

MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA  
SECRETARIA DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

JUNTA DE ANDALUCIA  
CONSEJERIA DE  
ECONOMIA E INDUSTRIA

00087-00-00

87

MODELIZACION MATEMATICA DE LOS ACUIFEROS  
"INFERIOR OCCIDENTAL" Y "SUPERIOR CENTRAL"  
DEL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

Abril 1986

87

FE DE ERRORES

Figura de la pág. 91, mapa inferior: donde se dice "muro", leer "techo".

MODELIZACION MATEMATICA DE LOS ACUIFEROS  
"INFERIOR OCCIDENTAL" Y "SUPERIOR CENTRAL"  
DEL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)

Abril, 1986

## I N D I C E

|   | <u>Págs.</u> |
|---|--------------|
| <br><u>PRIMERA PARTE: PRESENTACION</u>                                      |              |
| 1.- ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y DESARROLLO DEL ESTUDIO .....                  | 1            |
| 1.1.- ANTECEDENTES .....  | 1            |
| 1.2.- OBJETIVOS .....   | 3            |
| 1.3.- DESARROLLO DEL ESTUDIO .....  | 4            |
| <br>2.- PRINCIPIOS GENERALES DE UN MODELO MATEMATICO EN HIDROGEOLOGIA ..... | <br>7        |
| 2.1.- QUE ES UN MODELO MALLADO .....  | 7            |
| 2.2.- EN QUE CONSISTE EL CALADO DE UN MODELO .....                          | 13           |
| 2.2.1.- El calado en régimen permanente .....                               | 14           |
| 2.2.2.- EL calado en régimen transitorio .....                              | 15           |
| 2.2.3.- Comentarios .....   | 16           |
| 2.3.- PARA QUE SIRVE UN MODELO .....  | 18           |
| <br>3.- EL PROGRAMA NEWSAM .....  | <br>21       |
| 3.1.- PRINCIPIOS .....  | 21           |
| 3.1.1.- Mallado .....   | 21           |
| 3.1.2.- Condiciones en los límites .....                                    | 23           |
| 3.1.3.- Transferencia del agua .....  | 23           |

|  | <u>Págs.</u> |
|--|--------------|
| 3.1.4.- Intercambios con el exterior ..... | 24           |
| 3.1.5.- Flujo con superficie libre .....   | 24           |
| 3.2.- ALGORITMOS DE RESOLUCION .....       | 25           |
| 3.2.1.- Régimen permanente .....           | 25           |
| 3.2.2.- Régimen transitorio .....          | 25           |
| 3.2.3.- Ecuaciones no lineales .....       | 26           |
| 3.3.- INTRODUCCION DE LOS DATOS .....      | 26           |
| 3.4.- DOCUMENTOS DE SALIDA .....           | 27           |
| 3.4.1.- Cuadros de resultados .....        | 28           |
| 3.4.2.- Mapas .....                        | 28           |
| 3.4.3.- Evoluciones piezométricas .....    | 28           |

SEGUNDA PARTE: EL MODELO MATEMATICO DEL CAMPO DE DALIAS

|   |    |
|---|----|
| 1.- DATOS DE BASE .....                                 | 30 |
| 1.1.- RAPIDA SINTESIS HIDROGEOLOGICA .....              | 30 |
| 1.1.1.- Generalidades .....                             | 30 |
| 1.1.2.- Litología y estructura .....                    | 31 |
| 1.1.3.- El Acuífero superior central .....              | 33 |
| 1.1.4.- La Escama de Balsa Nueva .....                  | 36 |
| 1.1.5.- El Acuífero inferior occidental .....           | 39 |
| 1.2.- ESQUEMA DE FLUJO DE LOS ACUIFEROS MODELIZADOS ... | 41 |
| 1.2.1.- Condiciones en los límites .....                | 41 |
| 1.2.2.- Alimentación .....                              | 43 |
| 1.2.3.- Descarga .....                                  | 45 |
| 1.2.4.- Características hidrodinámicas .....            | 45 |
| 1.3.- CONTROLES PERIODICOS .....                        | 46 |
| 1.3.1.- Control pluvio-termométrico .....               | 46 |
| 1.3.2.- Control de explotación .....                    | 47 |
| 1.3.3.- Red de piezómetros .....                        | 49 |
| 1.3.4.- Mapas piezométricos .....                       | 49 |
| 2.- MALLADO Y CONDICIONES EN LOS LIMITES .....          | 50 |
| 2.1.- LOS ACUIFEROS A MODELIZAR .....                   | 50 |
| 2.2.- LIMITES LATERALES Y MALLADO DE LA CAPA 2 .....    | 51 |

|   | <u>Págs.</u> |
|---|--------------|
| 2.3.- LIMITES LATERALES Y MALLADO DE LA CAPA 1 .....                      | 55           |
| 2.4.- RELACION DE LA ESCAMA DE Balsa Nueva con las capas<br>1 y 2 .....   | 58           |
| 3.- EL CALADO .....   | 62           |
| 3.1.- EL CALADO EN REGIMEN PERMANENTE .....                               | 62           |
| 3.1.1.- Elección de la época .....  | 62           |
| 3.1.2.- La alimentación atmosférica .....                                 | 64           |
| 3.1.3.- La alimentación por infiltración de exceden<br>tes de riego ..... | 65           |
| 3.1.4.- Infiltración de aguas residuales urbanas .                        | 70           |
| 3.1.5.- La explotación por bombeo .....                                   | 71           |
| 3.1.6.- Otras salidas .....   | 72           |
| 3.1.7.- Parámetros hidráulicos .....                                      | 73           |
| 3.1.8.- Saturación/desaturación .....                                     | 73           |
| 3.2.- EL CALADO EN REGIMEN TRANSITORIO .....                              | 74           |
| 3.2.1.- Transmisividades .....  | 76           |
| 3.2.2.- Porosidades y coeficientes de almacenamien<br>to .....            | 81           |
| 3.2.3.- Coeficientes característicos de los "drenes".                     | 84           |
| 3.2.4.- Coeficientes de drenancia .....                                   | 86           |
| 3.3.- EL MODELO DE PROPAGACION DE LA SALINIDAD .....                      | 88           |
| 4.- "PROGRAMAS DE MANIOBRA", "PROGRAMAS AUXILIARES" Y FICHE<br>ROS .....  | 93           |
| 4.1.- LISTA DE LOS PROGRAMAS Y FICHEROS .....                             | 94           |
| 4.1.1.- Ficheros de base .....  | 94           |
| 4.1.2.- Programas NEWSAM .....  | 96           |

|   | <u>Págs.</u> |
|---|--------------|
| 4.1.3.- Programas auxiliares .....                  | 97           |
| 4.1.4.- Programas de "maniobra" .....               | 99           |
| 4.1.5.- Ficheros de resultados .....                | 104          |
| 4.2.- EL "MODELO DE ALIMENTACION ATMOSFERICA" ..... | 107          |
| 4.2.1.- Principio .....                             | 107          |
| 4.2.2.- El programa THORD .....                     | 110          |
| 4.2.3.- El programa PLUM2 .....                     | 122          |
| 4.2.4.- Crítica del modelo .....                    | 135          |
| 4.3.- OTROS PROGRAMAS DE CIERTO INTERES .....       | 137          |
| 4.3.1.- El programa ALIM .....                      | 137          |
| 4.3.2.- Los programas PIRRIG Y PIRRIG2 .....        | 139          |
| 4.3.3.- El programa EMMA .....                      | 141          |
| 4.3.4.- Los programas PROBIMAI y TRANSIBI .....     | 142          |
| 5.- CONCLUSIONES .....                              | 145          |

TERCERA PARTE: DISEÑO Y SIMULACIONES DE ALTERNATIVAS DE GESTION

|   |     |
|---|-----|
| 1.- DISEÑO DE ALTERNATIVAS DE GESTION .....   | 155 |
| 1.1.- BREVE RECORDATORIO DE LOS ELEMENTOS DEL PROBLEMA .                              | 155 |
| 1.2.- PLANES TECNICOS DE POSIBLES ACTUACIONES .....                                   | 157 |
| 1.2.1.- Planteamientos .....  | 157 |
| 1.2.2.- Redistribución espacial de la explotación.                                    | 162 |
| 1.2.3.- Utilización de los recursos del Adra ....                                     | 165 |
| 1.2.4.- Promoción del ahorro de agua .....  | 174 |
| 1.2.5.- Recarga artificial .....  | 175 |
| - Reconstitución de reservas .....  | 175 |
| - Reconstitución de potenciales en borde<br>del mar .....                             | 180 |
| - Actuación directa y puntual sobre la in<br>trusión del Acuífero inferior occidental | 186 |
| - Propuestas de anteproyectos de recarga .  | 187 |
| 2.- SIMULACIONES A CINCO AÑOS VISTA .....   | 193 |
| 2.1.- GENERALIDADES .....   | 193 |
| 2.2.- SIMULACIONES DE FLUJO: SITUACION EN OCTUBRE 1989 .                              | 195 |
| 2.2.1.- Acuífero superior central .....   | 195 |
| 2.2.2.- Acuífero inferior occidental .....  | 196 |
| 2.3.- SIMULACIONES DE SALINIDAD: SITUACION EN OCTUBRE 1989                            | 196 |
| 3.- CONCLUSIONES .....  | 218 |

PRIMERA PARTE

PRESENTACION

## 1.- ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y DESARROLLO DEL ESTUDIO

### 1.1.- ANTECEDENTES

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) inició en el año 1971 el estudio hidrogeológico de la provincia de Almería que, con mayor o menor intensidad según la zona considerada y según las prioridades del momento, se ha venido continuando hasta la fecha. Desde el principio, la realización material del estudio ha corrido a cargo de la Empresa Nacional ADARO de Investigaciones Mineras, S.A. (ENADIMSA), bajo el control y la supervisión del IGME.

En una primera fase, correspondiente al "Programa Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), y que abarcó los años 1971 a 1975, se realizaron los estudios básicos en toda la provincia y, entre ellos, los referentes al Campo de Dalías.

La fase siguiente, que duró hasta el año 1979, <sup>en parte</sup> se enmarcó en el "Programa Nacional de Estudios para la Gestión y Conservación de los Acuíferos" que, como su nombre ~~lo~~ indica, daba la prioridad al mantenimiento de los mantos acuíferos y no ya a la investigación. <sup>Dentro de este programa, salvo</sup> ~~Salvo~~ un estudio sobre la posibilidad de recargar artificialmente el Campo de Dalías con excedentes superficiales de la cuenca del río Adra (1979), no se procedió en dicho Campo a ningún <sup>otro</sup> estudio particular, sino a un simple control piezométrico e hidroquímico. Fuera del referido programa y en el marco de la colaboración entre ambos organismos, el IGME llevó a cabo para el IRYDA una reinterpretación hidrogeológica de la importante infraestructura de sondas (más de un centenar) que este organismo había realizado en el Campo de Dalías, estudio que dio un paso más en el conocimiento sobre la geometría y esquema de flujo de los distintos conjuntos de este ámbito.

