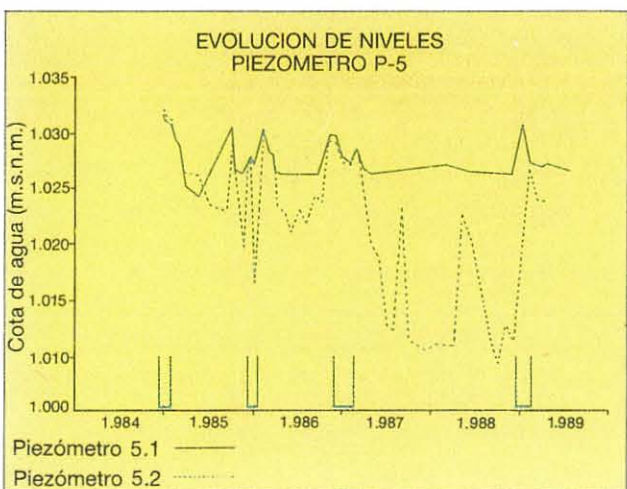
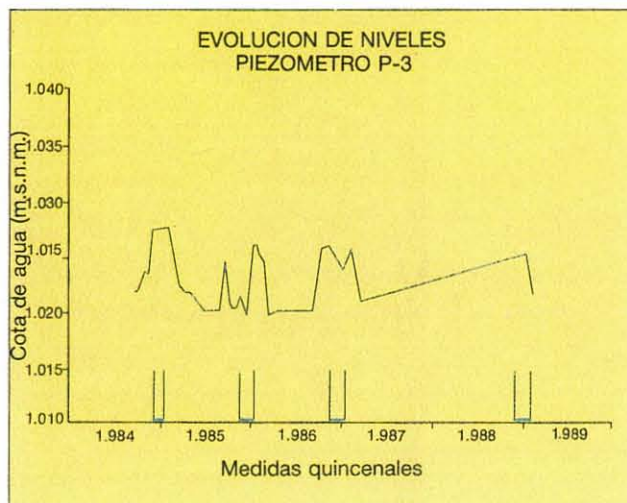
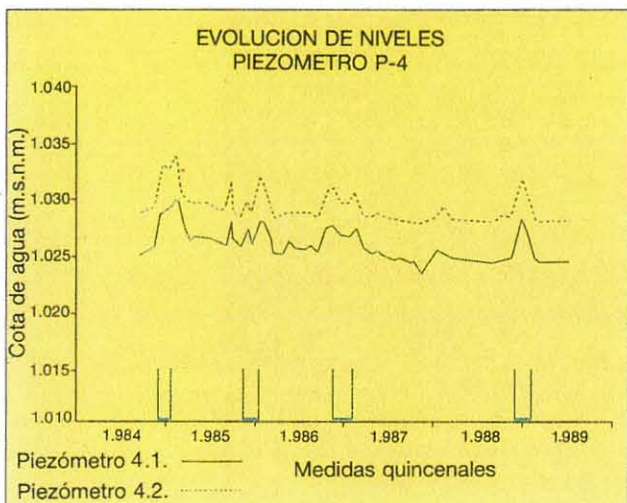
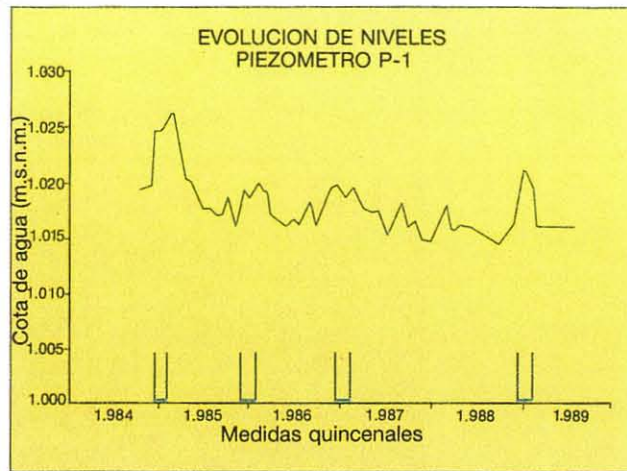
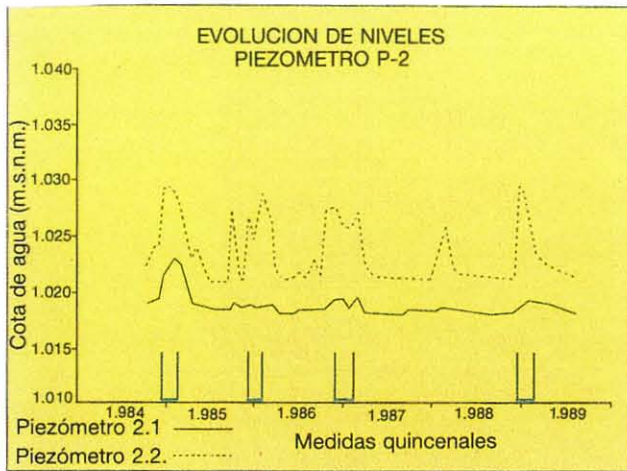
### **6.3.2.- Experiencia de Diciembre 1.988 a Marzo de 1.989**

#### **6.3.2.1.- Cronología e incidencias**

El agua comenzó a entrar en las balsas a las 14,50 horas del día 15 de Diciembre de 1.988, con un caudal de 130 l/seg. El nivel en las balsas fué subiendo progresivamente, hasta que en la noche del día 23 de Diciembre se conectaron todas entre sí.

Los primeros quince días de la experiencia se caracterizaron por una gran irregularidad en el caudal de entrada, que incluso llegó a interrumpirse durante más de un día, lo que provocó las lógicas variaciones del nivel de agua en las balsas.

Durante el mes de Enero los caudales de entrada oscilaron entre 120 y 145 l/seg, mientras que la altura del agua varió entre 2 y 2,5 metros. Durante los últimos días del mes se observó una creciente colonización de algas verdes, siendo espectacular su aumento entre los días 30 de Enero y 2 de Febrero cuando llegaron a tapizar gran parte de la superficie de agua, y aunque en días posteriores disminuyeron en cantidad, no llegaron a desaparecer en el resto de la experiencia.




 Periodos de recarga

**Figura 11.- Evolución del nivel piezométrico en las distintas pruebas de recarga**

Hasta el día 10 de Febrero los caudales volvieron a ser irregulares con periodos de corte de hasta dos días de duración. Desde esa fecha y hasta el 25 de Febrero los caudales oscilaron entre 60 y 75 l/seg y el nivel de agua en las balsas alcanzó una cierta estabilización, en torno a los 2 metros.

Poco antes de comenzar el mes de Marzo los regantes requirieron más caudal y comenzaron los cortes de agua prolongados, hasta que a las 13 h 15' del día 6 de Marzo se cortó definitivamente la entrada de agua. La experiencia tuvo una duración de 88 días y en ella se infiltraron cerca de 600.000 m<sup>3</sup> de agua.

Desde los primeros instantes de la recarga, en el talud próximo al canal de entrada de la balsa nº 1, comenzó a rezumar agua en una zona de humedad que ya existía desde que ésta se construyó, llegándose a inundar su parte inferior. Cuando la experiencia ya estaba suficientemente avanzada se pudo comprobar que este rezume llegó a alcanzar de 2 a 5 l/seg. Este agua debe proceder de filtraciones del túnel de desagüe de la mina, y de perdidas del canal de alimentación de las balsas que se encontraba sin revestir.

#### **6.3.2.2.- Climatología durante la experiencia**

El invierno de 1.988 a 1.989 fué extremadamente seco en la Comarca de Guadix, registrándose en el período de recarga sólo cuatro días de lluvia, con un volumen de agua recogido inferior a 45 mm; la máxima precipitación se registró en la noche del 6 al 7 de Enero, con cerca de 11 mm de lluvia.

Según los datos del embalse del Negratín, la evaporación en estas fechas fue de pequeña entidad, con valores que no llegaron a superar los 4,6 mm diarios. Durante el periodo de recarga la evaporación ascendería a 132,8 mm, lo que supone, para la extensión media ocupada por el agua durante la prueba, un volumen de 10.624 m<sup>3</sup>.

Como se puede observar, tanto las precipitaciones como la evaporación han alcanzado cifras pequeñas, por lo que se puede considerar que no han afectado al resultado de la experiencia.

### 6.3.2.3.- Caudales infiltrados. Capacidad de infiltración

La experiencia de recarga se ha realizado con una amplia oscilación en los caudales diarios infiltrados, que han estado comprendidos entre 60 y 170 l/seg. Esta importante variación se ha relacionado con las frecuentes oscilaciones en la altura de la lamina de agua en las balsas (carga hidráulica) y de la superficie filtrante, motivadas, a su vez, por los continuos cambios del caudal de entrada.

En base a los volúmenes diarios infiltrados y a la superficie ocupada por el agua (superficie de infiltración), se ha calculado la capacidad de infiltración del dispositivo de recarga. En la figura 12, se muestra la variación de dicha capacidad de infiltración durante la experiencia, su relación con la altura de la lámina de agua y con los caudales de entrada a las balsas. En ella se puede observar como la capacidad de infiltración está directamente relacionada con la altura de la lámina de agua en las balsas, si bien sufre una tendencia a disminuir durante la experiencia.

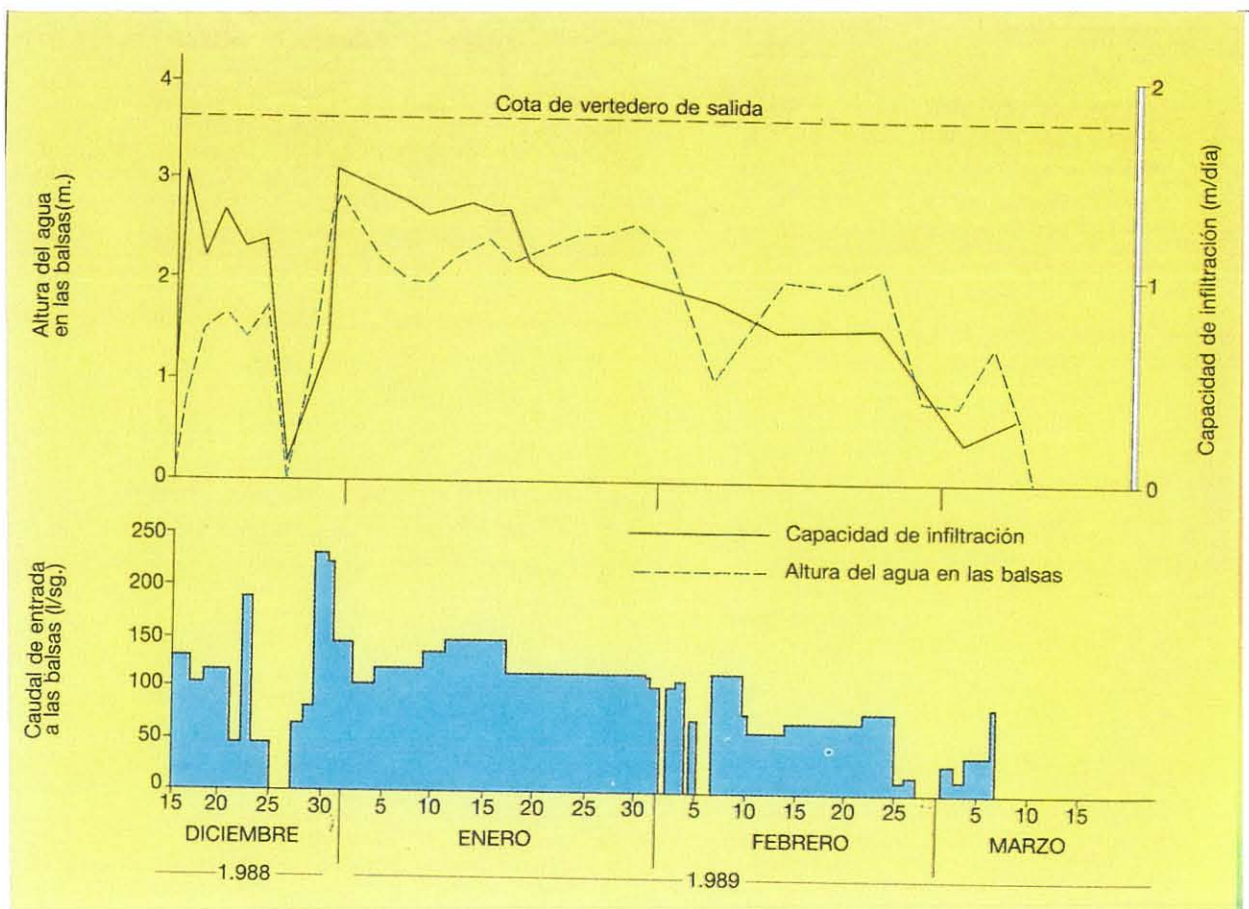
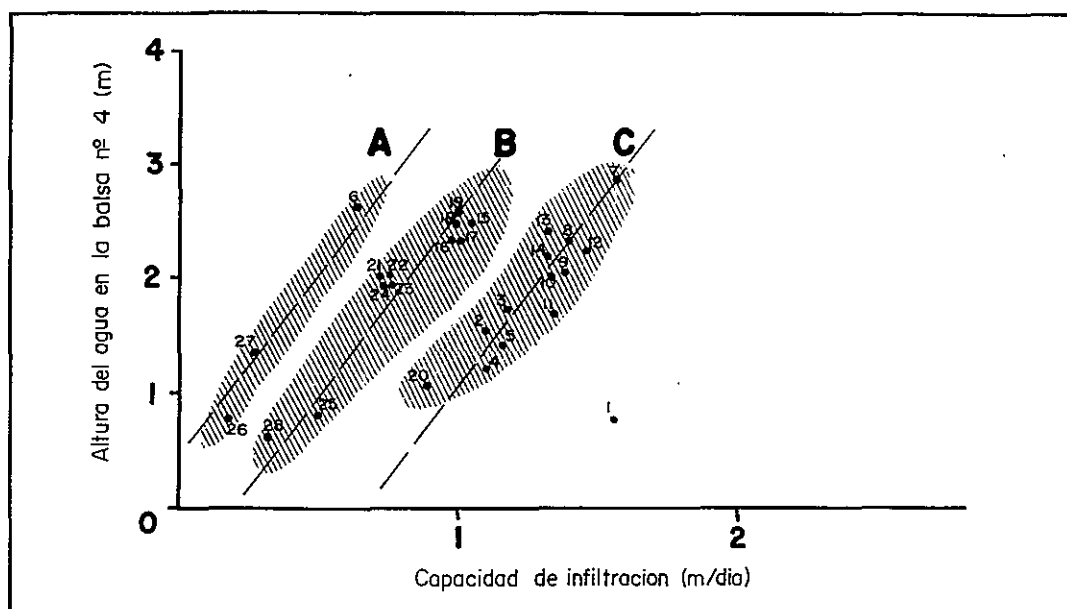


Figura 12.- Evolución de la capacidad de infiltración

En esta tendencia se pueden definir tres etapas de cierta estabilización de la capacidad de infiltración; las dos primeras, con valores en torno a 1,35 y 1 m/día respectivamente, se dan en condiciones de ascenso continuado del nivel de agua en las balsas, mientras que en la tercera, con valores de 0,65 m/día, la altura de agua es estable. El tránsito de una etapa a otra coincide con cortes en el suministro de agua, correspondiendo además el paso de la segunda a la tercera con la súbita eclosión de algas.

Los valores de capacidad de infiltración deducidos en esta última experiencia son menores que en las anteriores, hecho que se puede justificar por la colmatación que producirían las referidas algas y también por el propio método de cálculo, ya que en esta última ocasión se ha considerado como superficie de infiltración la superficie de balsa bajo la lámina de agua, mientras que en las primeras solo se consideró la base de las balsas, eliminando los taludes inclinados. La justificación a este cambio de criterio viene dada por las importantes variaciones de la superficie ocupada por el agua en la última experiencia, fruto de las continuas oscilaciones en el caudal de entrada, frente a la estabilidad que se dió en las primeras.

La representación de la capacidad de infiltración en función de la altura del agua en las balsas (figura 13), nos muestra tres agrupaciones de puntos, que denominamos A,B y C.

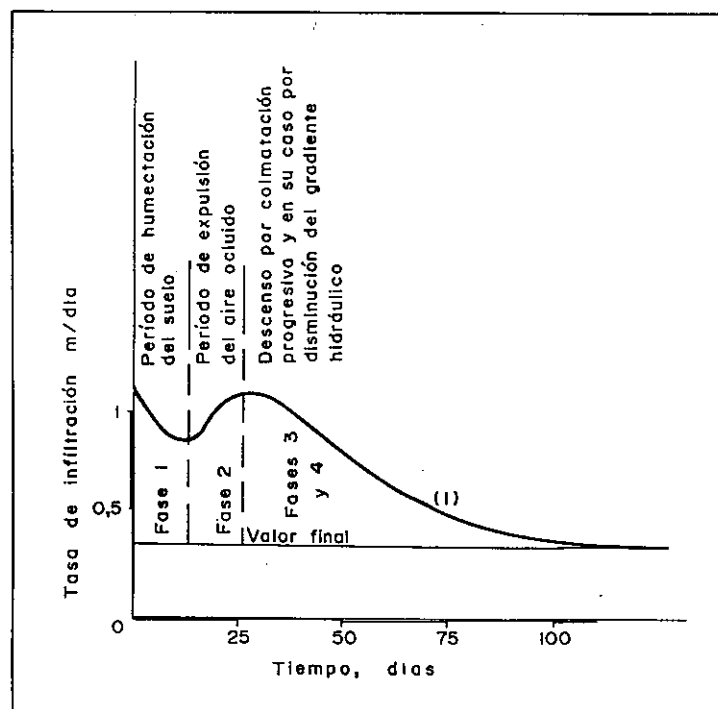


**Figura 13.- Variación de la capacidad de infiltración/altura de agua**

En el A, se sitúan las capacidades que se dan en condiciones de ascenso del nivel de agua en las balsas, bien al inicio de la recarga, o tras un descenso muy acusado; en el B se encuentran las capacidades correspondientes a la segunda y tercera etapas de estabilización, anteriormente comentadas; y en la C, se recogen las capacidades correspondientes a los primeros días de recarga y primera etapa de estabilización.

De acuerdo con la cronología observada en la experiencia, para el caso de una recarga efectuada con altura de agua en las balsas (carga hidráulica) constante, la capacidad de infiltración comenzarían con los valores bajos correspondientes al campo A, pasaría mas tarde a los valores superiores del campo C y se estabilizaría, finalmente, en los intermedios del B.

Asimilando estos campos a las fases en que se divide una curva típica de evolución de la capacidad de infiltración en función del tiempo (figura 14), el campo A correspondería con la fase o periodo de humectación del suelo, la C con el periodo de expulsión del aire ocluido y la B con la fase de descenso por colmatación progresiva y/o disminución del gradiente hidráulico. La duración de cada una de estas fases es de 2 a 4 días para la A, de 17 a 19 para la C, e indefinida para la B.



**Figura 14.- Evolución típica de la capacidad de infiltración.  
(Allison 1947).**

La ecuación que relaciona la capacidad de infiltración con la altura de agua en las balsas es lineal, y tendría la expresión:

$$\text{Cap. infiltración} = K + 0,32 \text{ altura de agua}$$

teniendo K los valores de -0.14, 0.2 y 0.68 para los campos A, B, y C, respectivamente. Según esta expresión, con una altura de agua en las balsas de 3.5 m, próxima al rebosadero de salida, la capacidad de infiltración de una recarga prolongada sería próxima a 1.3 m/día, lo que supondría un volumen infiltrado diario de 15.180 m<sup>3</sup>, 175 l/sg continuo, con el tamaño actual de las balsas.

#### **6.3.2.4.- Respuesta del acuífero a la recarga**

Ante la recarga de los volúmenes referidos el acuífero ha mostrado una elevación de la superficie piezométrica, que ha variado en función de la situación del punto de observación respecto a las balsas (distancia y orientación) y del tiempo de recarga.

Dentro del dispositivo de observación establecido, los puntos que han sufrido y experimentado más rápidamente una mayor oscilación del nivel piezométrico han sido los más próximos a las balsas, y entre puntos equidistantes los situados según la dirección de circulación preferencial de la escorrentía subterránea. En el piezómetro P-5-(1), situado en las propias balsas de infiltración, el nivel ha ascendido cerca de 19 metros, mientras que en el piezómetro P-6, situado aguas abajo a más de 1.700 metros de distancia de las balsas, el ascenso del nivel ha sido de 58 cm; en el piezómetro P-7, situado 700 metros aguas arriba de las balsas, no se ha dejado notar el efecto de la recarga (figura 15).

Por su parte, en las tres surgencias controladas no se han registrado oscilaciones de caudal.

La evolución del nivel piezométrico durante la experiencia puede observarse en los esquemas de la figura 16, en los que se han representado las equipotenciales obtenidas en los piezómetros superficiales, realizados en aluvial, y las deducidas de los más profundos, que registran las equipotenciales de la Formación Guadix.



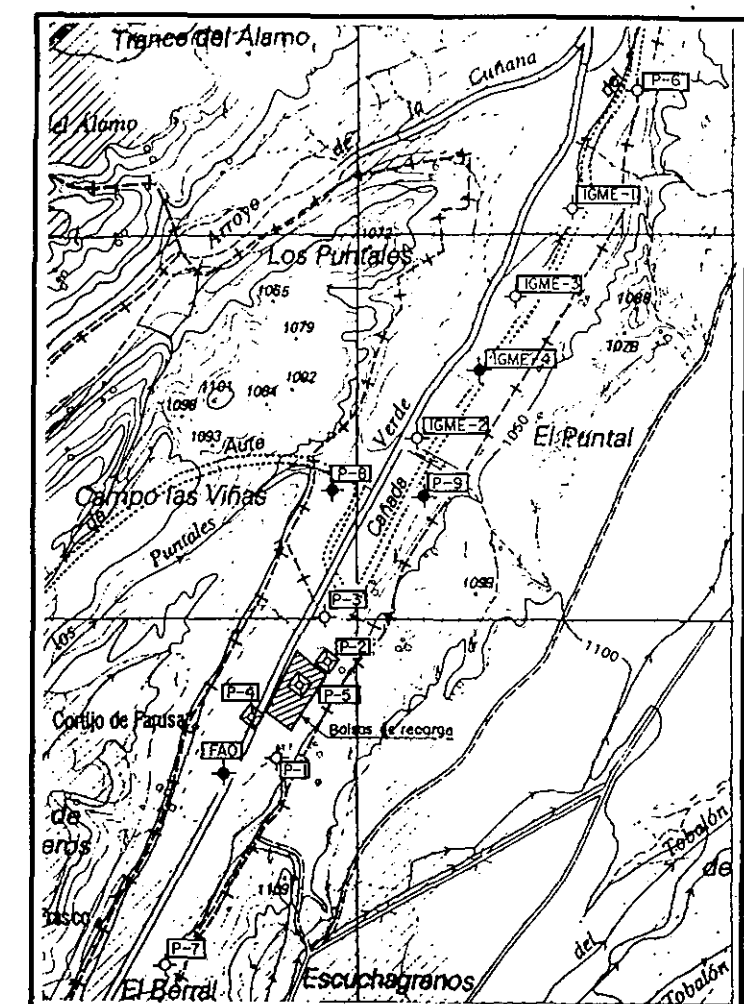
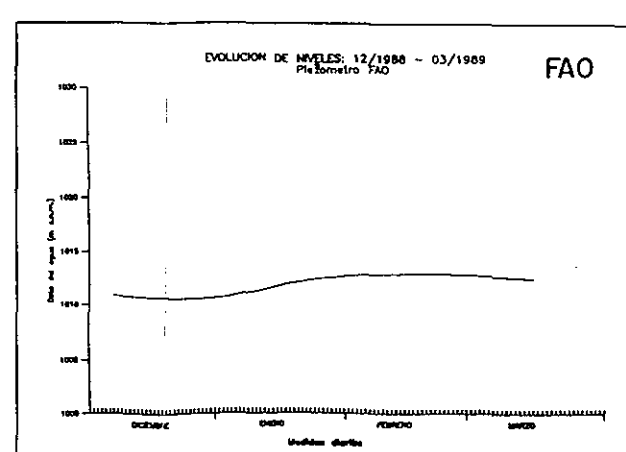
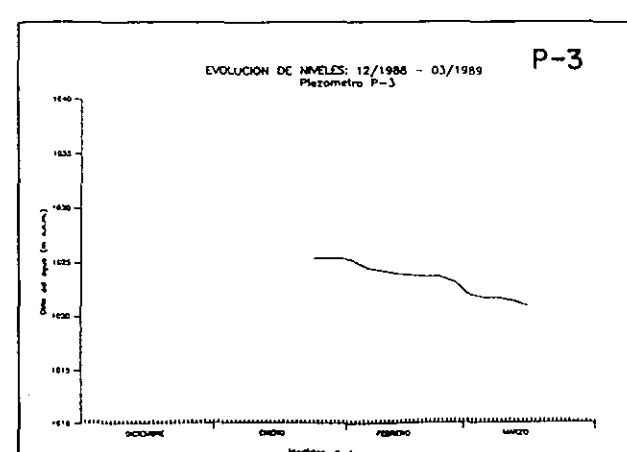
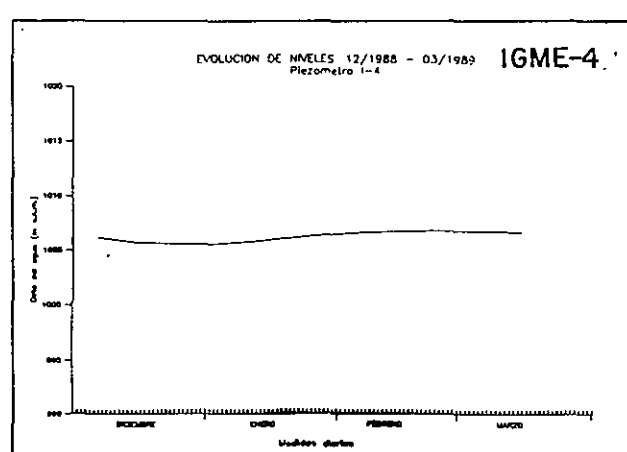
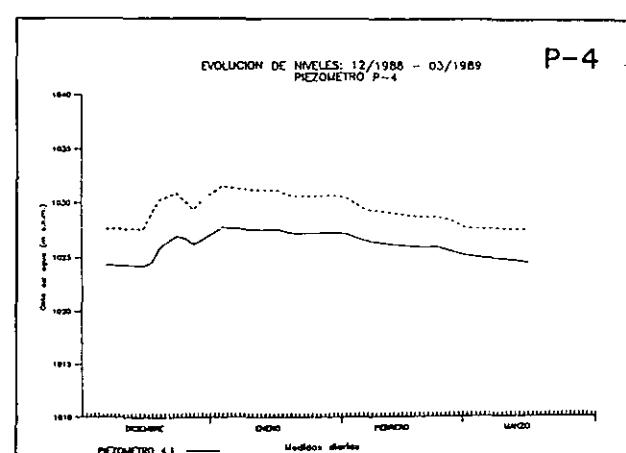
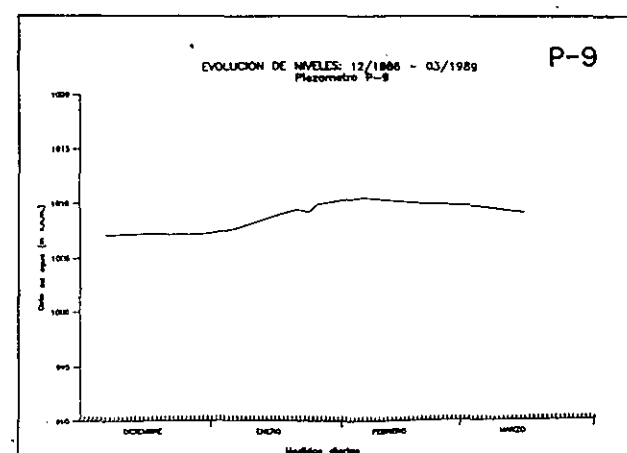
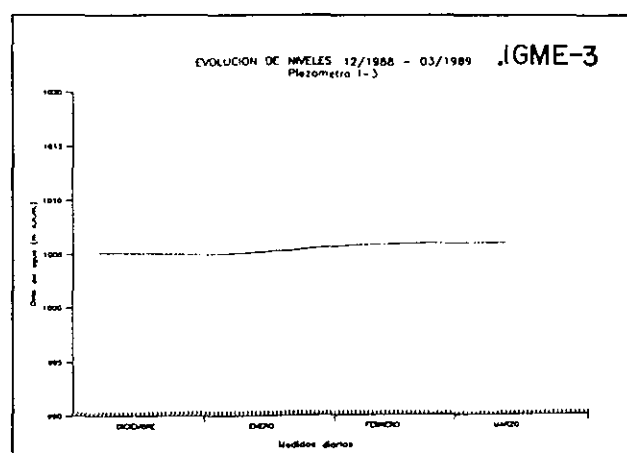
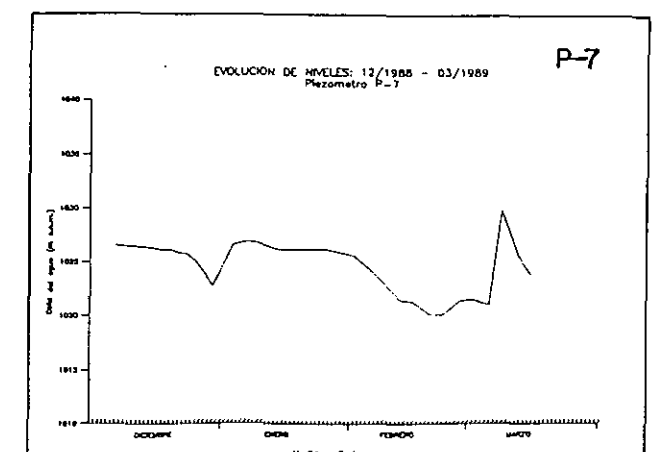
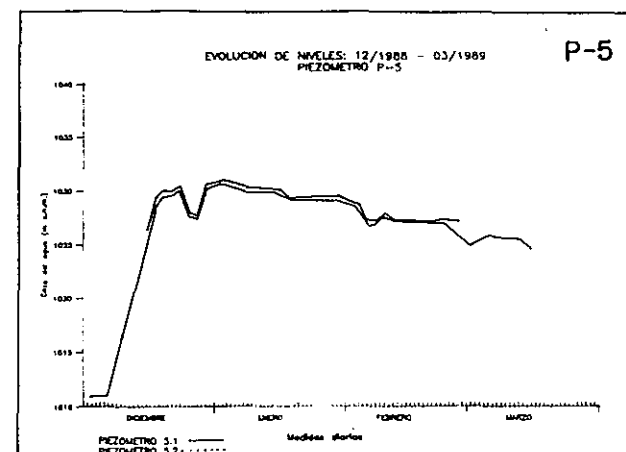
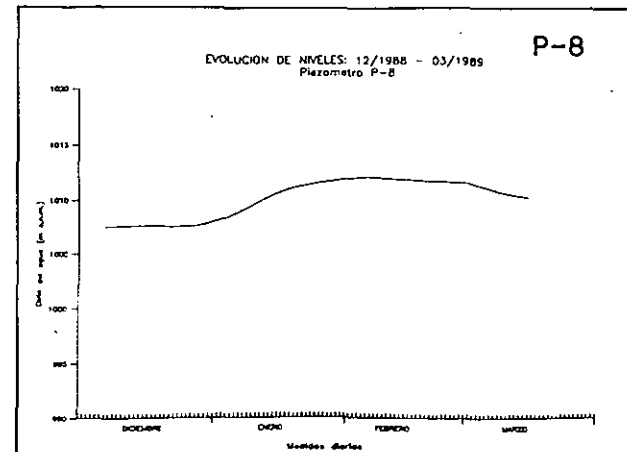
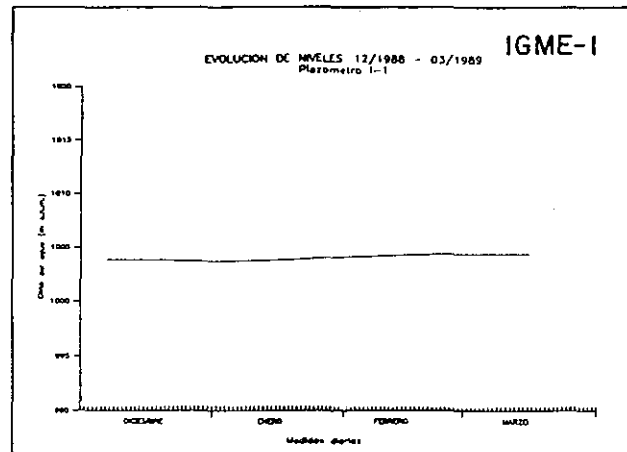
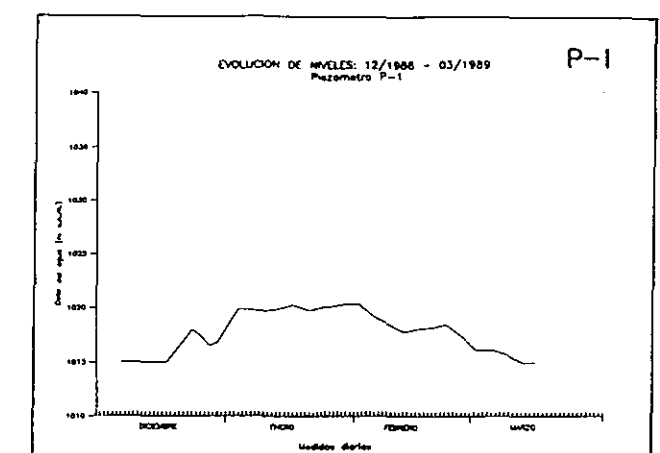
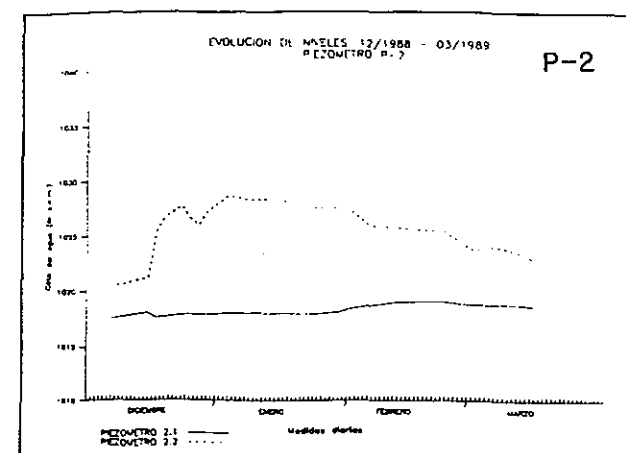
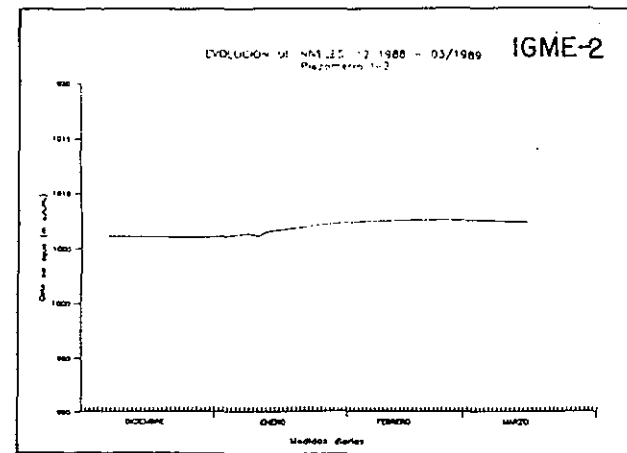
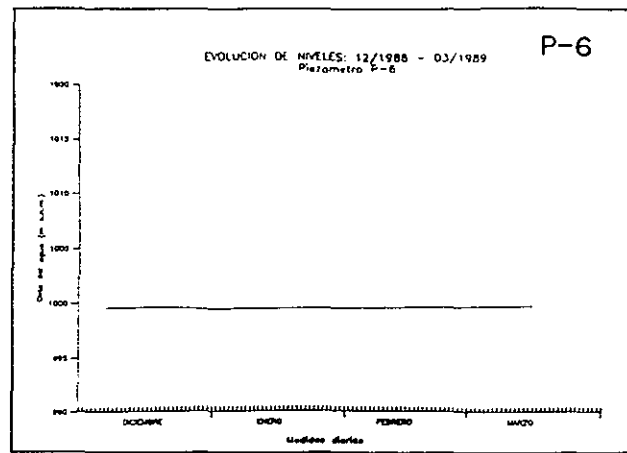
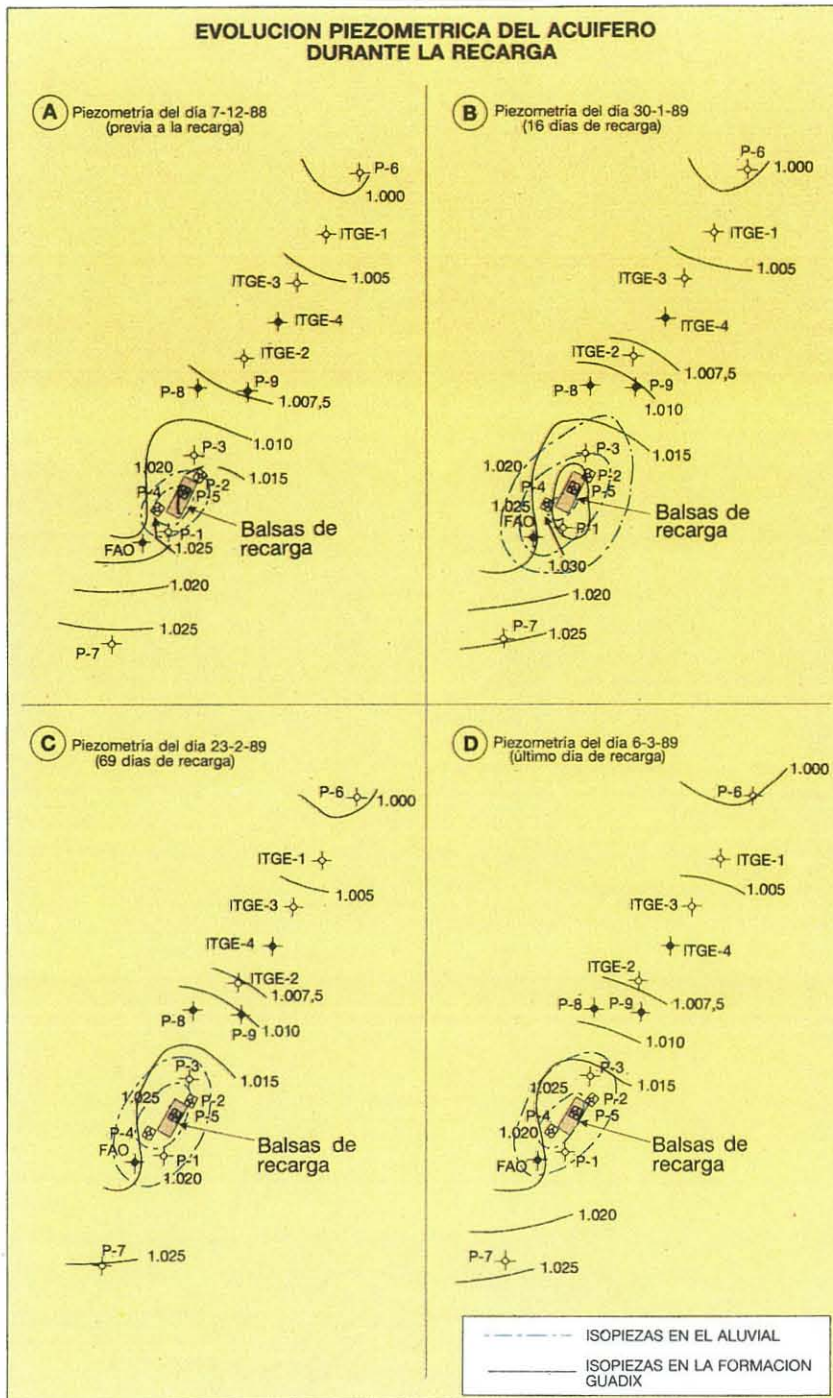