La continua bajada de los niveles piezométricos en varios sectores del Campo de Dalías, a veces hasta cotas negativas, incitó al IGME, en 1980, a reanudar los estudios en dicho Campo, tanto en el aspecto de un estudio metodológico y aplicado del posible fenómeno de intrusión marina en algunas partes del Campo, como en el de una mejora, complementación y actualización de los conocimientos hidrogeológicos sobre los sistemas acuíferos que componen el Campo, con especial énfasis en el esquema de flujo de los mismos (que abarca tanto la definición de las condiciones en los límites, como la determinación y cuantificación de los mecanismos de alimentación, circulación y descarga de dichos sistemas acuíferos).

El informe final correspondiente a estos casi dos años y medio de estudio (desde mediados de 1980 hasta finales de 1982) constó de trece tomos. Dicho informe, cuyas conclusiones vienen corroboradas por los controles realizados desde entonces, demuestra que dos de dichos acuíferos se encuentran "sobreexplotados" de una forma ya crónica, lo que, en ambos casos, se manifiesta por descensos de niveles piezométricos y por una contaminación progresiva ~~y rápida~~ de las áreas costeras por el agua marina.

Tanto el grado de conocimientos adquiridos frente a la complejidad del problema planteado, como las exigencias cuantitativas (y, de cierto modo, cualitativas) de los utilizadores y de las autoridades locales, provinciales y regionales, pusieron de manifiesto la necesidad de desarrollar herramientas matemáticas que permitiesen simular distintas opciones de explotación, es decir, prever las consecuencias piezométricas (y por consecuencia, hidroquímicas en la zona costera) que tendrían a corto y largo plazo distintas alternativas (en cuantía y ubicación) de explotación de las aguas subterráneas.

En particular, pareció factible realizar, para los acuíferos Inferior Occidental y Superior Central del Campo de Dalías, un modelo matemático a mallas variables, cuya primera fase <sup>lleva</sup> había sido objeto de un convenio bianual <sup>de</sup> 1983-84 con la E.N. ADARO. Durante esta primera fase se procuró adquirir los conocimientos que todavía faltaban para una adecuada modelización de los dos acuíferos indicados. Más concretamente, se procedió a una campaña de bombeos de ensayo, a una de nivelación de puntos de agua, y a una de medidas piezométricas simultáneas (febrero de 1984), además de preparar la información y los datos de base para el modelo. *La segunda fase - modelización propiamente dicha - ha sido abordada conjuntamente por el IGME y la Consejería de Economía y Fomento de la Junta de Andalucía*

#### 1.2.- OBJETIVOS

Si bien la mayor complejidad estructural y los más escasos conocimientos del <sup>denominado "Sector Noroeste" del Campo (S. L.)</sup> sistema conocido como "Sector nor-este" impiden por el momento desarrollar la adecuada herramienta matemática de simulaciones, no ocurre así con los otros dos sistemas llamados "Acuífero Inferior Occidental" y "Acuífero Superior Central" del Campo de Dalías. La relación recíproca que ambos acuíferos mantienen por intercomunicación vertical, así como el hecho de que el primero está netamente sobre-explotado mientras que el segundo podría aguantar una explotación mayor, han hecho aconsejable que se realice un modelo matemático del conjunto bicapa formado por ambos acuíferos, localmente superpuestos, y de las formaciones semi-permeables que los separan. Esta forma de actuar es la única que permite simular, no sólo el régimen hidrodinámico de cada uno de ellos, sino también (lo que es más importante aún) las repercusiones que tendrían sobre ambos un incremento o una disminución de la explotación (o, en términos más generales, cualquier cambio o alteración en los caudales intercambiados con el exterior) que afectase a uno u otro de ellos.

En consecuencia, el objetivo primordial del presente estudio era el de poner a punto un modelo matemático del conjunto de estos dos acuíferos, cuyo grado de sofisticación fuese tal que permitiera, una vez calado, simular cualquier hipótesis de caudales entrantes o salientes de uno o ambos acuíferos, de tal forma que se pudiera establecer cuáles eran las mejores soluciones de gestión integrada de los recursos hídricos de ambos, contando a la vez con ciertas disponibilidades procedentes del río Adra. Es obvio, sin embargo, que todo proyecto de optimización de la utilización de todos los recursos hídricos de la comarca tiene que pasar <sup>también</sup> por la previa modelización del ~~también~~ Sector <sup>Norte</sup> ~~del Campo~~ ~~por este~~. No obstante, el disponer ya de un modelo para los dos acuíferos citados permitiría plantear mejor las actuaciones necesarias para que la intrusión marina, que ya se ha puesto de manifiesto en el sector de Balanegra, no pasase a contaminar gravemente al Acuífero Inferior Occidental. Además, y para el mismo objetivo, se hacía necesario disponer de una herramienta que simulase la propagación futura de la salinidad, que hoy en día sólo existe en el sector más costero (~~Área de Balanegra~~).

Para tales menesteres, se ha decidido utilizar el programa NEWSAM, realizado por el Centre d'Informatique Géologique (C.I.G) de Fontainebleau, de la Escuela Nacional Superior de Minas de París, y contar con la adecuada asistencia técnica de dicho Centro.

### 1.3.- DESARROLLO DEL ESTUDIO

El estudio duró de noviembre de 1984 a enero de 1986, y fue llevado a cabo por Jean-Pierre THAUVIN, hidrogeólogo jefe de proyecto en ENADIMSA.

Se desarrolló en su mayor parte en el Centre d'Informatique géologique de Fontainebleau (dependiente de la Escuela de

Minas de París), donde se pudo contar a la vez con el valioso asesoramiento técnico de E.LEDOUX, Director de dicho centro, y de P.COMBES, y con la libre disposición de los terminales conectados con la imponente maquinaria informática del C.I.R.C.E. (Centre inter-régional de calcul électronique).

Se puede estimar, de forma muy esquematizada, que el tiempo invertido en el estudio puede desglosarse de la forma siguiente.

- 1) Fase preliminar: conocimiento del programa NEWSAM, transcripción, en términos de dicho programa, de las condiciones en los límites, relación entre acuíferos, etc; definición geométrica del mallado ..... 1 mes
- 2) Ficheros: diseño y creación de los ficheros de base (precipitaciones y temperaturas, bombeos, piezómetros, retornos de riego, variación de almacenamiento, etc.) ..... 1 1/2 meses
- 3) Programas anexos: creación de los programas anexos necesarios para el modelo de alimentación atmosférica, cálculo de las alimentaciones por zonas y por acuíferos, etc. 3 meses
- 4) Calado en permanente: calado de las condiciones en los límites, de los caudales de alimentación y de descarga, de las transmisividades, etc. (con algunas pasadas en transitorio) ..... 4 1/2 meses
- 5) Calado en transitorio: mejora del calado de los términos anteriores, calado de los coeficientes de almacenamiento (con algunas pasadas en permanente) ..... 1 1/2 meses
- 6) Simulaciones: diseño de las mismas, realización de ficheros, cálculos, etc. .... 1 1/2 meses

- 7) Fase final: realización de gráficos y mapas, ordenamiento,  
copias en cintas, etc. .... 1 1/2 meses
- 8) Elaboración del informe general ..... 3 meses

## 2.- PRINCIPIOS GENERALES DE UN MODELO MATEMATICO EN HIDROGEOLOGIA

### 2.1.- QUE ES UN MODELO MALLADO

En la casi totalidad de los casos, el flujo hidráulico en un sistema acuífero es tridimensional (las dos dimensiones horizontales, y la vertical). En otros términos, el movimiento de un manto dotado de una velocidad (por diferencia de carga en tre sus diversos puntos) debe referirse en un sistema de tres ejes. La Ley de Darcy y el principio de conservación de las masas permiten entonces escribir la ecuación general con derivadas par ciales:

$$\text{div}(K \vec{\text{grad}} h) = S' \frac{\delta h}{\delta t} + q'$$

o, en una forma menos simbólica:

$$\frac{\delta}{\delta x} (K \frac{\delta h}{\delta x}) + \frac{\delta}{\delta y} (K \frac{\delta h}{\delta y}) + \frac{\delta}{\delta z} (K \frac{\delta h}{\delta z}) = S' \frac{\delta h}{\delta t} + q'$$

ecuaciones en las cuales:

h = carga hidráulica

t = tiempo

K = permeabilidad

S' = coeficiente de almacenamiento específico

q' = caudal unitario añadido al sistema o restado del mismo

Puesto que, por otra parte, el acuífero es casi siempre anisótropo, las permeabilidades (y, por lo tanto, las transmisividades) son diferentes según los tres ejes considerados. La ecuación de difusividad precedente, escrita en forma no simbólica, es entonces muy pesada puesto que se debe derivar la carga según los tres ejes, utilizando a cada vez cada una de las permeabilidades correspondientes a aquellos. Por este motivo, la ecuación completa es poco utilizada.

En la mayoría de los casos, se admite que la componente vertical de la velocidad es nula, es decir que el flujo es estrictamente bidimensional en un plano horizontal. Los gradientes débiles que suelen encontrarse en hidrogeología hacen admisible esta aproximación, salvo casos particulares.

Si llamamos  $T_x$  y  $T_y$  a las transmisividades según las direcciones  $x$ ,  $y$  del plano, la ecuación de difusividad, en este caso de flujo bidimensional, se escribe:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( T_x \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( T_y \frac{\delta h}{\delta y} \right) = S \frac{\delta h}{\delta t} + q$$

Dicha ecuación admite una solución si:

- el espacio es finito, con condiciones en los límites (de potencial y/o de flujo impuestos) bien definidos, y si, en un punto por lo menos, existe una condición de potencial impuesto (a falta de lo cual el sistema sería indeterminado)
- condiciones iniciales de potencial son fijadas a priori

*solución*  
La relación de la ecuación consiste en buscar su integral en todo punto del dominio circunscrito por los límites escogidos,

es decir en todas y cada una de las mallas de dimensiones infinitesimales. Evidentemente, ello no es posible sino para un número finito de mallas, de donde nace el concepto de modelo mallado: se "discretiza" el dominio en un número determinado (por lo tanto, finito) de mallas, generalmente cuadradas y de lado  $a$ ,  $y$ , en lugar de buscar la incógnita  $h$  en todo punto, se busca un valor aproximado  $H$  de la misma en el centro de cada malla. La dimensión de esta debe ser lo suficientemente pequeña para que el valor del potencial calculado sea representativo del conjunto de malla y que, asimismo, la transmisividad de paso de una malla a la lindante sea poco diferente de la media de las transmisividades de ambas mallas.

Pero, evidentemente, no suele ser suficiente la discretización del espacio en el paso  $\Delta x$ .? También hay que discretizar el tiempo (que aparece en el segundo miembro de la ecuación de difusividad), es decir escoger un paso de tiempo durante el cual pueda admitirse que son constantes los potenciales.