FIG.15- EVOLUCION DEL NIVEL PIEZOMETRICO DURANTE LA RECARGA



**Figura 16**

En fechas precedentes a la recarga (figura 16 A), ya que existía un conoide piezométrico en el aluvial, como consecuencia de la infiltración de los caudales vertidos al cauce del río Verde; en la Formación Guadix se define un flujo general en el sentido del cauce, excepto a la altura de las balsas de recarga, donde existe una alimentación desde la margen derecha, posiblemente asociada a filtraciones y pérdidas en el túnel de desagüe de la mina.

Ante la recarga se acrecienta el domo piezométrico en el aluvial y se define también en profundidad, pero el esquema hidráulico general del sector sigue siendo el mismo. Los máximos piezométricos se logran al final de un periodo prolongado de alimentación constante a las balsas de unos 120 l/sg (figura 16 B); tras la bajada de la tasa de infiltración que se registra en el mes de Febrero, los niveles sufren un descenso general, siendo muy ostensible este descenso en los piezómetros superficiales; al finalizar la experiencia los niveles han bajado aún más por la caída en los caudales infiltrados, sin embargo en los piezómetros más alejados, es en esta fecha, cuando se logran los máximos incrementos de nivel.

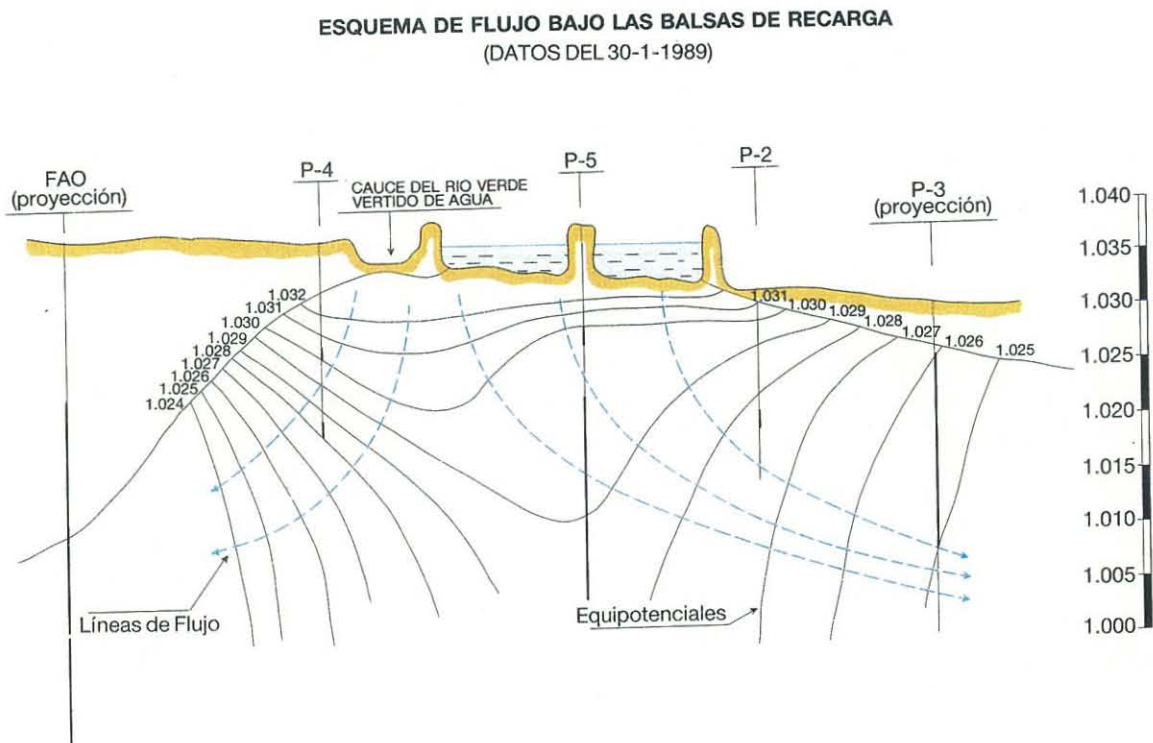
La velocidad de propagación del domo piezométrico, ha estado entre 50 y 75 metros/día, según piezómetros, siendo similar en ambos sentidos del flujo subterráneo del acuífero.

#### **6.3.2.5.- Esquema de flujo subterráneo**

La disponibilidad de piezómetros puntuales ha permitido la reconstrucción de las equipotenciales bajo las balsas de recarga y, como consecuencia, la definición de las líneas de flujo. Para el caso de piezómetros con tramo ranurado de varios metros, el potencial hidráulico medido se ha considerado representativo de un punto intermedio de dicho tramo.

En el piezómetro situado en el centro de las balsas, P-5, el salto de potencial hidráulico entre los dos puntos de medida existentes, a 10,5 y 24 metros de profundidad respectivamente, es de 0.5 metros, mientras que en piezómetros laterales tal salto es de 3,4 metros (P-4) y de 9,5 metros (P-2). Este superior gradiente en los piezómetros laterales implicaría un mayor caudal de circulación por estos sectores, en

detrimento del central, y por consiguiente la aceptación de una mayor tasa de infiltración en las inmediaciones de los bordes de las balsas.



**Figura 17**

En el esquema de flujo subterráneo que se propone (figura 17). se puede observar como el domo piezométrico que se produce es anisótropo, con una menor pendiente en el sentido de la circulación hídrica preferencial del acuífero.

Bajo las balsas el flujo es vertical en los primeros metros, pero rápidamente adquiere una fuerte componente horizontal y a unos 100–150 metros de distancia es prácticamente horizontal. Este comportamiento guarda relación con la proximidad del nivel piezométrico original a la superficie.

## **7.- MODELO MATEMATICO**

### **7.1- OBJETIVOS**

Mediante la modelización de los parámetros hidráulicos que intervienen en la experiencia de recarga, se ha perseguido un múltiple objetivo:

- Interpretación de los ensayos de recarga efectuados.
- Evaluación y optimización del régimen de recarga artificial-bombeos en este sector de acuífero.
- Simulación de opciones de explotación.
- Optimización de las condiciones de utilización del dispositivo de recarga y sus condiciones de uso.

Para cubrir este programa se han realizado dos modelos matemáticos. En el primero se ha simulado el acuífero en régimen permanente, con lo que se ha pretendido homogeneizar los datos disponibles, obtener una distribución de permeabilidades coherente con el resto de parámetros, funcionamiento hidráulico y

además, verificar el balance. En el segundo modelo se ha realizado una calibración en régimen transitorio, en el que se han simulado las diferentes hipótesis de recarga y bombeos.

## **7.2.- PLANTEAMIENTO DE LOS MODELOS**

### **7.2.1.- Extensión y límites**

El área modelizada ocupa una extensión de 42,1 Km<sup>2</sup>, y se extiende con una anchura de 5 Km, desde unos 3,5 Km aguas arriba de las balsas, hasta 5 Km aguas abajo de las mismas.

Esta superficie se ha discretizado en 275 elementos rectangulares, mediante una malla de 11 filas y 25 columnas, de tamaños comprendidos entre 100 x 175 metros y 1.000 x 1000 metros, correspondiendo los elementos más pequeños a los sectores donde se dispone de una mayor densidad de datos (inmediaciones de las balsas de recarga), mientras que los más extensos se han asignado a sectores con densidad de información más baja (Figura 18).

El límite meridional de la zona se ha hecho coincidir, aproximadamente, con la divisoria de aguas subterráneas que separa la zona de la mina de Alquife, y se ha simulado mediante nudos de nivel constante; los límites Norte y Oeste se han supuesto de transferencia nula, o impermeables, al ser prácticamente perpendiculares a las isopiezas de referencia utilizadas, y consecuentemente paralelas con la dirección del flujo subterráneo; el límite Este se ha supuesto en parte de transferencia nula, por igual motivo, y el resto se ha simulado mediante nudos de nivel constante.

### **7.2.2.- Parámetros hidrogeológicos**

A cada elemento discretizado se le ha asignado un valor de transmisividad, en función de los datos existentes, y para el caso del modelo en régimen transitorio, una porosidad eficaz.