Supongamos ahora que, en una malla determinada, el caudal  $q$  de intercambio con el exterior (inyecciones, bombeos, etc.) varíe a cada paso de tiempo (lo que constituye el caso general). Dicha variación provocará un cambio en la carga hidráulica, cuyo efecto se notará, aunque de forma decreciente, hasta el final de los tiempos. Dicho de otra forma, cualquier estado piezométrico observado no es sino transitorio, y constituye la resultante de todas las variaciones del caudal intercambiado con el exterior, tanto en la malla considerada como en todas las demás del dominio, y desde el origen de los tiempos. Aunque, en la práctica, el período de influencia no sea infinito, sino limitado en algunos meses o años, impide toda definición de un estado piezométrico inicial y, por tanto, no influenciado. En consecuencia, al no conocerse el estado inicial de los potenciales, y puesto

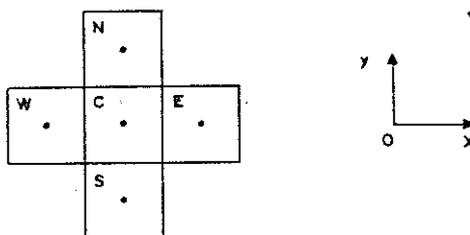
que es materialmente imposible saber el valor de  $T$  y  $S$  en cada malla, no se puede hallar, por el cálculo, un valor fiable de los potenciales al cabo de un tiempo dado.

De aquí el artificio del "régimen permanente", completamente ficticio en la práctica, en el cual se admite que el caudal  $q$  es constante, por lo que no interviene el tiempo. En este caso, se anula el término  $\frac{\delta h}{\delta t}$ , y la ecuación de difusividad se reduce a

$$\frac{\delta}{\delta x} \left( T \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( T \frac{\delta h}{\delta y} \right) = q$$

En este caso, y ello constituye lo interesante del artificio, no es necesario conocer las condiciones iniciales de potencial.

Consideremos ahora una malla del dominio, llamada  $C$  (de centro), y las cuatro mallas que lindan con ella arriba ( $N$ ), abajo ( $S$ ), a la izquierda ( $W$ ) y a la derecha ( $E$ ). En dichas mallas, cuadradas y de dimensión  $a$ , se produce un flujo según los ejes  $Ox$  u  $Oy$ , materializado por pérdidas de carga.



Llamemos  $H_C, H_N \dots$  a los potenciales en el centro de las mallas  $C, N \dots$ , y  $T_{NC}, T_{SC} \dots$  las transmisividades de paso entre las mallas  $N$  y  $C, S$  y  $C$ , etc.

Al pasar a las diferencias finitas (es decir, al sustituir las derivadas por incrementos finitos), se puede escribir que, según el eje Ox, el término  $\frac{\delta}{\delta x} (T_x \frac{\delta H}{\delta x})$  es igual a

$$(T_{EC} \frac{H_E - H_C}{a} - T_{WC} \frac{H_C - H_W}{a}) \frac{1}{a}$$

Asimismo, según el eje Oy, el término  $\frac{\delta}{\delta y} (T_y \frac{\delta h}{\delta y})$  es igual a

$$(T_{NC} \frac{H_N - H_C}{a} - T_{SC} \frac{H_C - H_S}{a}) \frac{1}{a}$$

En total tenemos

$$[(T_{EC} \frac{H_E - H_C}{a} - T_{WC} \frac{H_C - H_W}{a}) + (T_{NC} \frac{H_N - H_C}{a} - T_{SC} \frac{H_C - H_S}{a})] \frac{1}{a} = \dot{q}$$

o sea

$$T_{EC}(H_E - H_C) - T_{WC}(H_C - H_W) + T_{NC}(H_N - H_C) - T_{SC}(H_C - H_S) = a^2 \dot{q}$$

que se puede escribir, al ordenar con respecto a la malla C:

$$T_{NC}(H_N - H_C) + T_{SC}(H_S - H_C) + T_{EC}(H_E - H_C) + T_{WC}(H_W - H_C) = a^2 \dot{q}$$

El término  $a^2 \dot{q}$ , producto de un caudal unitario por la superficie de la malla, representa el caudal intercambiado por la malla C con el exterior.

Las transmisividades tales como  $T_{NC}$  ... pueden tomarse iguales a las medias aritméticas  $\frac{T_N + T_C}{2}$  por ejemplo, o a otras medias.

Cada una de las  $n$  mallas en las que ha sido discretizado el dominio tendrá así su ecuación, donde  $H$  es la incógnita. Tendremos entonces un sistema lineal de  $n$  ecuaciones con  $n$  incógnitas, que admite una solución única.

El número generalmente importante de mallas, y por tanto de ecuaciones, obliga a resolver dicho sistema por los métodos de álgebra lineal. En efecto, puede ponerse bajo la forma matricial

$$TH = Q$$

siendo  $T$  la matriz de las transmisividades, cuadrada, diagonalmente dominante, y simétrica. Es un conjunto de datos.

$H$  el vector de los potenciales. Es el conjunto de las incógnitas.

$Q$  el vector de los caudales, que es un conjunto de datos.

Para resolver la ecuación matricial, hay que despejar el vector de los potenciales, utilizando la matriz inversa  $T^{-1}$ . En efecto, si multiplicamos ambos miembros por  $T^{-1}$ , se obtiene

$$T^{-1}TH = T^{-1}Q$$

$$\text{o sea } IH = T^{-1}Q \quad (\text{siendo } I \text{ la matriz unidad})$$

$$\text{es decir } H = T^{-1}Q$$

Por lo tanto, el vector de los potenciales se obtiene por el producto de la matriz inversa de las transmisividades por el vector de los caudales.

En las condiciones naturales, es decir en régimen transitorio, los potenciales evolucionan con el tiempo. Por consiguiente, entre dos estados separados por un paso de tiempo  $dt$ , se produce una variación de reserva igual al producto de la variación de potencial por la superficie de la malla y por la porosidad.

Por lo tanto, la ecuación no simbólica anterior se escribe

$$T_{NC}(H_N - H_C) + T_{SC}(H_S - H_C) + T_{EC}(H_E - H_C) + T_{WC}(H_W - H_C) =$$

$$= a^2 S_C \frac{dH_C}{dt} + \bar{q}_c$$

Para cada paso de tiempo, se dispondrá, al igual que en el régimen permanente, de  $n$  ecuaciones lineales con  $n$  incógnitas (siendo  $n$  el número de mallas), sistema que se resuelve también por los procedimientos de la álgebra lineal.

## 2.2.- EN QUE CONSISTE EL CALADO DE UN MODELO

Si, para cada malla del dominio, conociéramos su potencial inicial, sus parámetros hidrodinámicos ( $T$  y  $S$ ) y los caudales intercambiados con el exterior en cada paso de tiempo, no sería necesario ningún calado; la herramienta estaría ya lista, es decir permitiría calcular en cualquier punto del dominio el potencial consecuencia de un cambio en las condiciones en los límites  $\phi$ , con mayor frecuencia, de un cambio en el valor fijado del caudal intercambiado con el exterior (alimentación atmosférica, retornos de riego, bombeos, drenaje, etc.) en una o varias mallas.

Pero tal no es el caso. Aún en el caso de un sistema monocapa sencillo en el cual estén bien conocidos los bombeos, no es

casi nunca posible conocer bien la transmisividad  $T$  y el coeficiente de almacenamiento  $S$  de cada malla, ni tampoco tener la seguridad de que el caudal asignado a cada malla sea el bueno. Por lo tanto, hay que "calar" los diferentes parámetros.

Generalmente se procede en dos fases sucesivas:

- en régimen permanente, se calan los caudales, las condiciones en los límites, y las transmisividades
- en régimen transitorio, se mejora la definición de las transmisividades, e incluso de los caudales, y se calan los coeficientes de almacenamiento.

#### 2.2.1.- El calado en régimen permanente

En la medida en la que, en un intervalo de tiempo dado (un año, o más), puede considerarse que la variación de reserva es nula (es decir, que en cualquier punto del dominio, el potencial es el mismo al principio y al final de dicho intervalo), se puede admitir que hay régimen permanente. Si, para este tiempo, se conoce suficientemente bien la forma de la superficie piezométrica (o libre) del manto para poder atribuir a cada malla la carga que le corresponde, se puede empezar a proceder al calado.

Una vez construido el mallado y definidas las condiciones en los límites, se asigna a cada malla los caudales entrantes y salientes que le corresponden, y el valor de la transmisividad que parece la más adecuada. Entonces, se podrá calcular el vector de los potenciales  $H$  (ya que se conoce el de los caudales y la matriz de las transmisividades), es decir restituir una piezometría que, si los datos de base son buenos, tiene que ser exactamente similar a la observada en la realidad. Ello no se suele conseguir del primer golpe, y se tiene que andar por modificaciones

sucesivas de los datos, hasta que la piezometría restituida por el cálculo sea exactamente superponible a la realmente observada. Se puede entonces considerar, en primera aproximación, que las transmisividades y los caudales introducidos en el cálculo son correctos.

Pero esta fase, por si sola, no puede suministrar una garantía de validez de los parámetros introducidos. En efecto, causas diferentes pueden producir efectos iguales (es frecuente que transmisividades y caudales erróneos den potenciales exactos). Por otra parte, no es posible olvidarse de los coeficientes de almacenamiento, ni tampoco admitir que son constantes los caudales intercambiados con el exterior: es evidente, por ejemplo, que ni las precipitaciones ni los bombeos son constantes. Por este motivo, ha de considerarse el régimen real de los flujos subterráneos, es decir el régimen transitorio.

#### 2.2.2.- El calado en régimen transitorio

Puesto que varían, a cada paso de tiempo, los caudales de entrada y de salida, es necesario disponer de un cierto número de puntos en los cuales se hayan realizado medidas piezométricas del potencial. Dichas medidas, en toda lógica, habrán tenido una periodicidad al menos igual al paso de tiempo elegido, y habrán empezado bastante tiempo atrás. Además, hace falta disponer de, como mínimo, una serie de medidas simultáneas en el mayor número posible de puntos de agua.

Entonces, el calado en régimen transitorio partirá del estado piezométrico inicial definido por el régimen permanente (con el campo de transmisividades que lo ha hecho posible) y, una vez asignado a cada malla el coeficiente de almacenamiento que parece el más adecuado, consistirá en jugar con las T y las S (y, en su

caso, con otros datos de base) hasta que el cálculo restituya un valor del potencial igual al observado, en cada malla y en cada momento.

En la práctica, se considerará calado el modelo cuando, por una parte, la superficie piezométrica restituida en fin de cálculo corresponda a la real y cuando, por otra parte, la evolución temporal de los potenciales calculados en cada uno de los piezómetros de control sea más o menos superponible a la realmente observada.