Los valores de transmisividad son mínimos en el borde occidental de la malla, con valores entre 75 y 200 m<sup>2</sup>/día. En esta zona ha existido cierta dificultad de

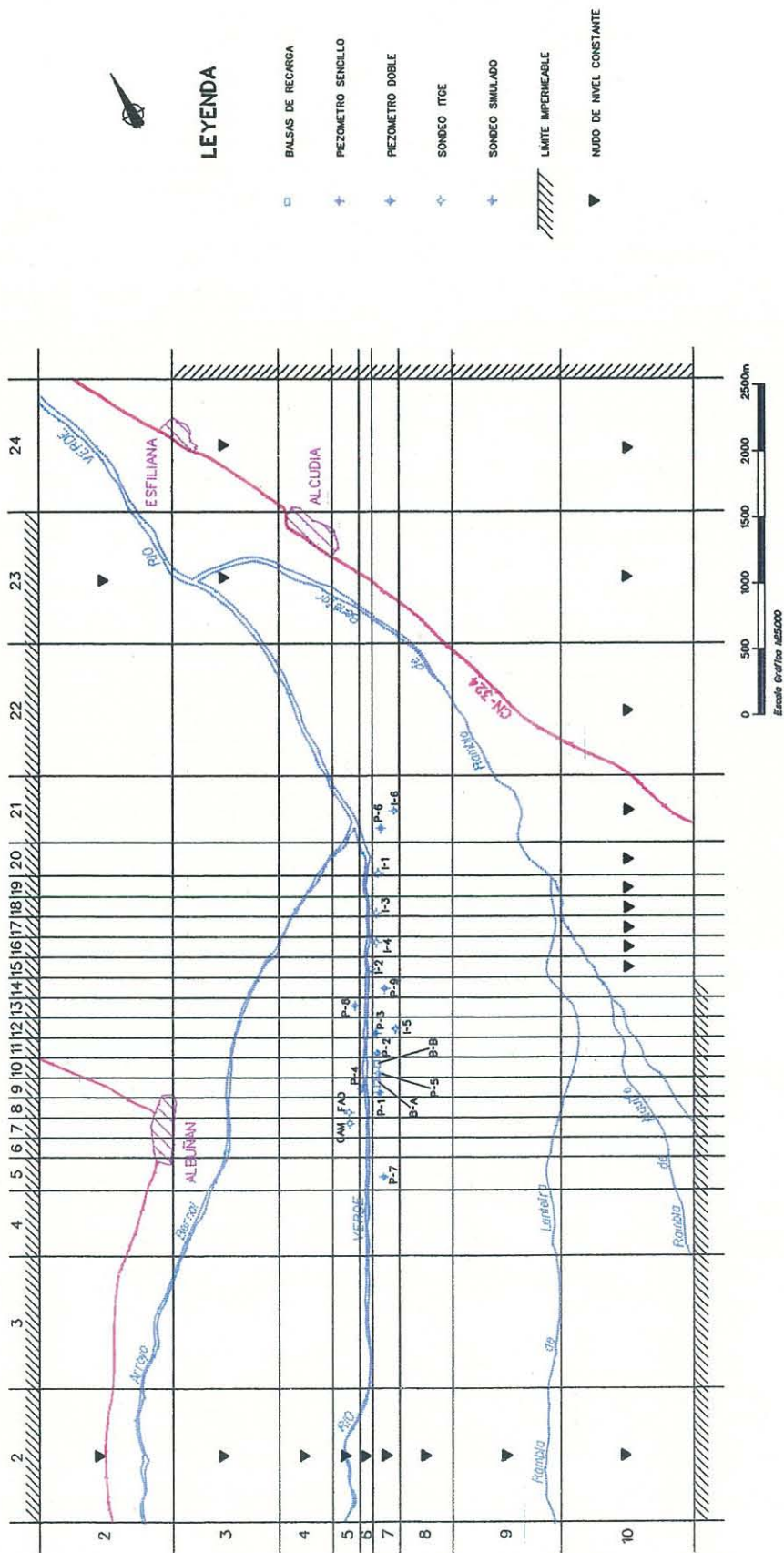


Figura 18.- Malla del modelo matemático y posición de las balsas de recarga y puntos de control

asignación de valores debido al contraste existente entre los depósitos aluviales y la Formación Guadix.

La porosidad eficaz se ha extrapolado, mayoritariamente, a partir de los datos de la zona de la mina de Alquife, donde oscilan entre el 5 y el 15%

### **7.2.3.- Programa utilizado**

Para el modelo matemático de flujo se ha empleado el programa desarrollado por P. Trescott y S.P. Larson para el U.S. Geological Survey; actualmente es uno de los más utilizados, debido, por una parte, a la potencia del algoritmo para la solución del sistema de ecuaciones lineales y, por otra, a la incorporación de un control dinámico de la memoria del ordenador lo que permite abordar problemas de flujo muy complejos.

Sobre la base del programa original se han realizado una serie de modificaciones que afectan tanto a la entrada de datos como a la salida de resultados y al tratamiento de los espesores saturados, que aumentan su flexibilidad.

## **7.3.- MODELO EN REGIMEN PERMANENTE**

### **7.3.1.-Condiciones iniciales**

La situación elegida para el ajuste de niveles piezométricos corresponde a la del año 1.970, en la que se supone que el acuífero estaba poco perturbado.

Las hipótesis consideradas para la simulación son las siguientes:

- Acuífero libre.
- Acuífero de una sola capa.
- Acuífero de espesor unitario.
- Se emplean transmisividades.

A cada uno de los nudos discretizados se le ha asignado un valor de nivel piezométrico a partir de las isopiezas del año 1.970, con algunos retoques en la



zona meridional para ajustarla a los valores conocidos de la mina de Alquife; un coeficiente de almacenamiento, nulo en este régimen, salvo en nudos de nivel constante que, por imperativos del programa, se le asigna un valor negativo; y una transmisividad. El valor de la transmisividad está multiplicado por un valor de anisotropía, según los ejes X, Y, Z, lo que permite realizar ajustes zonales; en nuestro caso se han diferenciado tres grupos de anisotropía: conglomerados de la Formación Guadix, aluvial del río Verde hasta la zona de recarga y aluvial aguas abajo de esta; en todos se ha supuesto una transmisividad vertical 10 veces menor que la horizontal. Además, a cada nudo se le han definido un total de 8 leyes de caudal, para diferenciar los siguientes términos del balance:

- Infiltración por precipitación (común para todos los nudos).
- Retornos en regadíos de la vega.
- Retornos en regadíos invernales del altiplano.
- Infiltración a través de cauces.
- Infiltración a través de acequias.
- Descargas por manantiales.
- Descargas por galerías.
- Descargas por sondeos.

Para facilitar las operaciones de cálculo se ha supuesto el acuífero como una capa de espesor unitario, por lo que no ha sido necesario introducir el valor del espesor saturado.

### **7.3.2.- Calibración y resultados**

La calibración ha tenido por objeto ajustar los niveles piezométricos calculados por el modelo a los reales medidos en la época de referencia (1970). Este ajuste se ha realizado variando únicamente la transmisividad de los nudos, ya que se considera que el resto de los parámetros que intervienen en el balance están lo suficientemente contrastados, o bien tienen escasa incidencia.

El balance final alcanzado se desglosa como sigue:

### **Recarga:**

- Infiltración del agua de lluvia.	1,1 Hm <sup>3</sup> /año
- Retorno de los regadíos.	1,8 Hm <sup>3</sup> /año
- Infiltración en las ramblas.	3,9 Hm <sup>3</sup> /año
- Infiltración en acequias.	3,6 Hm <sup>3</sup> /año
- Entradas laterales zona meridional.	3,0 Hm <sup>3</sup> /año
- Entradas laterales zona oriental.	1,4 Hm <sup>3</sup> /año
	-----
<b>TOTAL</b>	<b>14,7 Hm<sup>3</sup>/año</b>

### **Descargas:**

- Salidas por galerías de drenaje	7,9 Hm <sup>3</sup> /año
- Salidas laterales (nudo del río Verde)	5,8 Hm <sup>3</sup> /año
- Salidas laterales (nudo 10,15)	1,0 Hm <sup>3</sup> /año
	-----
<b>TOTAL</b>	<b>14,7 Hm<sup>3</sup>/año</b>

De este balance se desprende que para el conjunto del acuífero, la recarga por infiltración de las precipitaciones tiene escasa importancia, frente a la recarga por percolación de la escorrentía superficial en ramblas y acequias.

El ajuste de la piezometría obtenido se recoge en la figura 19.

## **7.4.-MODELO EN REGIMEN TRANSITORIO**

### **7.4.1.- Introducción**

Tomando como base el modelo en régimen permanente, se ha efectuado una simulación en régimen transitorio, en la que se ha pretendido analizar la evolución temporal del nivel piezométrico y la de los distintos elementos del balance.

La falta de datos sobre algunos de los elementos de mayor peso en el balance (infiltración en ramblas y acequias, fundamentalmente), ha hecho necesario

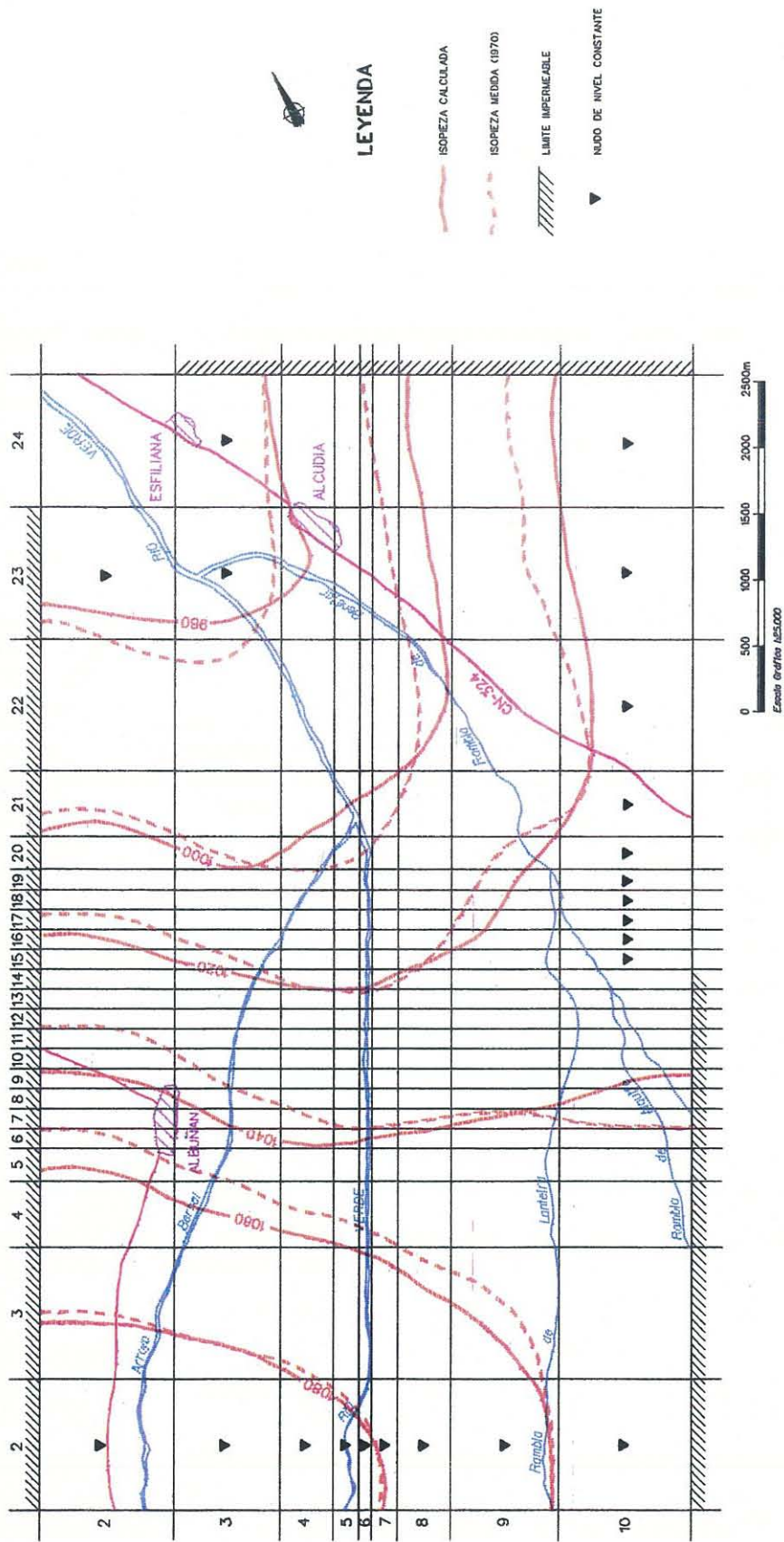


Figura 19.- Ajuste en régimen permanente. Isohipsas

plantear la simulación desde el punto de vista del análisis del efecto que tendrían la recarga y bombeos proyectados, independientemente de otros factores que podrían condicionar la evolución piezométrica del acuífero.

#### 7.4.2.- Condiciones iniciales

Como piezometría inicial se ha utilizado la resultante de la calibración en régimen permanente, no analizándose oscilaciones del valor absoluto del nivel, sino variaciones relativas.

Los valores de transmisividad empleados son los ajustados en régimen permanente, que se consideran como valores fijos y que están suficientemente contrastados. La porosidad eficaz ha sido asignada por sectores, según los datos disponibles, y se ha ido modificando en el proceso de calibración del modelo.

Las leyes del caudal que intervienen en el balance son las utilizadas en régimen permanente, más el concepto de recarga artificial; los valores empleados en este último son los valores reales observados en la última experiencia, anteriormente comentada.

Estas leyes de caudal son variables en el tiempo, siendo sus intervalos mensuales los siguientes:

**DISTRIBUCION TEMPORAL DE RECARGAS Y DESCARGAS**

	Sp	Oc	Nv	Dc	En	Fe	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag
Retornos de regadíos en la vega (m <sup>3</sup> /d/ha)	10	--	--	--	--	--	--	20	30	40	50	50
Retornos de regadíos eventuales en el altiplano (m <sup>3</sup> /d/ha)	5	--	--	--	--	--	--	10	15	20	25	25
Infiltración por ramblas y acequias (%)	--	5	10	25	25	15	10	5	5	--	--	--
Descarga por galerías	7	7	9	9	9	9	9	9	9	9	7	7

La recarga por infiltración de las precipitaciones se ha simulado como constante en el tiempo, hecho que no debe distorsionar el resultado a causa del pequeño peso específico de este concepto en el balance.

Las descargas por galerías constituyen el elemento del balance más difícil de cuantificar y que más dudas ofrece en cuanto a su valor absoluto y distribución temporal. A falta de mejores datos se han tomado las descargas mensuales del año 1.984.

Las balsas se han representado en dos nudos diferentes, 7-9 y 7-10; al primero de ellos se le ha atribuido el 66% de la superficie de infiltración y al segundo el 34%, de acuerdo con la situación que estas tienen en la realidad.

#### **7.4.3.- Calibración**

La calibración del régimen transitorio ha consistido en reproducir el período histórico comprendido entre Septiembre de 1.988 y Agosto de 1.989, en intervalos mensuales.

Como ya se ha indicado, la piezometría inicial utilizada ha sido la calculada en el régimen permanente. Como referencia para ajustar la evolución de los niveles se han utilizado los siguientes piezómetros:

PIEZOMETRO	NUDO
P-1	7-9
P-2	7-11
P-4	6-9
P-5	7-10
P-6	7-21
P-8	5-13
P-9	7-14
FAO	5-8
I-1	7-20
I-2	6-15
I-3	7-18
I-4	7-16

El proceso de calibración ha consistido, fundamentalmente, en el ajuste de la distribución en el tiempo de los distintos componentes del balance, hasta obtener una tendencia de la evolución de niveles calculados similar a la de los históricos, y en

la modificación de la porosidad eficaz hasta conseguir una amplitud, en las variaciones de nivel, equivalente a la de los datos medidos.

Una vez finalizado el proceso de calibración se ha conseguido reflejar de forma bastante satisfactoria la tendencia y la amplitud de las oscilaciones de nivel. Ha existido un desfase entre las cotas absolutas del modelo real y simulado, ya que la piezometría inicial, resultante de la calibración del régimen permanente, no corresponde a la real del período de simulación (figura 20).

El efecto de la recarga sobre el acuífero se puede observar en la figura 21, donde se representa la extensión del domo de recarga en el mes de Enero de 1.989; se aprecian dos máximos, uno de ellos correspondiente a la infiltración en el cauce del río Verde y el otro, de mayor entidad, que corresponde a la infiltración de las balsas de recarga. El ascenso producido por la recarga artificial en el mes de Enero era superior a 1 metro unos 1.000 metros aguas abajo de las balsas y unos 500 metros a ambos lados del río Verde. Los descensos, una vez finalizado el período de recarga, son muy rápidos en las proximidades de las balsas, alcanzando un nivel ligeramente superior al inicial en el mes de Abril. En los piezómetros más alejados la curva de descensos está suavizada. En el mes de Junio en todos los piezómetros el ascenso residual es prácticamente nulo.

#### **7.4.4.- Resultados**

El proceso de calibración del régimen transitorio ha puesto de manifiesto las más significativas lagunas de información existentes, destacándose la necesidad de completar tanto los datos de infiltración a través de ramblas y acequias, mediante aforos diferenciales, como el drenaje por galerías y manantiales en diferentes épocas del año.

El balance obtenido al final del período simulado es el siguiente:

#### **Recarga:**

- Infiltración de la precipitación	1,1 Hm <sup>3</sup> /año
- Retorno de los regadíos	1,9 Hm <sup>3</sup> /año
- Infiltración en las ramblas	3,9 Hm <sup>3</sup> /año

- Infiltración en las acequias	3,7 Hm <sup>3</sup> /año
- Entradas laterales zona meridional	3,0 Hm <sup>3</sup> /año
- Entradas laterales zona oriental	1,3 Hm <sup>3</sup> /año
- Recarga artificial	0,6 Hm <sup>3</sup> /año
- R (variación de reserva)	-0,4 Hm <sup>3</sup> /año
	-----
<b>TOTAL</b>	<b>15,1Hm<sup>3</sup>/año</b>

**Descargas:**

- Salidas por galerías de drenaje	8,4 Hm <sup>3</sup> /año
- Salidas laterales (nudos del río Verde)	5,7 Hm <sup>3</sup> /año
- Salidas laterales (nudo 10-5)	1,0 Hm <sup>3</sup> /año
	-----
<b>TOTAL</b>	<b>15,1 Hm<sup>3</sup>/año</b>

**7.5.- SIMULACION DEL EFECTO RECARGA-BOMBEO**

**7.5.1.- Planteamiento**

Con esta simulación se pretende predecir el comportamiento del acuífero, ante un sistema de explotación que conjugue la recarga artificial y el bombeo desde los sondeos existentes.

Para ello, se ha supuesto que entre los meses de Noviembre a Marzo se va a inyectar un caudal constante de 14.000 m<sup>3</sup>/día (162 l/seg), con lo que el volumen recargado se sitúa en 2,1 Hm<sup>3</sup>. También se ha tenido en cuenta otro caso en que el período de recarga se amplía a las noches (6horas) de Septiembre-October y Abril-Junio, con el mismo caudal, incrementando el volumen infiltrado a 2'6 Hm<sup>3</sup>.

Por otra parte se supone que los bombeos se van a realizar desde un conjunto de 6 sondeos, con los que se va a complementar la dotación de cerca de 1.400 Has de regadío, cuyo déficit en años de pluviometría normal es de 0,88 Hm<sup>3</sup>, y de 2,3 Hm<sup>3</sup> en años secos.

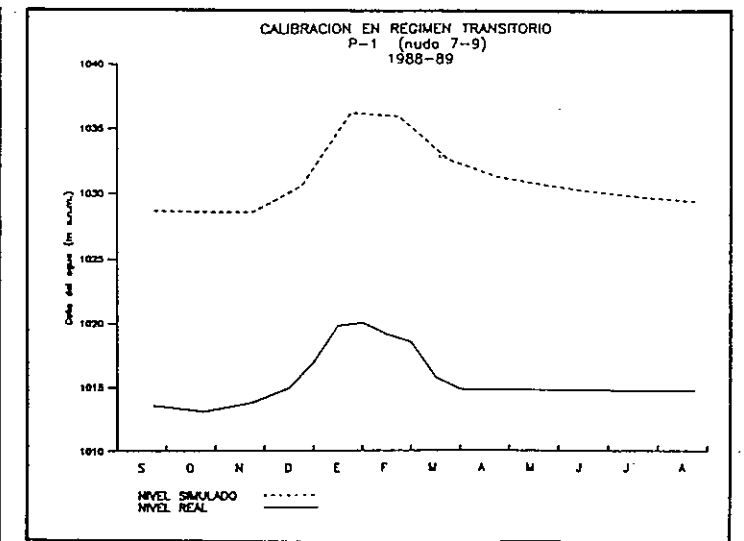
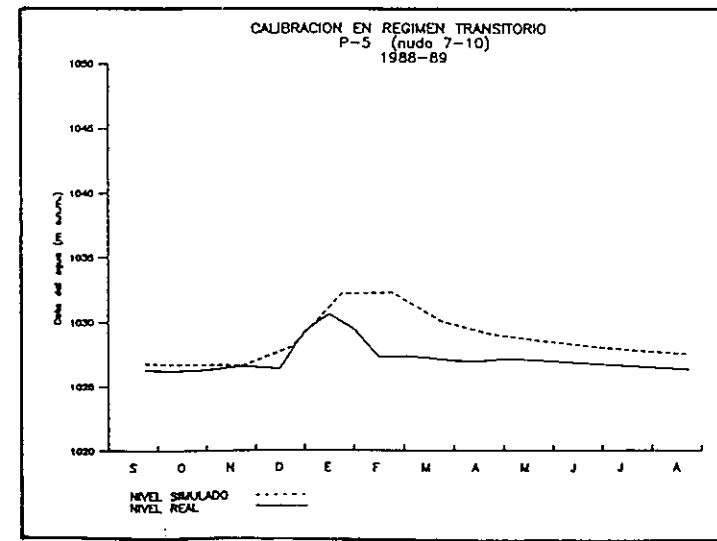
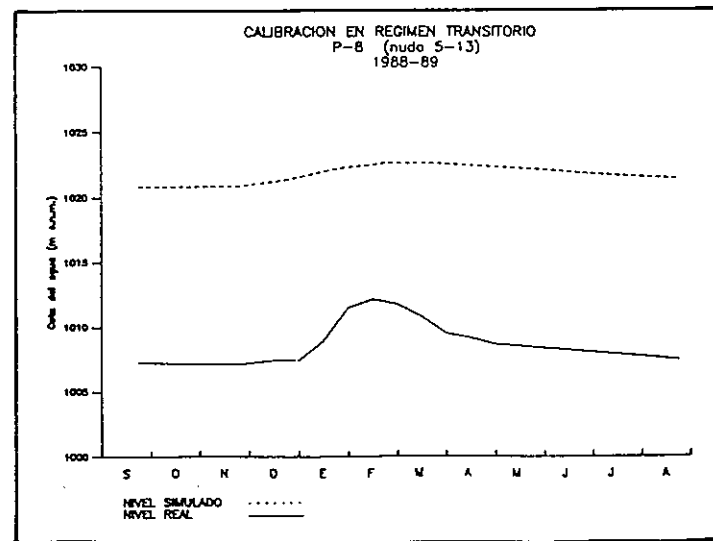
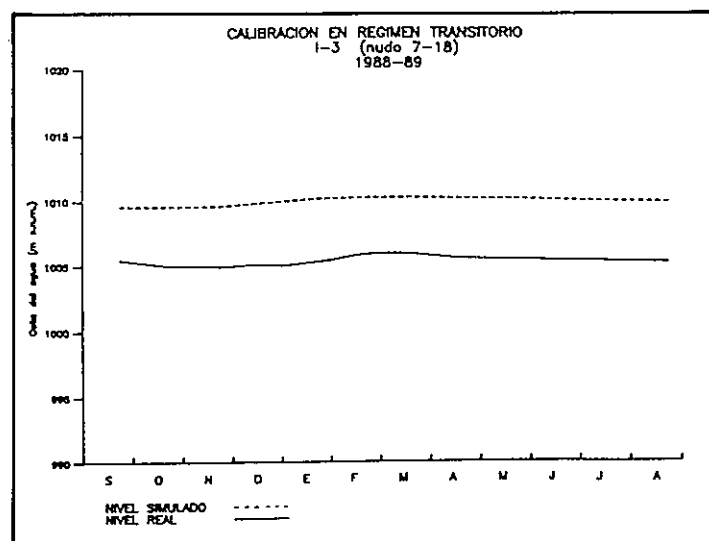
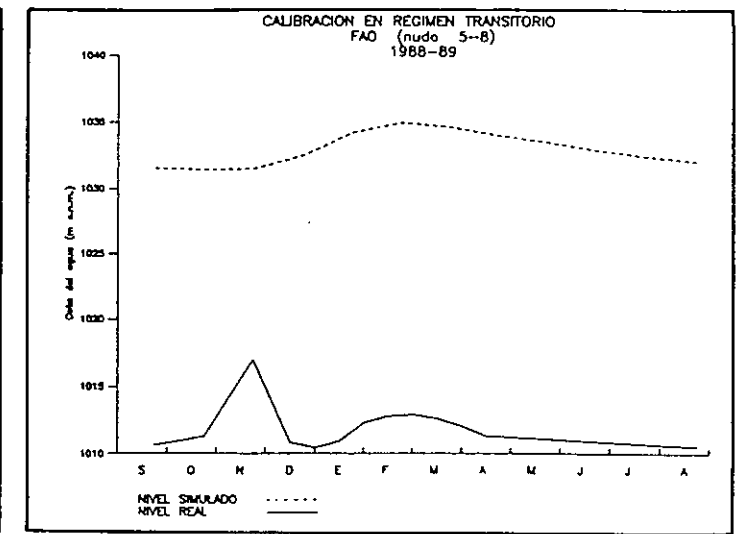
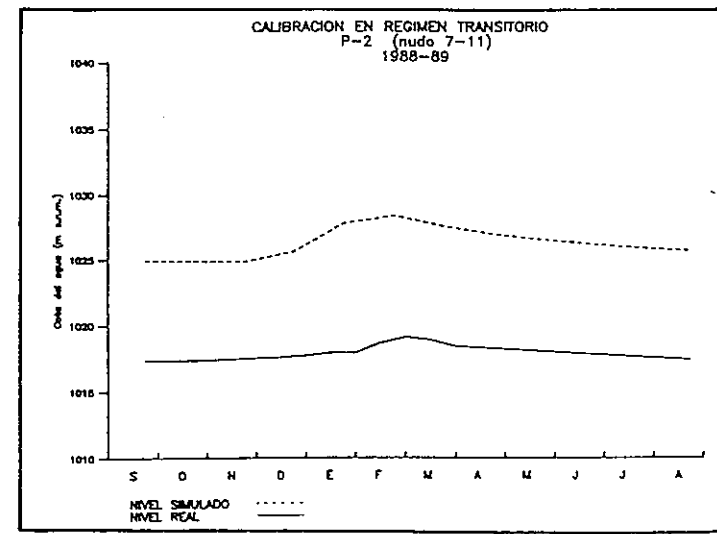
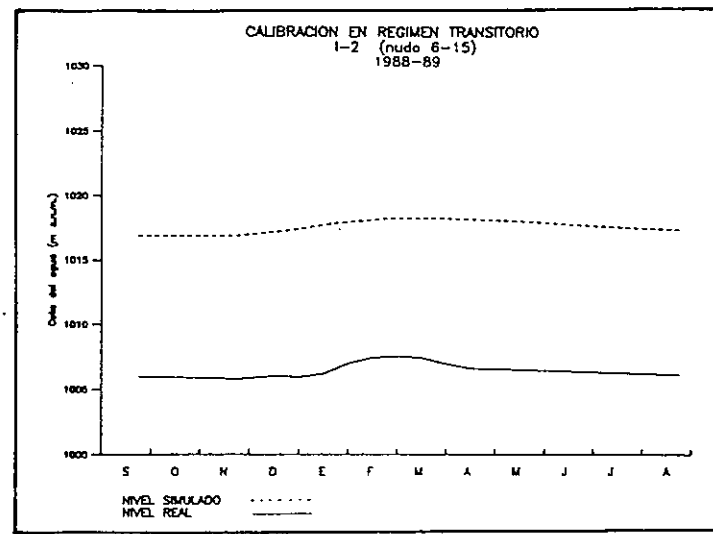
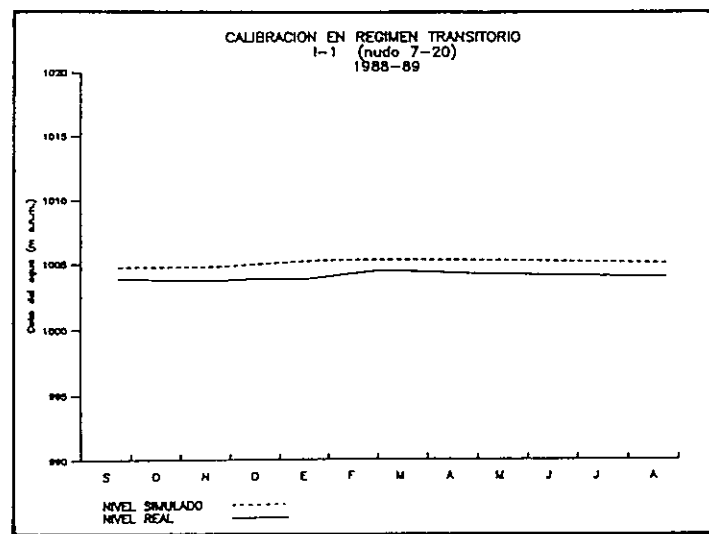
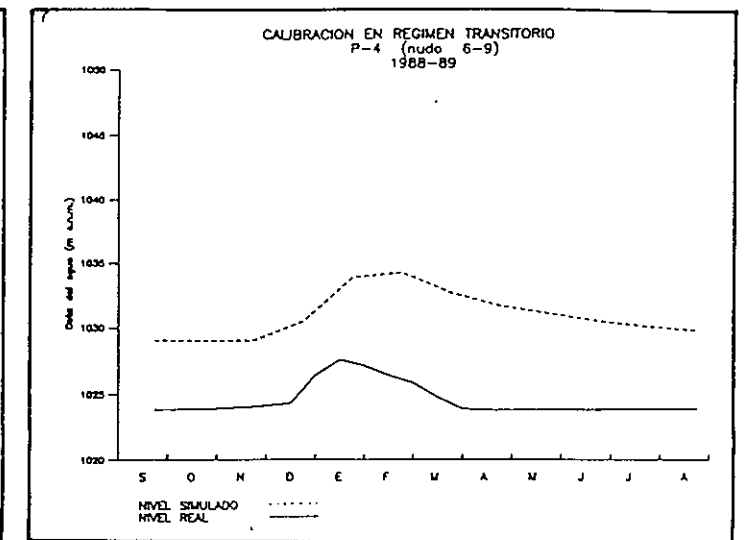
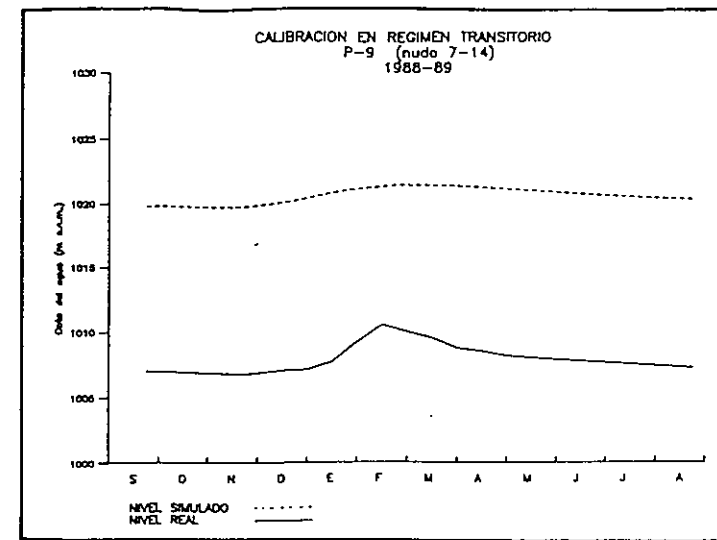
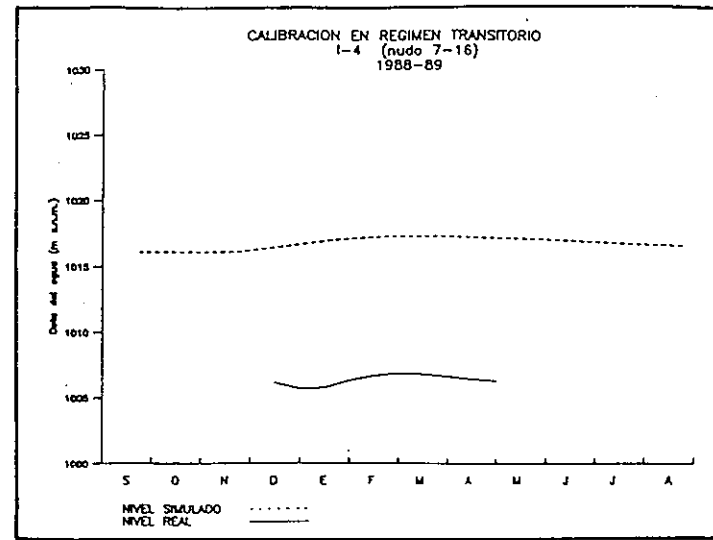
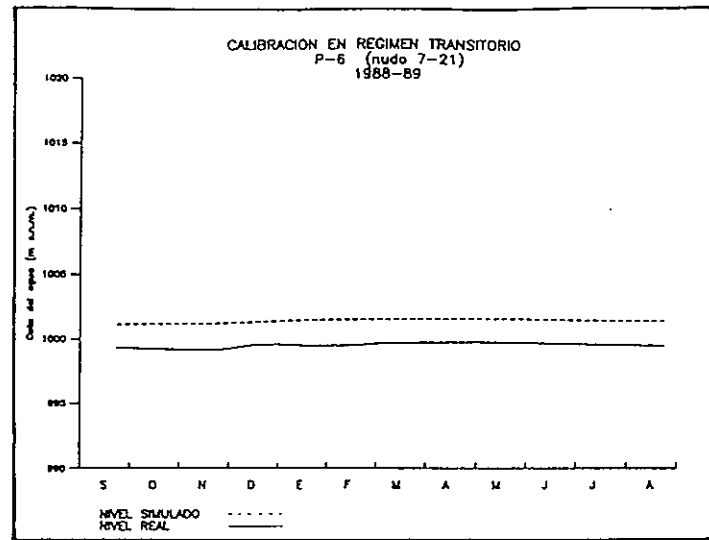
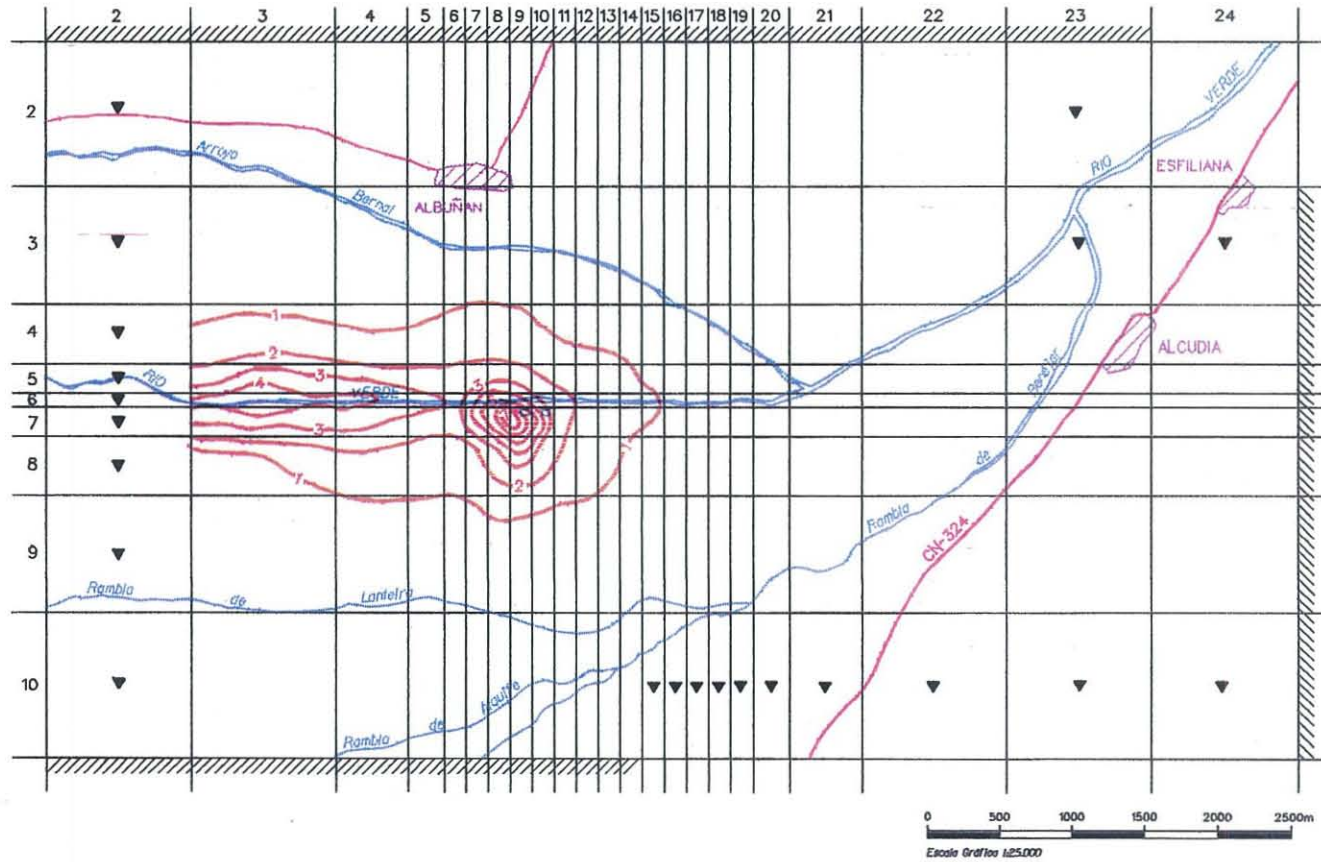