Por regla general, siempre es mejorable el calado de un modelo ya que, al principio, uno se tiene que dar por satisfecho, por imperativos de tiempo y de presupuesto, con una superposición aproximativa de las isopiezas y de las evoluciones piezométricas calculadas con las observadas. Conforme se va utilizando el modelo, van apareciendo sus defectos e imprecisiones, que se van corrigiendo.

### 2.2.3.- Comentarios

Se suele tener la tendencia de considerar a un modelo matemático como:

- un fin en sí, conclusión de largos meses o años de mediciones y reflexiones
- una especie de caja compleja que sólo restituye lo que se le ha suministrado, ya que un ordenador (actualmente por lo menos) no es inteligente ni creativo.
- una entidad bastante misteriosa, e incluso francamente esotérica, cuya llave sólo posee el informático.

Estas ideas son inexactas.

Para empezar, un modelo no es un fin en sí sino, al contrario, una herramienta más. Es cierto que, por lo general, sólo se puede realizar el modelo al cabo de una fase de estudios, a la cual corona de alguna forma. Pero debe considerarse que el final de dicha fase de estudios tendría que ser el principio de una nueva fase, la de la gestión del sistema acuífero: conocer bien éste no tiene más interés que el de permitir mejorar la gestión, e incluso optimizarla, de dicho sistema, solo o en conjunción con otros recursos hídricos superficiales o subterráneos.

Por otra parte, es muy simplista decir que un modelo sólo restituye lo que se le ha dado. Evidentemente, no crea nada, pero su gran interés es precisamente el permitir juzgar la compatibilidad entre los diversos datos que se han introducido y, de forma más general, lo fundado y compatible que son las distintas hipótesis que ha tenido que adoptar el hidrogeólogo. En este aspecto, suministra un producto más elaborado que la suma de los datos introducidos.

Por último, el papel del informático sólo es indispensable para crear el programa, esto es poner a punto los algoritmos que permitirán simular, mediante cálculo, el funcionamiento hidrodinámico de un acuífero. Una vez creado el programa, el informático sólo tiene un papel secundario (que puede ser indispensable, por lo menos al principio, cuando el hidrogeólogo no posee los conocimientos necesarios en informática), ya que le competen al hidrogeólogo las elecciones primordiales acerca de la naturaleza de los límites, el funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la naturaleza, cantidad y ritmo de aplicación de los caudales de alimentación, el carácter verosímil o no de los parámetros hidráulicos, la existencia de caudales subterráneos laterales o verticales, etc.

### 2.3.- PARA QUE SIRVE UN MODELO

Antes de <sup>conocerse</sup> ~~que nazcan~~ los modelos (analógicos o matemáticos) el hidrogeólogo no podía prever el comportamiento futuro de un manto, sino a través del famoso balance hídrico y/o extrapolando hacia el futuro las evoluciones piezométricas observadas en el pasado.

La utilización del balance, cuya realización constituyó durante largos años la conclusión de un estudio hidrogeológico, tropieza con el hecho de que, en la gran mayoría de los casos, son mucho menos conocidas las entradas que las salidas; en consecuencia, suele ser difícil, o aventurado, decir que un manto está bien o mal explotado, en ausencia de otros argumentos. De todas formas, aún en el caso hipotético de un balance bien conocido, no puede ser siempre el único criterio de explotación; salvo en el caso concreto de algunos mantos de elevado coeficiente de renovación (cociente de los recursos renovables, <sup>?</sup> por las reservas), se suele admitir hoy en día que el explotar sólo los recursos anuales puede ser la peor solución, ya que deja improductivo el capital de las reservas no renovables. La idea moderna, al contrario, es que la explotación de un manto es satisfactoria en tanto en cuanto no provoca, en un punto concreto de su extensión, consecuencias perjudiciales e incompatibles con el programa de utilización fijado a priori. En otros términos, un desequilibrio, aún prolongado, entre recursos renovables y explotación, sólo debe considerarse sobreexplotación si desemboca, al cabo de un plazo inferior a las previsiones, en una situación que no respeta los imperativos que se habían fijado de antemano (como, por ejemplo, que no se produzca antes de 20 años una intrusión marina que afecte a pozos concretos del acuífero).

Por lo tanto, se ve que la simple extrapolación hacia el futuro de la evolución observada en uno o varios piezómetros es

netamente insuficiente, aunque este proceso mental suele ir en el sentido de la seguridad, al despreciar la posibilidad de que se establezca un nuevo régimen de equilibrio y ("sobreequilibrio").

<sup>Es</sup> En el modelo matemático la única herramienta que permita prever, a corto, medio o largo plazo, el valor de los potenciales (o de los caudales de descarga) en cualquier punto del dominio, suponiendo constantes las condiciones de alimentación y de explotación o, al contrario, modificándolas según un programa predeterminado.

Sólo el modelo, si ha sido realizado y calado de forma satisfactoria, permitirá saber si, en condiciones determinadas de alimentación (años secos o húmedos, por ejemplo) y de explotación (en cuantía y en repartición espacial y temporal), serán respetadas durante un plazo predeterminado los imperativos prefijados. Por lo tanto, el modelo permite mejorar la gestión de un manto, es decir, no solamente no bombear más <sup>de</sup> lo que se debe, sino también no bombear menos de lo que se puede. Además, conjuntamente con los procedimientos matemáticos de optimización (lineal o no), permite no sólo mejorar la gestión sino incluso optimizarla; ello consiste en encontrar, en un contexto determinado de datos hidrogeológicos (los que corresponden al acuífero en cuestión), hidrogeológicos (utilización de aguas superficiales excedentarias o mal reguladas), y socio-económicos (comparación entre los beneficios esperados y los costes suplementarios ocasionados), una solución única que resulta aportar las mayores ventajas con los menores inconvenientes.

Evidentemente, hay modelos y modelos. Cuanto mayor sea la precisión de las previsiones pedidas, o cuanto más compleja la hidrodinámica del acuífero, más sofisticado tendrá que ser el pro

grama utilizado. Lo ideal debe ser un programa suficientemente sofisticado para hacer frente a un contexto hidrogeológico complejo, pero suficientemente flexible para que, en los casos sencillos, se pueda utilizar sólo una parte de sus posibilidades. Tal es el caso del programa NEWSAM, utilizado en el presente estudio.

### 3.- EL PROGRAMA NEWSAM

El programa está concebido con vistas a una simulación numérica de las transferencias de agua (y, en su caso, de masas) en los acuíferos multicapas, tanto en régimen permanente como en transitorio. Presupone que el flujo en cada capa es bidimensional plano, y que las relaciones entre capas se producen en el sentido vertical. Sin embargo, permite tratar problemas tridimensionales verdaderos, si se incrementa artificialmente el número de capas (esto es, creando capas ficticias), hasta el máximo de veinte que permite actualmente el programa. Resuelve por diferencias finitas la ecuación con derivadas parciales del flujo subterráneo, o ecuación de la difusividad.

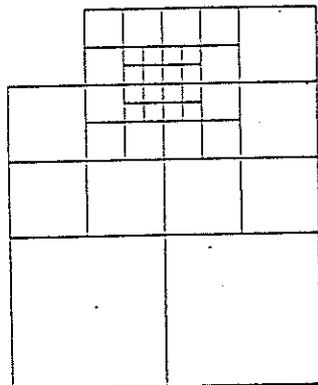
$$\frac{\delta}{\delta x} \left( T_x \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( T_y \frac{\delta h}{\delta y} \right) = S \frac{\delta h}{\delta y} + \dot{q}$$

#### 3.1.- PRINCIPIOS

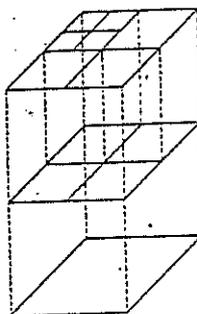
##### 3.1.1.- Mallado

Se discretiza el dominio a simular en mallas cuadradas encastradas, es decir, de dimensiones variables. Esta posibilidad permite tratar en detalle los sitios complejos o <sup>aquellos que requieren</sup> ~~los en que se~~ <sup>requieren</sup> conocimientos muy precisos, sin que haya que aplicar este detalle al resto del dominio, lo que reduce considerablemente el tiempo de cálculo.

Cuatro dimensiones de mallas son posibles:  $a$ ,  $2a$ ,  $4a$  y  $8a$ ; la micromalla, por lo tanto, tiene una superficie de  $a^2$ , la pequeña  $4a^2$ , la media  $16a^2$  y la grande  $64a^2$ . La única limitación en cuanto a la repartición de mallas de talla diferente radica en que, tanto en el plano horizontal como en la superposición vertical en caso de multicapa, una malla dada no pueda lindar sino con una malla cuya dimensión es la misma, o el doble, o la mitad.



Por otra parte, en el caso de un multicapa, todos los nudos deben situarse sobre la misma vertical, es decir que los dos ejes horizontales deben ser superponibles.



### 3.1.2.- Condiciones en los límites

Los límites aceptados por el NEWSAM son de tres tipos:

- caudal impuesto: si se desea poner un determinado caudal, entrante o saliente, a determinadas mallas, basta con asignárselo; en caso de no asignación de un caudal determinado, una condición de flujo nulo es aplicada automáticamente
- potencial impuesto: se puede imponer un potencial constante y determinado a cualquier malla del modelo, tanto en su periferia como en su interior
- potencial impuesto con caudal-límite (dren): se fija un caudal límite que puede intercambiar una malla dada con el exterior; mientras no se alcanza dicho caudal, el modelo reacciona como si se tratase de un simple potencial impuesto; cuando este valor es alcanzado, se le impone. Es una combinación de los dos límites anteriores, y permite simular un vertido hacia el exterior, o una relación río-manto.

Todas estas condiciones pueden, evidentemente, ser modificadas en el curso del calado.

### 3.1.3.- Transferencia del agua

En caso de flujo horizontal, la transmisividad de paso  $T$  entre dos mallas de transmisividades  $T_1$  y  $T_2$  es la media armónica de estas últimas:

$$T = \frac{2T_1 T_2}{T_1 + T_2} \quad (\text{para mallas de igual tamaño})$$

$$T = \frac{2T_1 T_2}{T_1 + 2T_2} \quad (\text{si la malla 2 tiene dimensi3n mitad de la malla 1})$$

En caso de flujo vertical a trav3s de un semi-permeable de espesor  $e'$  y de permeabilidad vertical  $K'_v$ , se utiliza el coeficiente de drenancia  $K'_v/e'$ , (tambi3n igual al cociente del coeficiente de transferencia  $T_h$  por la superficie de la malla).

#### 3.1.4.- Intercambios con el exterior

Cada malla puede intercambiar agua con el medio exterior, en funci3n de las condiciones en los l3mites que han sido definidos, y del estado libre o cautivo del manto. Las cantidades correspondientes son introducidas en el modelo por asignaci3n malla por malla, directamente si son constantes, o por lectura de ficheros de datos en el caso contrario.

#### 3.1.5.- Flujo con superficie libre

Tanto en el caso de un manto libre como en el de la desaturaci3n de un manto confinado, donde es tridimensional el flujo (al menos en las proximidades de la superficie libre), la opci3n "manto libre" permite, en caso necesario, calcular el potencial medio al admitirse la hip3tesis de un flujo pr3cticamente bidimensional. Tambi3n tiene en cuenta el cambio de naturaleza del fen3meno de liberaci3n del agua (desaturaci3n, en lugar de descompresi3n del agua y compresi3n del acuífero), de la disminuci3n de la transmisividad debida a la del espesor saturado, y del hecho de que, al momento en que se produce la desaturaci3n, el caudal vertical se vuelve independiente de la diferencia de carga entre ambos acuíferos.

### 3.2.- ALGORITMOS DE RESOLUCION

#### 3.2.1.- Régimen permanente

En el caso general, el cálculo es iterativo, por el método de Gauss-Seidel con sobrerelajación por puntos, con optimización automática del coeficiente de sobrerelajación en curso de cálculo. Este se para, bien sea cuando ha sido alcanzada la convergencia con una tolerancia predeterminada ( $10^{-3}$  en la opción standard, pero que puede tomarse más pequeña), o bien cuando ha sido agotado el número de iteraciones prefijado (100 en la opción standard). La optimización del coeficiente de sobrerelajación utiliza el método de Carré.

En algunos casos, el método iterativo puede no dar resultado satisfactorio (convergencia imposible, o demasiado lenta), y se utiliza la resolución directa con el método de Gauss-Jordan (en la medida en que el problema es lineal, y que no hay ningún valor nulo en la matriz de transmisividades). Este procedimiento mejora claramente la precisión del cálculo numérico, pero es más costoso en tiempo de cálculo y en espacio memoria en el ordenador.

#### 3.2.2.- Régimen transitorio

En el caso general, la ecuación de difusividad se resuelve por el método implícito con paso de tiempo, donde la derivada  $\frac{dh}{dt}$  se aproxima por las diferencias finitas  $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ , donde  $\Delta t$  representa el paso de tiempo del cálculo.

Dicho cálculo es iterativo, por el mismo método que en régimen permanente. El paso de tiempo inicial, escogido por el utilizador, crece luego en progresión geométrica de razón  $\rho$ , tomada igual a  $\sqrt{2}$  o a  $\sqrt[4]{2}$ .

### 3.2.3.- Ecuaciones no lineales

Se puede restablecer la linealidad cuando dichas ecuaciones se resuelven por iteraciones. En la opción "manto libre" por ejemplo, el cálculo de la drenancia tiene en cuenta las mallas desaturadas, y la transmisividad es función del espesor saturado.

### 3.3.- INTRODUCCION DE LOS DATOS

Tienen que ser introducidos los datos de una forma directamente leible por el programa NEWSAM.

En el caso del calado en régimen permanente, en el cual la serie de datos es única (ya que hay una sola fase), se podría introducir todos los datos directamente mediante cartas. En la práctica, es mucho más cómodo introducir en cartas solamente los datos que haya que modificar con frecuencia (como pueden ser, por ejemplo, las transmisividades), e introducir los otros en forma de ficheros indiciados sobre el número de las mallas.

Para el calado en régimen transitorio, habrá que hacer un mucho mayor uso de los ficheros puesto que las variables (esencialmente la alimentación atmosférica y los bombeos) deberán ser indiciadas no sólo sobre el número de las mallas sino también sobre el tiempo. Asimismo, los potenciales iniciales (es decir los calculados en régimen permanente) y los distintos parámetros físicos (transmisividades, coeficientes de drenancia, potenciales impuestos, etc.) serán leídos sobre un fichero de resultados del permanente, aunque sea siempre posible cualquier modificación de estos datos mediante intervención directa.

Es obvio que la creación de cada uno de los ficheros que debe leer el NEWSAM (en forma binaria), debe hacerse mediante un programa que transforma y ordena los datos de partida.

Los datos utilizados por NEWSAM e introducidos manualmente (pantalla) o a través de ficheros, se ordenan en 18 grupos definidos por su respectivo código. Son los siguientes:

- 1: potenciales hidráulicos iniciales (m)
  - 2: potenciales hidráulicos impuestos (m)
  - 3: potenciales hidraulicos impuestos en los drenes (m)
  - 4: cotas del substrato del manto (m)
  - 5: cotas del techo del manto (m)
  - 6: transmisividades ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
  - 7: coeficientes de drenancia ( $s^{-1}$ )
  - 8: coeficientes de tranferencia por los drenes ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
  - 9: coeficientes de almacenamiento
  - A: porosidades
  - B: "densidades" de caudal inyectado (= láminas de agua) (m)
  - C: "densidades" de caudal bombeado (= láminas de agua) (m)
  - D: caudal inyectado ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
  - E: caudal bombeado ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
  - F: caudal-límite de los drenes ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
  - G: concentraciones iniciales
  - H: concentraciones impuestas
  - I: concentraciones inyectadas
- para el modelo de  
concentración

#### 3.4.- DOCUMENTOS DE SALIDA

Existen varios tipos de documentos de salida.

### 3.4.1.- Cuadros de resultados

El programa suministra automáticamente (salvo orden contraria) y para cada malla los principales datos de partida y resultados del cálculo: número de la malla, tipo de la misma, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, coeficiente de drenancia hacia arriba y hacia abajo, caudal impuesto, caudal en el exutorio, caudal almacenado, potencial impuesto en los drenes, nivel piezométrico.

También suministra para cada fase (única en régimen permanente, múltiple, en régimen transitorio) los caudales y los volúmenes de cada uno de los términos del balance (alimentación, bombeo, salidas o entradas por las mallas a potencial impuesto y por los drenes, drenancia, y almacenamiento, así como el error cometido) para cada una de las capas, e incluso para cada una de las zonas en las que ha sido dividida una capa.

### 3.4.2.- Mapas

Se puede obtener mapas de valores, malla por malla, de todos los datos necesarios al cálculo (transmisividades, alimentación, bombeo, etc.) así como de los resultados del mismo (potenciales, balances entre alimentación y descarga, etc.) para todas las capas consideradas o sólo alguna de ellas. Dichos mapas pueden referirse a una o varias de las fases mensuales del cálculo.

### 3.4.3.- Evoluciones piezométricas

Gracias a un sub-programa, puede conseguirse automáticamente, sobre el mismo gráfico y a la misma escala (que se puede elegir) las evoluciones piezométricas medidas en los piezómetros y las calculadas por el modelo. Ello permite las comparaciones indispensables durante el calado en transitorio.

SEGUNDA PARTE

EL MODELO MATEMATICO DEL CAMPO DE DALIAS

## 1.- DATOS DE BASE

### 1.1.- RAPIDA SINTESIS HIDROGEOLOGICA

Dicha síntesis está basada, fundamentalmente, en el "Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería)", de Diciembre 1982, realizado por ENADIMSA por encargo del IGME. No obstante, integra algunos complementos o cambios puestos de manifiesto durante la realización del modelo matemático.

#### 1.1.1.- Generalidades

El Campo de Dalías, junto con la vertiente meridional de la Sierra de Gádor, puede dividirse en cuatro subsistemas principales:

- el acuífero inferior occidental
  - el acuífero superior central
  - el acuífero inferior oriental
  - el acuífero superior oriental
- componentes del llamado Sector <sup>Noreste</sup> ~~nordeste~~ }

En términos generales, los acuíferos inferiores se albergan esencialmente en las dolomías alpujárrides (con substrato de filitas) de la Unidad de Gádor, aflorantes en la sierra del mismo nombre, y hundidas por fallas debajo del Campo. Asimismo, los acuíferos superiores están constituidos en su mayor parte por las calcarenitas pliocenas y algunas formaciones cuaternarias.

El Sector <sup>Noreste</sup> ~~nor-este~~ representa menos de la cuarta parte de la superficie del Campo de Dalías, pero casi las tres cuartas partes de la vertiente de Sierra de Gádor que vierte hacia él. Dicho sector es la sede de algo más de la mitad del total de la explotación por bombeo en el Campo de Dalías. Como ya se ha indicado, el insuficiente conocimiento que se tiene todavía de aquel (con respecto a su gran complejidad estructural profunda) ha impedido que se le incluyera en el modelo matemático objeto del presente estudio. En consecuencia, sólo hablaremos aquí de los acuíferos inferior occidental y superior central.

#### 1.1.2.- Litología y estructura

La estructura de la zona objeto del presente estudio, pues, se puede resumir de la forma siguiente:

Dentro del conjunto alpujárride que constituye la Sierra de Gádor, su parte sud-occidental ha sufrido un ligero cabalgamiento interno gracias al cual reposa aparentemente, al Oeste, sobre el manto de Felix (que, sin embargo, cabalga normalmente a la Unidad de Gádor), y al Norte y NE sobre el resto de la Sierra de Gádor mediante una falla inversa. Esta parte sud-occidental de dicha Sierra es la que constituye el acuífero inferior occidental, constituyendo el resto de la vertiente meridional de la sierra el acuífero inferior del Sector <sup>Noreste</sup> ~~nor-este~~. El substrato de dicho acuífero inferior occidental lo constituye una serie de filitas, que viene a aflorar en toda la periferia occidental y septentrional del mismo.

En ocasiones se notan restos del Manto de Felix, en forma de klippes sobre las dolomías de Gádor. Al igual que la Unidad de Gádor, estas klippes están formadas por filitas en la base y dolomías en el techo, aunque esta última formación suele tener, aquí por lo menos, un espesor escaso.

Sobre este conjunto alpujárride, la transgresión miocena deposita una serie de calcarenitas, de 100 a 150 m de espesor, conocidas aquí como "formación Vicar" y que afloran en bastantes lugares de la parte baja de la Sierra, así como margas azules y yesos que no se conocen en afloramiento. Al final del Mioceno, todo el conjunto anterior viene afectado por fallas, de salto relativamente importante (de 100 a 500 m), y de dos direcciones principales: la llamada familia F tiene una orientación N 60° E, y la F' N 60° W. Dichas fallas hundien, en término general, los bloques más meridionales. Las tres primeras fallas F (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> y F<sub>3</sub>) hacen que las dolomías, aflorantes en la Sierra de Gádor, tienen su techo alrededor de la cota -750 m debajo de la parte correspondiente del Campo de Dalías; al contrario, las fallas F<sub>5</sub> y F<sub>6</sub> limitan el horst de Guardias Viejas que, muy estrecho (unos 1 500 m) cruza la casi totalidad del Campo en sentido SW-NE. X

Posteriormente a la acción de estas fallas, el mar plioceno deposita una serie de margas grises que tiene un espesor de varios centenares de metros entre las fallas F<sub>3</sub> y F<sub>5</sub> mientras que, más cerca de la Sierra de Gádor (emergida entonces), su espesor disminuye rápidamente hasta cero, siendo sustituidas las margas por formaciones más detríticas. Hacia el tope de la serie margosa, asimismo, las margas se vuelven más arenosas, hasta pasar a una serie calcarenítica de 50 a 100 m de espesor en general.