FIG.20-HIDROGRAMAS DEL AJUSTE EN REGIMEN TRANSITORIO





LEYENDA

- LINEA DE ISOVARIACION DE NIVEL
- LIMITE IMPERMEABLE
- ▼ NUDO DE NIVEL CONSTANTE
- BALSAS DE RECARGA

Figura 21.- Ajuste en régimen transitorio. Isovariación de niveles piezométricos. Enero 1.989

RS332684-DEN

La simulación se ha realizado suponiendo el caso más desfavorable, en el que se necesitarían los siguientes bombeos:

- Junio: 26.200 m<sup>3</sup>/día.
- Julio: 36.350 m<sup>3</sup>/día.
- Agosto: 12.725 m<sup>3</sup>/día.

Las extracciones se realizarían por igual en los seis sondeos, con un caudal punta, en cada pozo, de unos 70 l/seg en el mes de Julio.

Con objeto de conocer el efecto de la recarga sobre el conjunto del área modelada, se han dado tres pasadas, simulando un periodo de 12 meses (Septiembre a Agosto) con las siguientes características:

- **1ª Pasada (JMSRGT21):** es una pasada de control; no tiene ni recargas ni bombeos. Se ha dado con objeto de tener unos niveles piezométricos de referencia del acuífero sin ninguna alteración.
- **2ª Pasada (JMSRGT22):** en esta pasada se ha supuesto que se efectúa la recarga descrita (14.000 m<sup>3</sup>/día) de Noviembre a Marzo, pero no se realizan extracciones.
- **3ª Pasada (JMSRGBS3):** similar a la anterior pero incrementa el tiempo de recarga a razón de 6 horas diarias, (3500 m<sup>3</sup>/día) durante cinco de los restantes meses, con lo que se recarga un total de 2'6 Hm<sup>3</sup> y se conjuga con las extracciones previstas para cubrir el déficit estimado.

Se ha dado una última pasada (JMSRGBS4) de 19 meses de duración, entre Septiembre y Marzo, con objeto de estimar el comportamiento del acuífero tras dos períodos de recarga y uno de bombeo (volumen total recargado 5'2 Hm<sup>3</sup>, volumen total bombeado 2'1 Hm<sup>3</sup>).

#### **7.5.2.- Resultados**

Para analizar de forma comparada los resultados de las diferentes hipótesis simuladas, se han dibujado planos de isovariación de niveles en diversas fechas.

En las proximidades de las balsas el efecto de la recarga es prácticamente instantáneo, con un ascenso de niveles que supera los 5 m. en el primer mes, y llega a 15 m. al finalizar el período de recarga. En Enero, el domo piezométrico producido tiene un radio de unos 1.500 m. y actúa a modo de barrera ante la infiltración que se produce en el aluvial del río Verde, lo que a su vez produce la expansión de la zona afectada (Figura 22).

En el caso de no producirse bombeos (pasada JMSRGT22), los efectos de la recarga aún perduran en Julio con un ascenso residual de 3 m. bajo las balsas (Figura 23).

Para el supuesto de bombear desde la batería de sondeos existente, se produce un conoide piezométrico, que alcanza depresiones de -4 m. en el centro de la batería en el mes de Agosto (figura 24). En las inmediaciones de las balsas se encontraría la línea de isovariación de valor 0, y aguas arriba aún perduraría, en este mes, un domo piezométrico residual con una altura máxima de 2 m.

La recarga de nuevos volúmenes tras estos bombeos, hipótesis simulada en la pasada JMSRGBS 4, hace recuperar el conoide piezométrico asociado a las extracciones y produce un nuevo domo aún de mayores dimensiones que el producido tras la primera recarga (figura 25), que tiende a extenderse hacia el Oeste.

En la última pasada, JMSRGBS4, se comprueba como los efectos negativos de la batería de sondeos (descenso de niveles) son equilibrados por la recarga artificial del acuífero en el invierno siguiente, por lo que se demuestra que su utilización conjunta es eficaz para mantener el actual régimen hidráulico de equilibrio. En el mes de Marzo y tras la segunda recarga, el domo piezométrico es más amplio que el producido en la recarga previa a los bombeos (Figura 25).

La cuantificación de los diversos elementos que intervienen en el balance de las pasadas simuladas se recogen en la tabla adjunta. En ella se omiten los datos de la pasada JMSRGBS4 ya que en ella no se ha considerado un ciclo hidráulico completo sino hasta el mes de Marzo.

La baja difusividad hidráulica del acuífero hace que la recarga se refleje, fundamentalmente, en la variación de la reserva, con un incremento de  $1,6 \text{ hm}^3$ , que se

traduce en aumentos del nivel piezométrico en el entorno de las balsas. También se manifiesta, aunque en menor medida, en un aumento de las salidas por las galerías de drenaje (0,3 hm<sup>3</sup>).

En la pasada JMSRGBS3, simulación conjunta de recarga y bombeos, se pone de manifiesto un incremento de la reserva en 0'2 Hm<sup>3</sup> respecto a la pasada de referencia (JMSRGT21), una afección al caudal de drenaje de las galerías de 0'1 Hm<sup>3</sup> y una disminución de las entradas laterales de 0'2 Hm<sup>3</sup>.

CONCEPTOS	PASADAS		
	JMSRGT21 (hm <sup>3</sup> )	JMSRGT22 (hm <sup>3</sup> )	JMSRGBS3 (hm <sup>3</sup> )
<b><u>ENTRADAS</u></b>			
* Infiltración de la precipitación	1,1	1,1	1,1
* Retorno de los regadíos	1,9	1,9	1,9
* Infiltración en ramblas y acequias	7,6	7,6	7,6
* Entradas laterales	4,1	3,9	3,9
* Recarga artificial	-	2,1	2,6
<b>TOTAL</b>	<b>14,7</b>	<b>16,6</b>	<b>17,1</b>
<b><u>SALIDAS</u></b>			
* Galerías de drenaje	8,2	8,5	8,1
* Bombeos	-	-	2,3
* Salidas laterales	6,5	6,5	6,5
<b>TOTAL</b>	<b>14,7</b>	<b>15,0</b>	<b>16,9</b>
Variación de la reserva	-	+1,6	+0,2

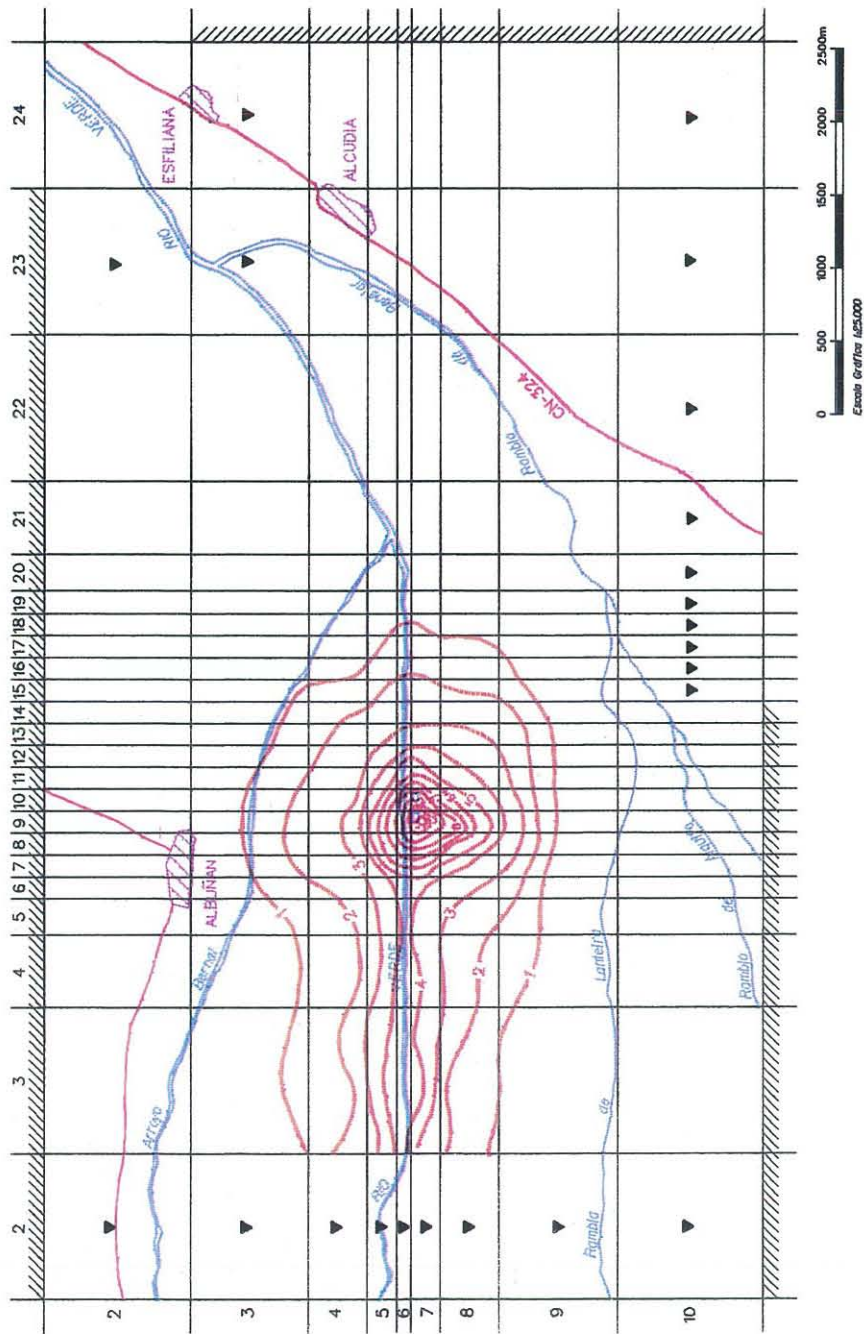
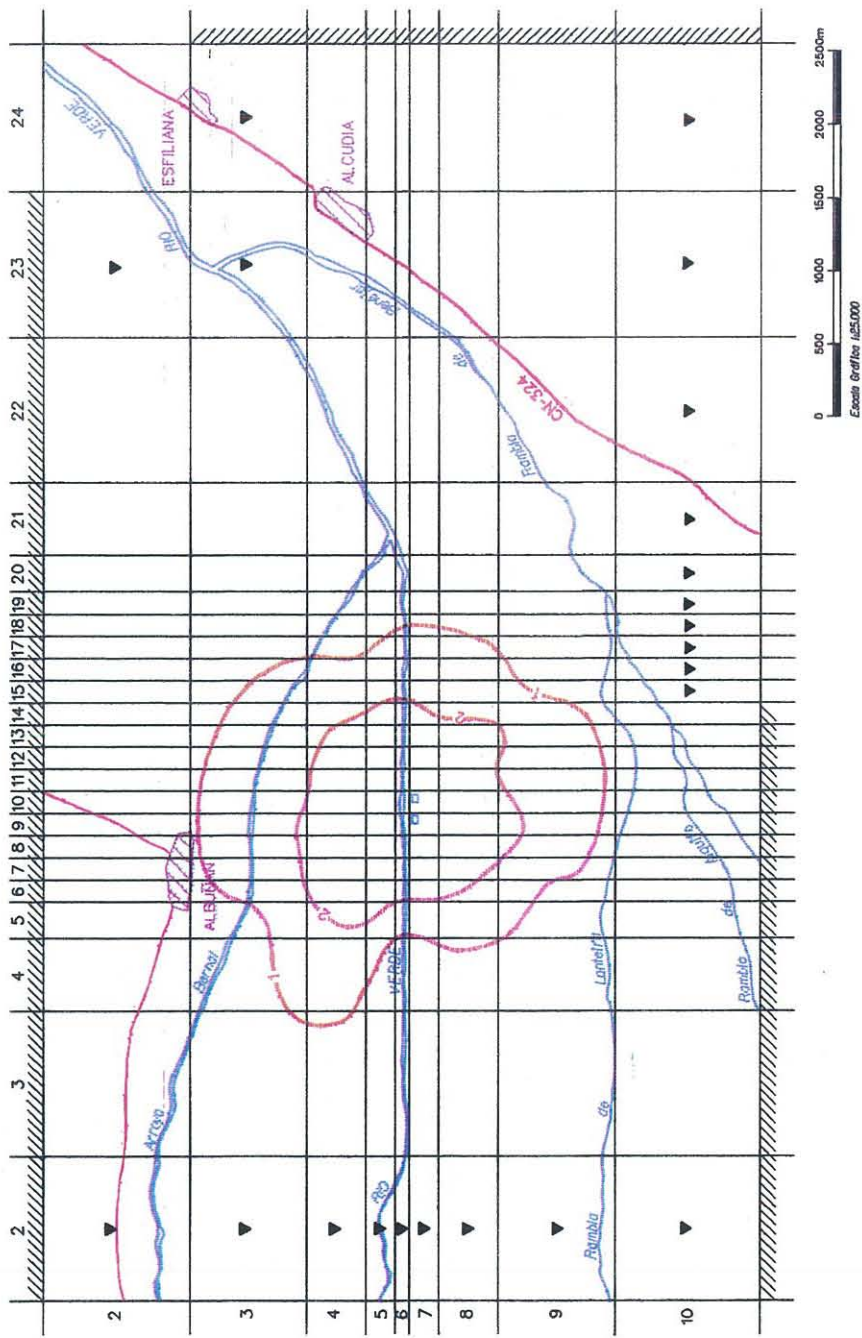