Después de la regresión pliocena marcada por las calcarenitas, se notan transgresiones cuaternarias que, conforme son más recientes, se aproximan más a la costa actual; en las partes emergidas, se depositan formaciones continentales, de las cuales las más importantes son las de piedemonte cuyo espesor puede superar los 100 m. Durante el Cuaternario, además se ha producido una neotectónica de reajuste que, mediante pequeñas fallas y ondulaciones de gran radio de curvatura, afecta en particular al conjun

to detrítico del Plioceno de una forma tal que, a menudo, va a tener una incidencia en la hidrogeología.

Conocidas la litología y la estructura de la zona, es ahora fácil delimitar los dos subsistemas acuíferos objeto de la modelización.

### 1.1.3.- El Acuífero Superior Central

Con unos 225 km<sup>2</sup> de superficie, este acuífero ocupa la mayor parte del Campo de Dalías: tan solo se escapan las zonas de piedemonte y la zona triangular del Sector <sup>Noreste</sup> nord-este. Lo constituyen las calcarenitas pliocenas y, en menor medida, las arenas margosas que forman transición entre aquellas y las margas grises. Estas últimas, omnipresentes, constituyen el substrato general del acuífero. Como ya se ha dicho, las formaciones predominantemente margosas pasan lateralmente a facies detríticas en las proximidades de la orilla del mar de entonces, que corresponde aproximadamente con el borde actual de la Sierra. En consecuencia, donde ya no existen margas, tampoco existe acuífero superior, por falta de substrato.

Los límites de dicho acuífero, pues, se definen como sigue:

- al NW y N, el límite de deposición de las margas grises (aunque, en ocasiones, la neotectónica ha podido hacer que dichas margas, aunque existen, están a una cota demasiado alta para tener el papel de substrato general del acuífero superior).
- al NE, una falla de reajuste, llamada f'2, paralela a la dirección F' pero hundiendo el bloque nord-oriental. Al estar el techo de las margas, en el bloque alto, muy cerca de la cota general de la superficie libre mientras que, en el bloque bajo,

estaría 20 ó 30 m más bajo, esta falla produce un salto piezo métrico de unos 15 m, que tiene además los mismos efectos que una barrera de transmisividad

- al SE, S y SW, el mar.

Además, y debido a la neotectónica, se han creado heterogeneidades en el seno del acuífero, de las cuales algunas tienen la suficiente entidad como para justificar la definición de zonas, limitadas por barreras de transmisividad (fig. 1):

- al NW, la zona de Los Alacranes, por la cual se produce lo esencial de la intercomunicación entre los acuíferos superior e inferior
- al SW, la zona costera de Balerna
- más al SE, la zona costera de Guardias Viejas, limitada por el afloramiento de las margas grises en forma de arco y, por lo tanto, completamente desconectada del resto del acuífero
- entre las tres anteriores, la zona de Onayar, relativamente aislada de las demás zonas, y sin comunicación lateral al exterior
- al NE, la gran zona de Santa María, separada de las de Los Alacranes y de Onayar por un bloque levantado sobre el cual se asienta la población de El Ejido, y de la de Guardias Viejas por el afloramiento ya indicado de las margas grises
- al Sur, por último, la extensa zona de San Agustín, separada de la anterior por la prolongación, hacia el Este, del afloramiento/subafloramiento de margas de Guardias Viejas. Tanto por la existencia de esta barrera de transmisividad como por la erosión

*¿sí? ¿no? ¿sí?*

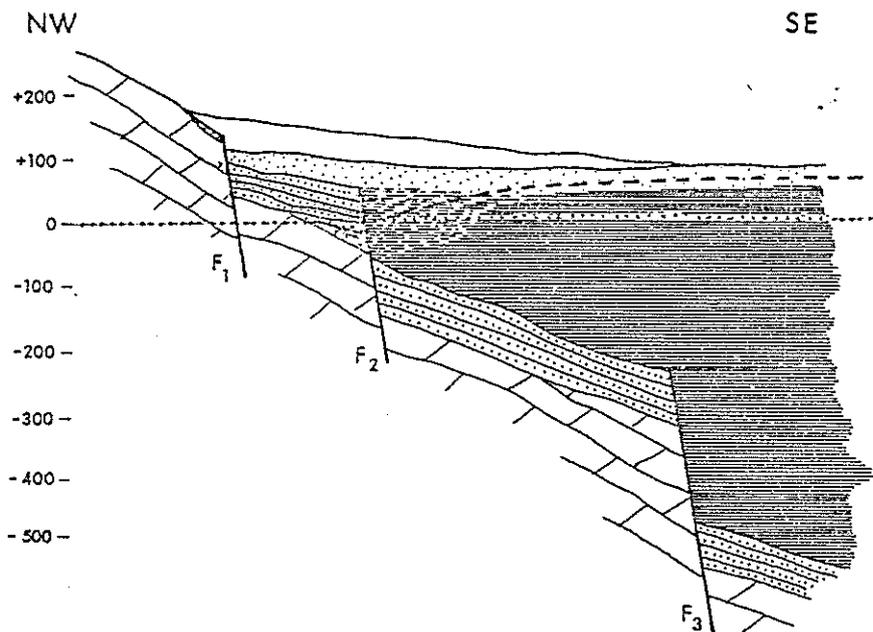
que ha sufrido gran parte de las calcarenitas, esta zona tiene un muy escaso interés hidrogeológico, aspecto negativo agravado por una importante salinización de sus aguas (por motivos anormales, sin que intervenga ningún fenómeno de intrusión marina). De hecho, son muy escasos los pozos que explotan el acuífero de esta zona, y lo hacen con caudales muy pequeños.

De las seis zonas aquí definidas, las de Guardias Viejas y de San Agustín no presentan gran interés, respectivamente por su desconexión y por sus malas características. La de Balerna no presenta ningún rasgo particular y no hay motivo para insistir más en ella.

La de Onayar presenta la particularidad de estar rodeada de barreras de transmisividad, razón por la cual no puede contar sino con sus propios recursos; al ser éstos muy reducidos, los bombeos que experimentó hasta el año 1980 aproximadamente hicieron que bajase muy fuertemente la superficie libre, dando un aspecto de cono muy espectacular cuyo fondo, en aquellas fechas, se encontraba alrededor de la cota -15 m cuando sus bordes estaban sobre la cota +25 m. Desde el año 1980, los bombeos fueron disminuyendo drásticamente, y la superficie piezométrica, en consecuencia, fue subiendo rápidamente. Las muy pequeñas dimensiones de la zona de Onayar le restan importancia, que no fuese estrictamente local.

La zona de Santa María es la más interesante de todas, por la conyunción de una extensión relativamente grande, buenas características hidrodinámicas que favorecen caudales no del todo despreciables, y proximidad de los sectores de alimentación de la Sierra, gracias a la cual recibe mayor alimentación (por infiltración de aguas de rambla) y alberga aguas de calidad hidroquímica aceptable.

Por último, la zona de Los Alacranes es de escasa importancia para las captaciones (debido a sus transmisividades medias), pero tiene un cierto interés hidrogeológico; por verter sus aguas en el acuífero inferior occidental y ayudar así a éste (gracias a la "entrega" de sus recursos propios y de parte de sus reservas) a aguantar las fortísimas explotaciones que tienen lugar en él. La figura 2 permite entender cómo esta zona se descarga en el acuífero inferior, por desaparecer paulatinamente el substrato margoso, y hacerse más detríticas las arenas margosas.



#### 1.1.4- La Escama de Balsa Nueva

Dicha escama es en realidad una klippe del Manto de Felix, que descansa sobre las dolomías de Gádor en el extremo <sup>occiden-</sup> ~~sud-oriental~~ tal de la zona estudiada. Sobre una suela de filitas reposan unos retales de dolomías (cuando los hay) y las calcarenitas miocenas. Por su cota, la mayor parte del afloramiento se encuentra no saturado pero, <sup>hacia el Sur</sup> ~~a la inversa~~, las fallas de zócalo hundieron esta "escama" debajo del Plioceno. La extensión de esta klippe es, por lo tanto, desconocida, pero <sup>se supone más bien</sup> ~~tiene que ser muy~~ pequeña (unos

pocos kilómetros cuadrados). De los distintos sondeos que han llegado a las filitas de base de este pequeño acuífero, ninguno ha encontrado dolomías (que habrán sido laminadas <sup>erosionadas</sup>), sino solamente formaciones detríticas del Mioceno, del Plioceno y del Cuaternario. El único sondeo que ha atravesado dichas filitas (el B-9, de reciente ejecución) ha encontrado 208 m de filitas (entre las cotas -164 y -372 m), y se ha quedado en las dolomías de Gáldor al cabo de 178 m de perforación en esta formación.

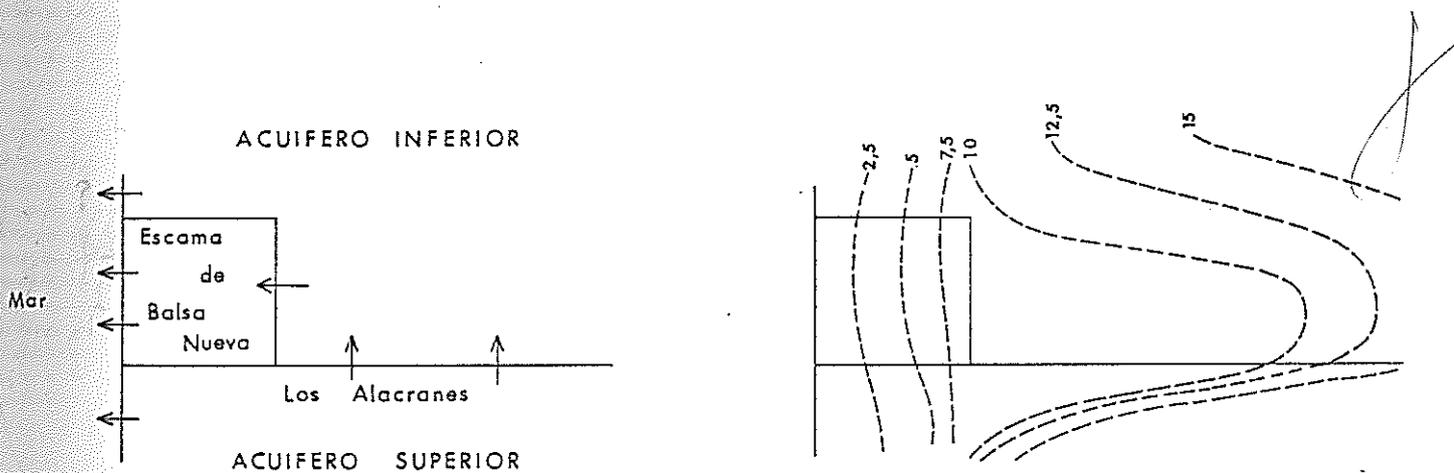
En el estado actual de nuestros conocimientos, parece claro que la Escama de Balsa Nueva, que alberga un manto libre contenido en las formaciones detríticas neógenas, no constituye sino una prolongación, o un apéndice, del acuífero Superior Central anteriormente definido; la única diferencia entre éste y aquella ~~sea~~ que el muro de esta última está formado por las filitas (en vez de por las margas grises pliocenas) y que el acuífero de la escama también está integrado por calcarenitas, areniscas, etc. del Mioceno.

Esta disposición explica la continuidad piezométrica de las dos superficies libres (la del acuífero superior central y la de la Escama), y la diferencia de sus gradientes hidráulicos (generalmente fuertes en el primero, por la mediocre transmisividad de sus arenas margosas, y débiles en la segunda por la buena transmisividad de las calcarenitas miocenas).

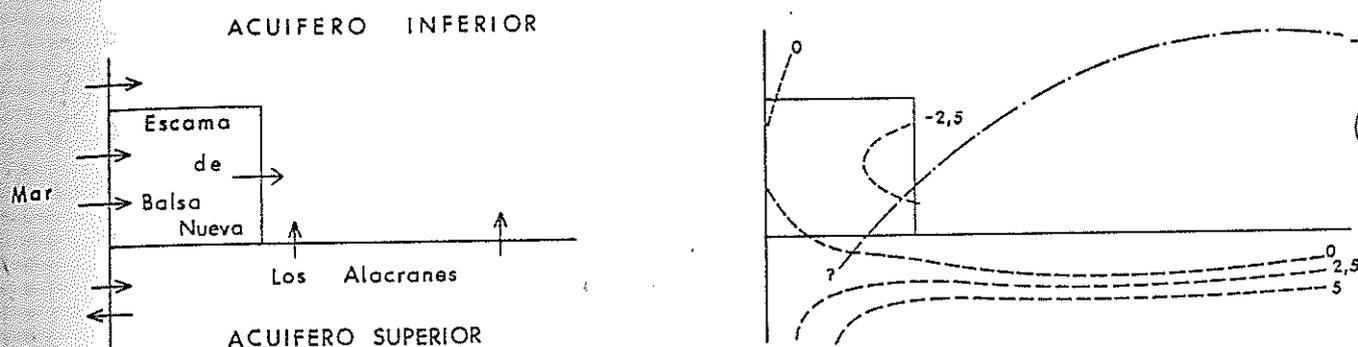
Como ya se indicó más arriba, esta Escama tiene relaciones hidrodinámicas con los acuíferos Superior Central e Inferior Occidental y, además, con el mar. Es probable que, antes de que comenzara la explotación de los acuíferos, éstos tenían sus superficies libres <sup>bastante más próximas que en la actualidad, especialmente en la parte occidental del Campo.</sup> ~~confundidas o muy próximas (sin perjuicio, por supuesto, de que, ahí donde el acuífero inferior es confinado, su superficie piezométrica sea distinta de la superficie libre del acuífero superior).~~ <sup>entre el acuífero Inferior Occidental y el Superior Central han resultado las diferencias de nivel entre ambos.</sup> El calado del modelo ha permitido confirmar que el acuífero inferior tenía escasa (por no decir nula) relación

con el mar (lo que tiene su lógica, habida cuenta de que, debajo del mar, dicho acuífero está recubierto por más de 200 m de filitas y por un espesor variable de margas grises).

La consecuencia de esta escasa relación con el mar es que el acuífero inferior tenía que descargarse a través de la Escama, como lo enseña el esquema siguiente:



Actualmente, y debido a los fuertes bombeos en dicho acuífero inferior (así como, en mucho menor medida, en la misma Escama), la relación Acuífero inferior - Escama - Mar se ha invertido, y ~~es~~ ahora el mar ~~que~~ ha invadido parcialmente la Escama, y ~~que~~ va a hacer (o está haciendo) lo mismo con el acuífero inferior, como lo indica el esquema siguiente:



#### 1.1.5.- El Acuífero Inferior Occidental

Tiene una superficie de  $160 \text{ km}^2$ , más lo que puede estar debajo del mar. Además, unos  $30 \text{ km}^2$  más (en una franja que sigue los límites Oeste y Norte) no están saturados pero participan a la alimentación del manto por situarse dentro de dichos límites.

Estos están constituidos, en el Oeste y Norte, por una estrecha banda de filitas que afloran de forma continua entre las proximidades de Las Albuferas del Adra, y las de la población de Dalías. Debido a su alta cota topográfica, este afloramiento no puede, evidentemente, corresponder con el límite de la zona saturada; existe pues, a lo largo de dicho afloramiento, una franja no saturada de la que acabamos de hablar.

Al N.E., el límite viene marcado por la falla inversa, prolongación de la falla normal F'2, que hace cabalgar al acuífero inferior sobre el resto de la Sierra de Gádor. Las filitas

de base existen en parte de esta falla inversa, bien en afloramiento (proximidades de Dalías) o bien en profundidad (como lo ha demostrado la Galería de Los Lobos, que encontró esta formación al cabo de 1 400 m en las dolomías, y a una cota de 270 m). Como se acaba de decir, la falla deja de ser inversa en el Campo de Dalías, y no parece que existan filitas a una cota suficientemente alta como para servir de límite impermeable; solo cabría hablar de barrera de transmisividad (demostrada por las milonitas encontradas en el sondeo 609-D); de hecho, como se verá más adelante, se ha considerado que, a través de este límite, el acuífero Inferior Occidental recibe un cierto caudal de alimentación, procedente del sector del Aguila (acuífero inferior del Sector <sup>Noroeste</sup> ~~nord-este~~).

Al SE, el horst de Guardias Viejas sobresale del resto del "zócalo", gracias a las fallas F5 y F6 <sup>quizás de</sup> ~~de varios~~ cientos de metros de salto. Aunque no se conozca casi nada de este horst, se supone que el salto de la falla F5 es suficiente para que el acuífero Inferior Occidental venga limitado por las filitas <sup>(?)</sup> ~~de~~ <sup>podría</sup> ~~base~~ del horst. En este caso, dicho acuífero inferior no recibiría ninguna aportación lateral del horst, y es la hipótesis que se ha admitido. Menos conservadora, <sup>siempre posible también,</sup> ~~pero menos probable también,~~ sería la que el horst aportase algo, en cuyo caso, de todas formas, el volumen de agua en juego <sup>seguramente</sup> ~~no~~ sería <sup>poco</sup> ~~posiblemente~~ muy importante, y de una calidad hidroquímica deficiente. <sup>(No puede decirse que las dolomías de este acuífero se prolonguen más allá de este supuesto límite confinado por más de mil metros de margas, pliegos y micaceous, e incluso, filitas del mantillo de E.N.)</sup>

Queda, por último, el límite con el mar. Es evidente que no se conoce la prolongación del acuífero en el mar. La sísmica off shore realizada hace ya años indica claramente la existencia de una capa rápida, bajo un recubrimiento más lento. En todo caso, las dolomías (si se trata de ellas) estarían relativamente aisladas del mar por las margas grises pliocenas, a través de las cuales sólo se podría establecer un flujo por drenancia, seguramente

despreciable por el espesor de dichas margas y por la escasa diferencia de carga entre ambas masas de agua. Solamente en la parte situada en las proximidades de Balanegra podría establecerse un flujo más o menos sensible, por pasar lateralmente las margas a formaciones detríticas; pero, en este sector, deben existir las filitas de base de la Escama de Balsa Nueva, que también dificultan el establecimiento de un flujo entre las dolomías inferiores y el mar. Por este motivo, se ha considerado que, en general, no hay relación hidrodinámica entre el acuífero inferior y el mar, salvo en una pequeña zona correspondiente a la supuesta prolongación, en el mar, de dicha Escama.

## 1.2.- ESQUEMA DE FLUJO DE LOS ACUIFEROS MODELIZADOS

### 1.2.1.- Condiciones en los límites

- Acuífero superior: el borde norte constituye un límite de flujo nulo, es decir que por él no pasan lateralmente caudales subterráneos entrantes o salientes. Ello no quiere decir, obviamente, que el acuífero no reciba, por este límite, una alimentación superficial procedente de la Sierra de Gádor; incluso, hay razones para pensar que, al menos localmente, existen pequeños mantos colgados en el piedemonte, que pueden alimentar "en cascada" o incluso lateralmente parte de dicho acuífero superior (por sus grandes diferencias de cota piezométrica y de transmisividad).

El límite oriental puede considerarse en gran parte, como de potencial impuesto (por el rebosadero constituido por las margas grises). Sin embargo, en su parte más septentrional (proximidades de la carretera nacional), no parece que las margas jueguen este papel (por estar probablemente a una mayor profundidad), por lo que, en esta parte, podría tratarse de un simple frente de descarga (probablemente débil). Al contrario, en la parte más

meridional de este límite, existe de hecho una divisoria hidráulica (por lo tanto de caudal nulo) que, además, podría difícilmente moverse por las mediocres transmisividades y la ausencia casi total de explotación.

Al Sur y SW, la costa constituye, obviamente, un límite a potencial impuesto cero; incluso puede atribuirse dicho potencial a todos los sectores de marismas y salinas.

Por último, el límite NW es un frente de descarga, por drenancia, hacia el Acuífero inferior occidental.

- Acuífero inferior: todo el borde Sur, Oeste y Norte del acuífero es un límite a flujo nulo, en el sentido de que por él no pasa caudal saliente o entrante hacia otro acuífero. Sin embargo, el hecho de que, entre el límite "geológico" del acuífero (afloramiento de las filitas de base) y el acuífero propiamente dicho, exista una franja no saturada con buzamiento de las filitas hacia la zona saturada, hace que esta última recibe una alimentación por "escorrentía subterránea".

El límite NE se puede dividir en dos partes: su mitad septentrional es un frente de alimentación procedente de la zona del Aguila (acuífero inferior del Sector <sup>Noreste</sup> ~~nord-este~~), como ya se ha comentado anteriormente. En cuanto a su mitad meridional, nada indica que esta alimentación continúe, pero tampoco lo contrario; aunque sea quizás más lógico que prosiga el contacto entre ambos acuíferos inferiores (lo contrario conllevaría un <sup>importante</sup> hundimiento del Sector NE), se ha preferido quedarse en una opción conservadora y admitir que no había alimentación por esta parte del límite. No obstante, se verá más adelante que ha sido necesario admitir, en el calado del modelo, la existencia de un importante caudal de alimentación procedente del Sector NE; sería más

lógico, en estas circunstancias, repartir dicho caudal entre todas las mallas de contacto en lugar de atribuirlo en exclusiva a las mallas septentrionales; de todas formas, la excelente transmisividad de las dolomías hace que esta posible inexactitud no tenga gran importancia.