Figura 22.- Pasada JMSRGT22. Isovariación de niveles piezométricos. Enero

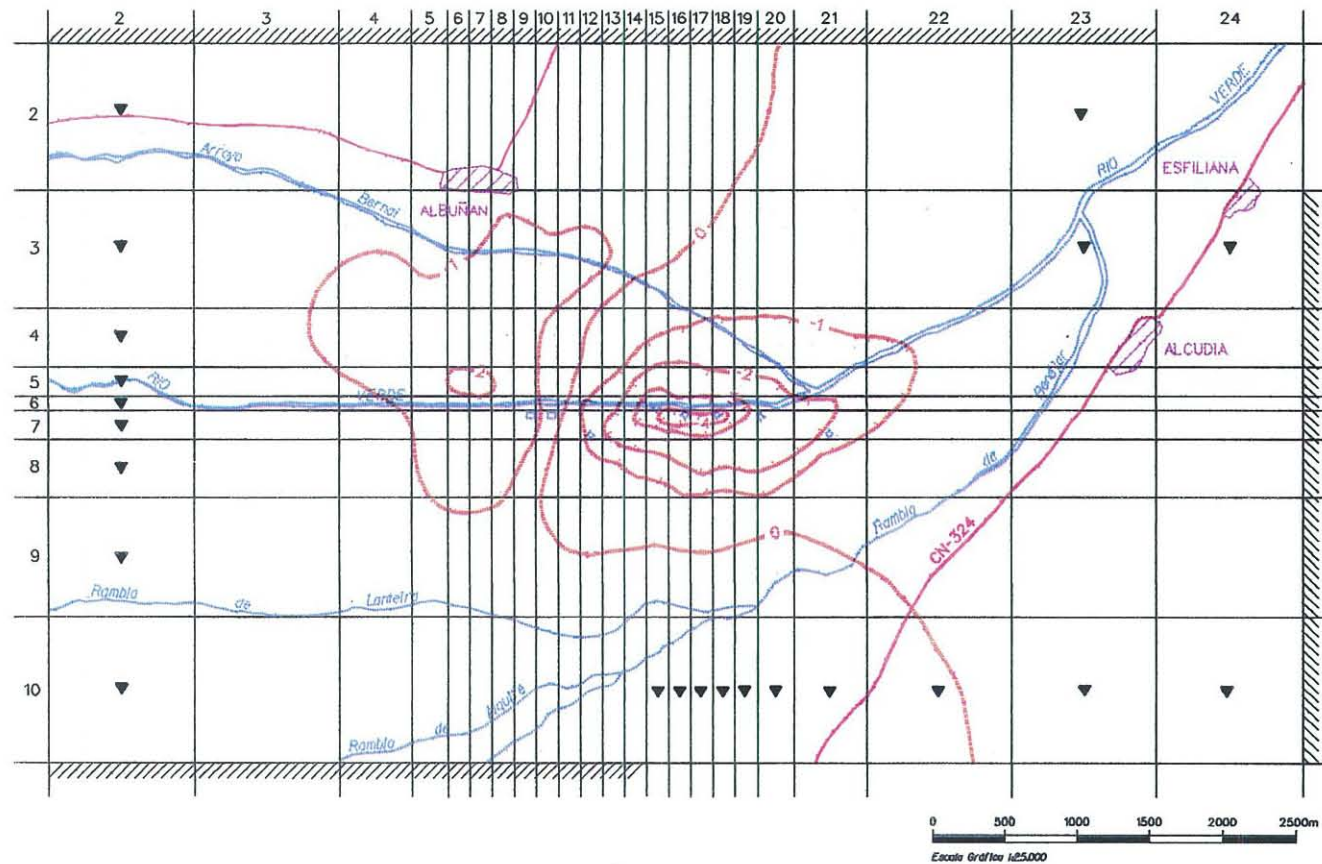


**LEYENDA**

- LINEA DE ISOVARIACION DE NIVEL
- ▨ LIMITE IMPERMEABLE
- ▼ PUNDO DE NIVEL CONSTANTE
- BALSAS DE RECARGA

NOTA: VOLUMEN TOTAL RECARGADO EN EL PERIODO SIMULADO: 2,9hm<sup>3</sup>

Figura 23.- Pasada JMSRGT22. Isovariación de niveles piezométricos. Julio

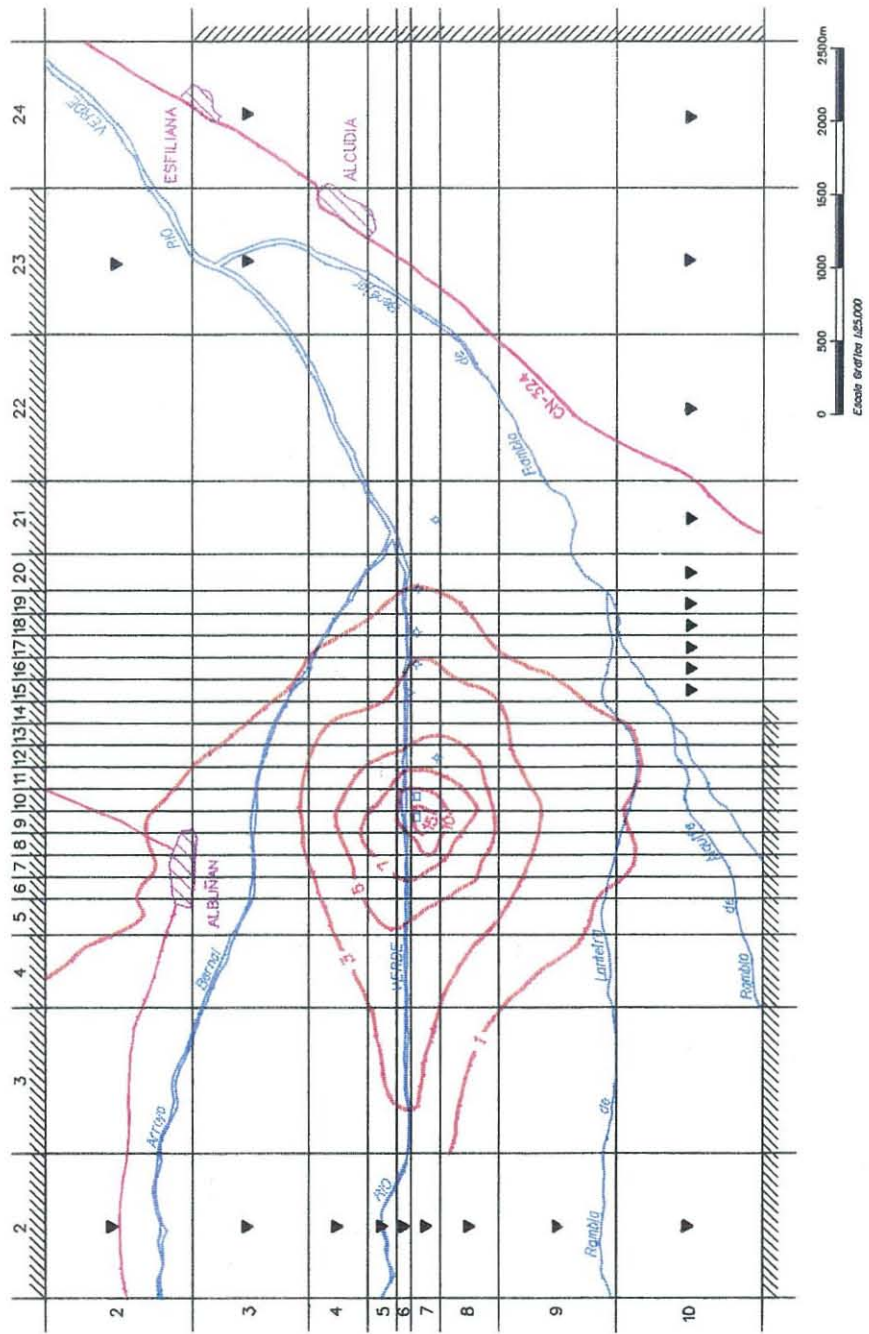


**LEYENDA**






- LINEA DE ISOVARIACION DE NIVEL
- LIMITE IMPERMEABLE
- PUNTO DE NIVEL CONSTANTE
- BALSAS DE RECARGA
- SONDEO SIMULADO

**NOTA:** VOLUMEN TOTAL RECARGADO EN EL PERIODO SIMULADO: 2,6 hm<sup>3</sup>  
 VOLUMEN TOTAL BOMBEADO EN EL PERIODO SIMULADO: 2,3 hm<sup>3</sup>

**Figura 24.- Pasada JMSRGBS3. Isovariación de niveles piezométricos. Agosto**



**LEYENDA**

-  LINEA DE ISOVARIACION DE NIVEL
-  LIMITE IMPERMEABLE
-  PUNTO DE NIVEL CONSTANTE
-  BALSAS DE RECARGA
-  SONDEO SIMULADO

NOTA: VOLUMEN TOTAL RECARGADO EN EL PERIODO SIMULADO: 5,2 hm<sup>3</sup>  
 VOLUMEN TOTAL BOMBREADO EN EL PERIODO SIMULADO: 2,3 hm<sup>3</sup>

Figura 25.- Pasada JMSRGBS4. Isovariación de niveles piezométricos. Marzo



## **8.- VIABILIDAD TECNICA Y ECONOMICA**

### **8.1.- VIABILIDAD TECNICA**

La viabilidad técnica de cualquier operación de recarga artificial está condicionada fundamentalmente por los siguientes factores:

- Disponibilidad de agua.
  
- Superficie de infiltración de características adecuadas y en cantidad suficiente.

Los resultados de las experiencias de recarga realizadas en el acuífero de Guadix ponen claramente de manifiesto la viabilidad técnica de la recarga.

En efecto, la disponibilidad del agua está garantizada por las necesidades de bombeo de la mina de Alquife de la C.A.M. y no está sujeta a variaciones estacionales o climáticas; su calidad es apropiada para la recarga, además de no llevar materiales en suspensión, su quimismo no dará lugar a reacciones perjudiciales con la formación recargada. Por otra parte su contenido en nutrientes (fosfatos y nitrógeno) es muy bajo con lo que no se favorece la proliferación de algas y colonias bacterianas.

Por otra parte la capacidad de infiltración deducida puede considerarse aceptable, con valores de 1 m/día para una lámina de agua en las balsas de 2,5 metros. Ello supone que para la recarga de unos 14.000 m<sup>3</sup>/día, cifra barajada en las hipótesis de simulación, se necesitarían 1,4 Has de superficie filtrante.

## 8.2.- VIABILIDAD ECONOMICA

### 8.2.1.- Inversión

Las obras a realizar para el futuro dispositivo y su coste económico serían:

#### Obras de infraestructura:

- Adquisición de terrenos, construcción de balsas, canales de entrada y salida e instalación de valla de protección 16.600.000 Pts

#### Instalaciones complementarias:

- Vertederos de control con limnígrafos, estación meteorológica y pistas de acceso 1.725.000 Pts

#### Sondeos de explotación:

- Dos sondeos de 200 metros con línea eléctrica y equipos de impulsión 21.000.000 Pts

**TOTAL** **35.385.000 Pts**

El costo total de las obras a realizar es, por tanto, de 35-36 millones de pesetas.

### 8.2.2.- Costes de explotación

#### Personal:

- Control del dispositivo a 2 horas/día 500.000 Pts

Mantenimiento:

- 10% de la inversión 3.600.000 Pts

Consumo energético:

- 2,3 Hm<sup>3</sup> con un consumo de 0,4 Kw/hora a un precio de 12 Pts/Kw 11.040.000 Pts

**TOTAL**

**15.140.000 Pts**

El coste de explotación del sistema, para unos bombeos de 2,3 Hm<sup>3</sup>, ascendería a algo más de 15 millones de pesetas.

**8.2.3.- Repercusión económica**

Para estimar la repercusión económica de las inversiones a realizar y los costes de explotación en el regadío, se ha supuesto un periodo de amortización de las instalaciones de 10 años, una inflación del 5% anual y unos intereses del 8% para el capital.

El costo del m<sup>3</sup> de agua para el año 1.990, sería de 9,35 Pts, de las que unas 6,6 Pts corresponden a gastos de energía y mantenimiento, y el resto a la amortización de las inversiones. Para los años siguientes el costo puede observarse en tabla adjunta.

Con estas actuaciones se mejoraría el riego de 1.412 Has, de las que unas 500 Has están en la actualidad infrautilizadas por falta de dotación hídrica en los meses veraniegos. Asumiendo todo el coste por parte de esta superficie, la repercusión por hectárea sería de 43.000 Pts, cifra que puede ser perfectamente asumida dado el elevado rendimiento de los cultivos de verano (hortalizas, verduras y frutales) en esta zona.

## COSTE DEL AGUA DURANTE EL PERIODO DE AMORTIZACION

### COSTE DEL m<sup>3</sup> (ptas.corrientes), HIPOTESIS I

ANO	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
<b>INVERSION</b>										
Obras de infraestructura	12660000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Instalaciones complementarias	1725000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sondeos de extracción	21000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>TOTAL INVERSION</b>	<b>35385000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>INTERES (%)</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>
<b>INVERSION A AMORTIZAR</b>										
Capital	3538500	3538500	3538500	3538500	3538500	3538500	3538500	3538500	3538500	3538500
Intereses	2830800	2547720	2264640	1981560	1698480	1415400	1132320	849240	566160	283080
<b>TOTAL AMORTIZACION</b>	<b>6369300</b>	<b>6086220</b>	<b>5803140</b>	<b>5520060</b>	<b>5236980</b>	<b>4953900</b>	<b>4670820</b>	<b>4387740</b>	<b>4104660</b>	<b>3821580</b>
<b>COSTES DE EXPLOTACION</b>										
Personal	500000	525000	551250	578813	607753	638141	670048	703550	738728	775664
Mantenimiento	3600000	3780000	3969000	4167450	4375823	4594614	4824344	5065562	5318840	5584782
Energía (0,4 kw/m <sup>3</sup> )	11040000	11592000	12171600	12780180	13419189	14090148	14794656	15534389	16311108	17126664
<b>TOTAL COSTES DE EXPLOTACION</b>	<b>15140000</b>	<b>15897000</b>	<b>16691850</b>	<b>17526443</b>	<b>18402765</b>	<b>19322903</b>	<b>20289048</b>	<b>21303500</b>	<b>22368675</b>	<b>23487109</b>
<b>INFLACION PREVISTA (%)</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>TOTAL (I.AMORTIZAR + C.EXPLOTACION)</b>	<b>21509300</b>	<b>21983220</b>	<b>22494990</b>	<b>23046503</b>	<b>23639745</b>	<b>24276803</b>	<b>24959868</b>	<b>25691240</b>	<b>26473335</b>	<b>27308689</b>
<b>VOLUMEN DE AGUA SUMINISTRADO (m<sup>3</sup>)</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>	<b>2300000</b>
<b>COSTE m<sup>3</sup></b>	<b>9,35</b>	<b>9,56</b>	<b>9,78</b>	<b>10,02</b>	<b>10,28</b>	<b>10,56</b>	<b>10,85</b>	<b>11,17</b>	<b>11,51</b>	<b>11,87</b>

## **9.- MANUAL DE OPERACIONES DE LA RECARGA**

El dispositivo de recarga experimentado podría jugar en el futuro un importante papel en la regulación y aprovechamiento de los recursos hídricos de la zona. Su eficiencia dependerá en buena medida de la adecuada utilización y mantenimiento del sistema; por ello, se recogen a continuación una serie de ideas básicas que, aunque algunas de ellas están ya implícitas en apartados anteriores, se consideran importantes para su funcionamiento óptimo.

### **9.1.- SISTEMA DE OPERACION**

Las disponibilidades de agua para la recarga están condicionadas por los caudales cedidos por la C.A.M. y las demandas para regadío, con independencia de la posible utilización de excedentes de escorrentía superficial en un futuro próximo.

Como ya se ha indicado con anterioridad, la demanda de agua para los regadíos comienza entre Abril y Junio y finaliza en Septiembre u Octubre, según sea la pluviometría del año. Durante el resto del año, Noviembre-Marzo, el caudal vertido por la C.A.M. se destinaría las 24 horas del día a la recarga.

La capacidad de infiltración en la zona, próxima a 1 m/día y la superficie de las balsas prevista, unos 14.000 m<sup>2</sup>, hacen que el volumen total infiltrado dependa

fundamentalmente del caudal vertido, por lo que es importante controlar, durante la época de menos demanda, que el agua bombeada desde la mina se utilice para la recarga, sin desviarse hacia otros posibles usos.

En los periodos en los que se utiliza el agua para riego, se realizarían los trabajos de mantenimiento del dispositivo.

## **9.2.- SISTEMA DE CONTROL**

El sistema de control de la recarga deberá contemplar, al menos, los siguientes aspectos:

- Volumen de agua infiltrado.
- Medida de niveles en las proximidades de las balsas.
- Volumen de agua recuperado.

### **9.2.1.- Volumen de agua infiltrado**

Para su control se medirá el caudal de entrada y salida y el volumen almacenado. Para el caudal de entrada y salida se realizarán sendos vertederos rectangulares de pared delgada con sus escalas en los canales respectivos; además se colocarán limnógrafos, tanto a la entrada como a la salida.

El volumen almacenado en las balsas se controlará mediante una escala limnimétrica y un limnógrafo.

Los limnigramas deberán ser interpretados en gabinete inmediatamente después de retirados, pasándose los datos más relevantes a estadillos o fichas. Como mínimo los estadillos deberán recoger tres medidas diarias (8 h, 16 h y 24 h) además de cualquier otra incidencia: cambios bruscos en el caudal de entrada, o en el almacenamiento de las balsas, variaciones respecto a la referencia, etc.

Por otra parte, en las proximidades de las balsas se colocarán un pluviómetro y un estanque de evaporación, con el fin de conocer las aportaciones de la lluvia y las pérdidas por evaporación. Las medidas deberán realizarse semanalmente.

El control de la infiltración en las balsas deberá complementarse con la realización de aforos diferenciales en ramblas y acequias, al menos cuatro veces al año, para conocer la recarga a favor de sus cauces y poder evaluar su influencia en el balance global de la zona.

#### **9.2.2.- Evolución de niveles en las proximidades de las balsas**

Para el seguimiento de la evolución de los niveles se utilizará la actual red de sondeos y piezómetros, que se complementará con al menos dos nuevos puntos de observación. Estos nuevos piezómetros estarán orientados a obtener datos de crecimiento lateral del domo de recarga, por lo que deberán estar situados a unos 500 metros de la balsa de recarga, a ambos márgenes del río Verde.

En los piezómetros y sondeos en los que no se dispone de limnógrafo se realizará una medida semanal de Noviembre a Marzo y una medida mensual el resto del año.

Los gráficos de los limnógrafos se interpretarán de acuerdo con las recomendaciones dadas para el control de la infiltración.

#### **9.2.3.- Volúmenes de agua recuperados**

El control del dispositivo de recarga se complementará con el seguimiento de los volúmenes de agua recuperados. Los sondeos de explotación deberán equiparse con un medidor de caudal y un reloj para conocer las horas de funcionamiento del sondeo. En la temporada de riego se anotará semanalmente el volumen bombeado y las horas de funcionamiento de cada pozo en explotación.

Las salidas por las galerías de drenaje deberán controlarse semanalmente durante el período de recarga (Noviembre a Marzo) y mensualmente el resto del año.

### **9.3.- MANTENIMIENTO**

De cara al buen funcionamiento del dispositivo de recarga es fundamental un acondicionamiento y mantenimiento adecuado de las instalaciones.

La parcela en la que esten situadas las balsas de recarga debe quedar completamente vallada y repoblada con vegetación autóctona para minimizar el impacto visual. Dentro del área protegida por la valla deberá situarse el pluviómetro, el estanque de evaporación y los vertederos y limnigrafos de control de los caudales de entrada, de salida, y de la balsa. Se colocarán los correspondientes carteles informativos. La compuerta de derivación del canal de la C.A.M. a la balsa de recarga deberá quedar protegida de manera que solamente personal autorizado tenga acceso a ella.

El cuidado y mantenimiento de las balsas de infiltración es primordial para el buen funcionamiento continuado del dispositivo de recarga.

Los problemas más habituales que se presentan en los sistemas de recarga en superficie, como el proyectado, están originados por la reducción progresiva de la capacidad de infiltración de las balsas. Esta disminución de la permeabilidad suele estar ocasionada por la decantación de sólidos en suspensión, el crecimiento de algas y colonias bacterianas, la incrustación química y la compactación por sobrecarga.

Dada la procedencia del agua para la recarga, el ritmo previsible de colmatación por materiales en suspensión e incrustación química es muy bajo.

Para combatir el desarrollo de algas y colonias bacterianas el mejor sistema es el vaciado periódico de la balsa que en este caso coincidirá con los periodos de riego intensivo. Una vez vacías las balsas se dejarán secar, permitiendo el desarrollo natural de vegetación en su fondo. Antes del inicio del nuevo ciclo de recarga, principios de Noviembre, se procederá a la limpieza del fondo retirando la vegetación y los limos que pudiera haber; durante esta operación se evitará el uso de maquinaria pesada para no favorecer la compactación de la zona. Si fuese necesario, se acondicionarán los muros de contención de la balsa, las vías de acceso, etc.



## **10.- ASPECTOS LEGALES**

### **10.1.- ANTECEDENTES**

En Mayo de 1.990, la Dirección General de Obras Hidráulicas publicó el documento "Objetivos, recomendaciones y medidas de coordinación de la Planificación Hidrológica". En él se indica que, para su elaboración, se ha tenido en cuenta la siguiente documentación:

- Planificación Hidrológica. Análisis y Evaluación de las Planificaciones Sectoriales (MOPU-DGOH. Diciembre 1.989).
  
- Síntesis de la Documentación Básica de los distintos Planes Hidrológicos de cuenca.

Para la citada en primer lugar, se han estudiado los siguientes aspectos:

- Abastecimiento.
- Agrario.
- Energético.

- Industrial.
- Avenidas e inundaciones.
- Medio-Ambiente.
- Hidrológico-Forestal.
- Ordenación del Territorio.
- Económico-Financiero.

En todos ellos se han analizado documentos muy variados por su naturaleza (Directivas, Leyes, Decretos, Planes, Programas, Estudios, Ordenes, etc.), por la institución u organismo que los ha producido (Comunidad Europea, Administración Central, Comunidades Autónomas, u otros organismos o empresas públicas o privadas) y por su grado de afección a la Planificación Hidráulica.

El objetivo de la Dirección General no ha sido otro que el de proporcionar un soporte, no exhaustivo, para la elaboración de las medidas de coordinación que el artículo 43.1.a) de la Ley de Aguas y el artículo 92 del Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, exigen como contenido del Plan Hidrológico Nacional.

Como establece el apartado 2.3 del documento: "Es de capital importancia, a la hora de evaluar los recursos disponibles, el carácter conceptual de que el agua es una y sólo una, y que, en efecto, no existe la disyuntiva aguas superficiales-aguas subterráneas, sino que ambas son partes integrantes de un sólo y único recurso, y que pueden, mediante la adecuada explotación, complementarse de forma positiva para lograr mejoras sustanciales en el servicio de la demanda en situaciones punta, tanto en cantidad como en calidad".

Asimismo, unas veces haciendo referencia expresa a la normativa legal, y otras dictando recomendaciones, el documento establece que los Planes Hidrológicos de cuenca, en lo que se refiere a los acuíferos, deben contar entre otros, con:

- 1).- Directrices para recarga y protección de acuíferos.
- 2).- Areas de posible recarga, detallándose objetivos, procedencia, cuantía y calidad del recurso.

- 3).- Relación de acuíferos sobreexplotados o en riesgo de estarlo, así como de los que se encuentren salinizados que están registrados como tales por el Organismo de cuenca.
- 4).- Protección frente a intrusión salina y otras causas de deterioro.
- 5).- Normas para otorgar concesiones por cada unidad hidrogeológica.
- 6).- Características de cantidad y calidad del agua.
- 7).- Programas de lucha contra la contaminación.
- 8).- Establecimiento de perímetros de protección.
- 9).- Exigencia de las condiciones mínimas necesarias para el mantenimiento de los hidrosistemas naturales.
- 10).- Incidencia de los retornos y la posible contaminación.
- 11).- Definición de normas de calidad general aplicable a las aguas destinadas a la recarga de acuíferos.
- 12).- Disposición de una base de datos, actualizada permanentemente, sobre la calidad de los recursos subterráneos.
- 13).- Clasificaciones y condiciones específicas para su protección, de los acuíferos que sean declarados de protección especial.
- 14).- Estudios de explotación, igualmente completos, con y sin los recursos que se propongan transferir desde otro Plan, o entre sistemas del propio ámbito.
- 15).- La transferencia de recursos debe contemplarse como una alternativa a otras posibilidades de incrementar los recursos propios, y así debe analizarse en términos comparativos desde un punto de vista económico, social, ambiental y de afección a los aprovechamientos concesionales existentes.

**16).**– Las actuaciones específicas en cada sistema hidráulico, tienen que estar concretadas en el Proyecto de Directrices.

Por último, y sin intención de exhaustividad, para el caso específico que nos ocupa:

**17).**– Disposición, por parte del Organismo de cuenca, de las aguas sobrantes en los aprovechamientos mineros.

**18).**– Otorgamiento, por el Organismo de cuenca, del aprovechamiento de las aguas sobrantes de explotaciones mineras que sean puestas a su disposición.

## **10.2.– NORMATIVA RELACIONADA CON LA RECARGA ARTIFICIAL**

A continuación se hace una relación de los artículos de la Ley de Aguas (LA) que de alguna manera están relacionados con la recarga proyectada.

La recarga artificial está contemplada como un instrumento de gestión y como tal está recogida en el artículo 40 en el que se establece lo siguiente:

*Artículo 40.– Los planes Hidrológicos comprenderán obligatoriamente:*

*i) Las directrices de recarga y protección de acuíferos.*

En el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica (R.A.P.A), en el desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas se precisa que:

*Artículo 84.1.– El Plan Hidrológico podrá incluir las áreas de posible recarga artificial de acuíferos, para las que se detallarán el objetivo de la recarga, así como la procedencia, cuantía y calidad de los recursos aplicados....*

Al margen de los artículos anteriormente citados, en los que se establece la recarga como instrumento de gestión de los recursos hídricos, hay otra serie de artículos que, sin aludir concretamente a la recarga artificial, afectan al proyecto planteado.

En primer lugar hay que referirse a la posibilidad de utilización, durante los periodos invernales, del agua de drenaje de la mina de Alquife. A este respecto la L.A, contempla las captaciones de agua con motivo de explotaciones mineras en su artículo 55, y se desarrolla en los artículos 174, 175 y 176 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (R.D.P.H).

En concreto en el artículo 175, apartado 1 se dice:

*"si existieran aguas sobrantes, el titular del aprovechamiento minero las pondrá a disposición del Organismo de cuenca, que determinará el destino de las mismas..."*

En el apartado 3 del mismo artículo, se dice:

*"El Organismo de cuenca podrá otorgar concesiones de aprovechamiento de las aguas sobrantes de las explotaciones mineras que sean puestas a su disposición. Tales concesiones serán siempre a precario, sin que su titular consolide derecho alguno ni pueda reclamar indemnización en el caso de reducción o modificación de las características de los caudales concedidos derivados del aprovechamiento minero".*

La realización de los nuevos sondeos de captación de aguas, con que se complementaría el sistema de riegos, debe regirse por lo dispuesto en los artículos 65 a 68 de la L.A.; su desarrollo reglamentario se realiza en el Capítulo III (autorizaciones y concesiones), sección undécima (alumbramiento y utilización de aguas subterráneas); el artículo 184 fija las condiciones para autorización de aprovechamiento de aguas subterráneas.

De otra parte, las obras de infraestructura de recarga y bombeo estarán situadas en las márgenes del río Verde por lo que se ven afectadas por lo dispuesto en los artículos:

*Art.6: en el que se delimita la anchura de la zona de policía (100 m).*

*Art. 69: que establece la utilización o aprovechamiento de los cauces o bienes situados en ellos y requerirá la previa concesión o autorización administrativa.*

Así mismo, en los artículos 4, 5 y 6 del R.D.P.H, se define lo que se considera cauce a efectos de la L.A, las servidumbres a las que está sujeto y la zona de policía.

En el artículo 9, apartado 1, se establecen las limitaciones de uso de estas zonas, entre las que están las alteraciones sustanciales del relieve natural del terreno y las construcciones de todo tipo, ya sean de carácter definitivo o provisional. Este mismo artículo, en su apartado 3, indica que cualquier obra o trabajo en la zona de policía de cauces precisará autorización administrativa previa del Organismo de cuenca.

Los trámites para las autorizaciones en zona de policía están recogidos en los artículos 52 a 54 y 78 y siguientes del R.D.P.H.

La posibilidad de imponer servidumbres forzosas de acueducto, necesarias tanto para la conducción del agua hasta la balsa de recarga como para la distribución de la extraída en los sondeos de explotación, está recogida en el artículo:

*64.1: "Los Organismos de cuenca podrán imponer... la servidumbre forzosa de acueducto, si el aprovechamiento del recurso o su evacuación lo exigiere".*

En el R.D.P.H., en su artículo 19, apartados 2 y 3, se indican los motivos por los que podrán imponerse las servidumbres de acueducto, entre los que se citan el establecimiento o ampliación de riegos.

- El artículo 22 recoge las causas por las que los dueños de los terrenos en los que se trate de imponer la servidumbre podrán oponerse a ella.
- El artículo 23 especifica la forma en que deberá constituirse la servidumbre (acequia cubierta, acequia o tubería).

En cuanto al régimen económico-financiero de la utilización del Dominio Público Hidráulico, recogido en el Título VI de la L.A, el artículo 106 establece que:

*1.- "Los beneficiados por las obras de regulación de aguas superficiales o subterráneas realizadas, total o parcialmente, a cargo del Estado, satisfarán un canon destinado a compensar la aportación del Estado y atender a los gastos de explotación y conservación de tales obras".*

*2.-"Los beneficiados por otras obras hidráulicas específicas realizadas íntegramente a cargo del Estado, (...) satisfarán por la disponibilidad o usos del agua una exacción destinada a compensar los costes de inversión y atender a los gastos de explotación y conservación de tales obras".*

*3.- "La cuantía de cada una de las exacciones se fijará para cada ejercicio presupuestario, sumando las siguientes cantidades:*

*a) El total previsto de gastos de funcionamiento y conservación de las obras realizadas.*

*b) Los gastos de administración del organismo gestor imputables a dichas obras.*

*c) El 4 por 100 del valor de las inversiones realizadas por el Estado, debidamente actualizado, teniendo en cuenta la amortización técnica de las obras e instalaciones y la depreciación de la moneda, en la forma que reglamentariamente se determine".*

4.- *"La distribución individual de dicho importe global, entre todos los beneficiados por las obras, se realizará con arreglo a criterios de racionalización del uso del agua, equidad en el reparto de las obligaciones y autofinanciación del servicio en la forma que reglamentariamente se determine".*



## 11.- BIBLIOGRAFIA

- Allison, L.E. (1947).- Effect of micro-organisms on permeability of soils and the prolonged submergence. Soils Science, Vol. 63.
- Archambault, J.; Bize, J.; Margot, J. (1.968).- "Alimentation artificielle des nappes souterraines". Bull B.R.G.M. Sec. 3 Hydrogeologie.
- Bianchi, W.C.; Muckel, D.C. (1.979).- "Ground water recharge hydrology". U.S. Department of Agriculture. Agricultural Research Service. 41-161.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. (1.976).- Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona.
- Custodio, E. (1.986).- Recarga Artificial de Acuíferos. Avances y realizaciones. Boletín de Informaciones y Estudios. nº 45, Febrero 1.986. Servicio Geológico. MOPU.
- IASH (1.967).- Artificial recharge and management of aquifers. Int. Assoc. Scientific Hydrology. Simp. Haifa. Pub. 72. 523 pp. Gentbrugge.
- IASH (1.970).- International Survey on existing water recharge facilities. Int. Assoc. Scientific Hydrology. Pub. 87. Genbrugge. 762 pp.

- IASH (1.973).- Underground waste management and artificial recharge. Symp. New Orleans. Int. Assoc. Scientific. Hydrology. Am. Geophysical Union.
- IGME (1.981).- Informe de evolución piezométrica y estado de explotación del sistema acuífero de Guadix. (Informe interno)
- IGME (1.981).- Modelo matemático de la Depresión de Guadix. (Informe interno)
- IGME (1.985).- Proyecto de optimización en el uso de los recursos hidráulicos de la Vega de Guadix, mediante bombeo y recarga artificial del acuífero. 1.983-1.984. (Informe interno)
- IGME (1.985).- Proyecto para el estudio experimental de las relaciones acuífero-río. (Informe interno)
- IGME-FAO (1.970).- Proyecto de Investigación hidrogeológica de la cuenca del Guadalquivir. Informe AGL:SF/SPA 9.
- IGME-FAO (1.972).- Proyecto de utilización de las aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la zona de Guadix. AGL:SF/SPA 16, nº 3. Informe técnico nº 3.
- ITGE (1.990).- Proyecto para la realización de una experiencia de recarga artificial en Guadix (Granada), con el dispositivo hidráulico actual 1.988-1.989. (Informe interno)
- ITGE (1.991).- Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos (en prensa).
- ITGE-Diputación de Granada (1.990).- Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada.
- N.U. (1.977).- "Almacenamiento y recarga artificial de aguas subterráneas". Naciones Unidas, Recursos Naturales. Serie del Agua, nº 2. ST/ESA/13, 306 pp.

- Porras, J. (1.978).- Recarga artificial de aguas residuales tratadas. Com. a la ponencia nº 1. Confer. Nac. Hidr. Gral. y Aplicada 3. Salón Bienal Monográfico del Agua. Zaragoza.

- Senent, M. (1.984).- Problemática de la recarga artificial de acuíferos. Realizaciones españolas y sus posibilidades en el sureste español. Tesis Doctoral. Univ. Polit. Madrid.