El límite meridional es el del horst de Guardias Viejas. Aquí también se ha admitido que era de flujo nulo, al considerar que el gran salto de la falla F5 debía poner en contacto el acuífero inferior con las filitas ~~de base~~ del horst.

Por último, el límite SW es desconocido, ya que el acuífero inferior se prolonga muy probablemente debajo del mar. Sin embargo, debido al recubrimiento de varios cientos de metros de margas, se puede considerar que, en general, se trata de un límite a flujo nulo. Solamente en la parte más septentrional (frente al pueblo de Balanegra), se puede considerar que ya no existen dichas margas (pero sí las filitas de base de la Escama de Balsa Nueva), por lo que puede existir una cierta relación hidrodinámica (por drenancia) con el mar.

### 1.2.2.- Alimentación

La principal alimentación que reciben los dos acuíferos procede de las precipitaciones caídas sobre el mismo Campo de Dalías y sobre la parte de la Sierra de Gádor que le corresponde. Sin embargo, con respecto a este último punto, conviene tener en cuenta dos aspectos particulares: por una parte, la cuenca vertiente superficial del Campo aporta al mismo una escorrentía que se va a infiltrar en él (puesto que casi ninguna rambla lleva agua hasta el mar); por otra parte, las cuencas superficial y subterránea no coinciden en todos los sitios, por lo que habrá que ver el destino de la lluvia útil (y más particularmente de

sus componentes "infiltración" y "escorrentía") en cada punto de la vertiente meridional de la Sierra. Estas particularidades han obligado a elaborar un modelo de alimentación atmosférica bastante sofisticado, que viene explicado en el capítulo 4.

Otra alimentación es la procedente del acuífero inferior del Sector ~~nor-este~~ <sup>Noreste</sup>, como ya se ha explicado en el párrafo anterior. Viene condicionada por la diferencia de carga hidráulica entre ambos mantos, y por la transmisividad de paso.

La última alimentación procedente del exterior de los dos acuíferos modelizados proviene del mar, ya que tanto el Acuífero inferior como parte del superior compensan sus desequilibrios de balance por una entrada de agua de mar (intrusión marina).

Para acabar con las alimentaciones naturales, cabe recordar que el Acuífero inferior recibe del superior una aportación por drenancia, cuya magnitud viene condicionada por la diferencia de carga hidráulica entre ambos mantos y por el llamado "coeficiente de drenancia", característico de la capa semi-permeable que ~~los~~ separa, e igual al cociente de su permeabilidad vertical por su espesor.

Además de las alimentaciones antes reseñadas, existe el término de la infiltración de excedentes de riego y de aguas residuales urbanas. En todo rigor, no es generalmente una alimentación, sino más bien un "déficit de bombeo" (es decir que todo pasa como si se bombeara menos). Sin embargo, en el caso concreto del Campo de Dalías, no queda más remedio que considerar estos términos como una verdadera alimentación, ya que no coinciden los puntos de extracción con los de aplicación del riego.

### 1.2.3.- Descarga

Hoy en día, la casi totalidad de la descarga corresponde a los bombeos. La reactualización del inventario de puntos de agua, realizada en 1980, permite saber con exactitud la situación de todos los puntos de bombeo.

En cuanto a descarga natural, el Acuífero inferior ya no tiene ninguna (puesto que, al contrario, los únicos sectores de intercambio lateral con otro acuífero o con el mar dejan pasar un caudal de alimentación). El Acuífero superior, por su parte, mantiene una cierta descarga hacia el exterior (Sector nor<sup>Noreste</sup>-este, por su límite NE, y más en la mayor parte de la costa); además, como ya se ha dicho, alimenta por drenancia al Acuífero inferior.

### 1.2.4.- Características hidrodinámicas

El esquema de flujo, que se traduce por la piezometría del manto, viene condicionado por dichas características, además de los términos ya descritos. Estas son esencialmente las transmsividades, los coeficientes de almacenamiento, y los coeficientes de drenancia.

En regla general, estos últimos son poco o nada conocidos, por su dificultad de determinación; en efecto, y más aún en el caso del Campo de Dalías, el espesor del semi-permeable es de difícil determinación en todo punto; pero mucho más difícil aún resulta la de la permeabilidad vertical, solamente asequible a través de bombeos de ensayo muy peculiares y costosos. Por lo tanto, este coeficiente no ha constituido un dato de base sino que, al contrario, ha tenido que ser calado por completo en el modelo.

Ha ocurrido algo parecido con los coeficientes de almacenamiento, cuya determinación por bombeos de ensayo necesita que se cumplan algunas condiciones, entre las que hay que destacar la presencia de un piezómetro de determinadas características. Al no darse muy a menudo dichas condiciones, el conocimiento de los coeficientes de almacenamiento ha sido muy fragmentario en la fase preliminar a la modelización.

Por último, las transmisividades han sido determinadas en un número de puntos tal que se tenía ya, al empezar el modelo, una suficiente idea de sus órdenes de magnitud y de su repartición. Sólo cabe añadir, sin embargo, que la gran heterogeneidad litológica y estructural del Acuífero superior hubiera necesitado casi un bombeo de ensayo cada cinco mallas, objetivo a todas luces irrealizable, mientras que, al contrario, la excelente transmisividad del Acuífero inferior dificultó la propia determinación de la misma, por las escasas depresiones que producían los bombeos de ensayo.

### 1.3.- CONTROLES PERIODICOS

Previamente a la modelización, se debía contar con un historial lo más detallado posible de los caudales entrantes y salientes (esencialmente lluvia útil y bombeos, respectivamente), así como de las variaciones que ambos términos producían en la piezometría de cada manto.

#### 1.3.1.- Control pluvio-termométrico

Se pudo contar con la red observada por el Instituto Meteorológico nacional y por la Comisaría de Aguas del Sur, que nos facilitaron los datos en su poder respecto al periodo de diez años 1974-75/1983-84. Las únicas estaciones pluvio-termométricas

del entorno estudiado son las de Felix, Berja y Almería, todas situadas fuera de la zona modelizada, aunque a una distancia aceptable de la misma. Además, hubo que completar y corregir algunos datos, ausentes o presumiblemente erróneos. En cuanto a las estaciones únicamente pluviométricas, se pudo contar con las de Faro de Adra, Adra, Balerma, La Mojonera, Faro Sabinal y Aguadulce, aunque luego sólo se utilizaron los datos de Balerma y La Mojonera. Otras estaciones, como Dalías y El Ejido, no fueron tomadas en consideración por las importantes lagunas que presentaban durante el periodo elegido; asimismo, no se utilizaron directamente, aunque sí se tuvieron en cuenta, los datos de la estación de Las Palmerillas (Caja Rural Provincial de Almería).

Los datos de base utilizados, tanto pluviométricos como termométricos, fueron los diarios, y recibieron el tratamiento que se explica en la descripción del "modelo de alimentación atmosférica" (capítulo 4).

#### 1.3.2.- Control de explotación

A partir de primeros del año 1980, se procedió a un control de la explotación mensual de la casi totalidad de los pozos del Campo de Dalías (sólo fueron despreciados aquellos cuya explotación anual era inferior a unos 30 000 m<sup>3</sup>). Dicho control consistió en visitas periódicas a todos los pozos para conocer el número de horas que se ha bombeado mes a mes, y en un aforo sistemático (a veces repetido) de los caudales bombeados. El producto de los caudales por las horas de bombeo da evidentemente las explotaciones mensuales. Conociendo éstas y la situación de cada pozo, fue fácil atribuir a cada malla del modelo el volumen mensual de explotación que le correspondía, por lo menos desde el comienzo del control.

Fue difícil, evidentemente, extrapolar estos datos hacia el pasado, ya que el período de calado elegido empezaba en octubre 1975. Se tuvo que definir la tendencia de cada pozo durante el período de control y prolongarla hasta el año 1975, pero teniendo en cuenta los datos del inventario de puntos de agua realizado en 1972 y, sobre todo y a cada vez que se pudo, las indicaciones verbales dadas por el propietario o encargado de los pozos. Tanto uno como otro control no se referían sino al orden de magnitud del caudal instalado y del volumen anual bombeado (iguales, mayores o menores que los actuales) así como, en su caso, a la fecha de realización o de abandono de determinados sondeos. Para determinar la modulación mensual de los volúmenes anuales estimados (a la que, evidentemente, no se podía llegar por encuestas, ya que la memoria humana tiene límites), se admitió que, durante estos años no controlados, los porcentajes del volumen anual que correspondían a cada mes eran iguales, para cada acuífero, a los que resultaban ser la media de los años controlados. Esta hipótesis no podía tener en cuenta la evolución de la naturaleza de los cultivos ni los imperativos de riego impuestos por la mayor o menor sequía estacional. Sin embargo, era la única que se podía utilizar, y su carácter arbitrario se traducirá a veces, en una imperfecta restitución de las evoluciones piezométricas por el modelo matemático.

Cabe señalar, además, que en las zonas costeras (en particular en la de Balerna) donde hay muchísimos pozos manuales, pero de escaso caudal unitario, la preparación de los datos para el modelo se hizo juntando todos los pozos de una misma malla, es decir considerando directamente la explotación por malla, y no por pozo como se había hecho para las de mayor entidad. Además, por la escasez presupuestaria frente al gran número de pozos, se consideraron constantes, de un año al otro, las explotaciones mensuales estimadas.

### 1.3.3.- Red de piezómetros

A lo largo del período transcurrido desde el comienzo de los estudios en el Campo de Dalías, en 1971, se controlaron más de 60 piezómetros en los dos acuíferos modelizados. Sin embargo, sólo un pequeño número de ellos tuvieron medidas continuas, y sin lagunas, entre 1971 y 1984. Aunque fueron introducidos en fichero todos los datos disponibles, sólo fueron considerados los correspondientes a 38 piezómetros por ser los más completos, los más fiables y los mejor repartidos.

### 1.3.4.- Mapas piezométricos

A la campaña de medidas piezométricas simultáneas realizada en febrero 1981, se añadió otra (limitada a los dos acuíferos modelizados) en febrero 1984. Importantes complementos de nivelación y una importante labor de mediciones y de control diario de las mismas hicieron que el mapa de febrero 1984 constituyese el mejor y más completo.

Al haberse definido con precisión la forma de las isopiezas en dicho mapa, y al disponer de las observaciones mensuales en la red de piezómetros, se pudo elaborar un mapa piezométrico que pudiese representar el estado "en permanente", es decir corresponder a la media del período 1975-76/1976-77.

De esta forma, este último mapa sirvió para el calado en permanente, mientras que los de 1981 y 1984 sirvieron (además de las evoluciones de los piezómetros) para el calado en tránsito.

## 2.- MALLADO Y CONDICIONES EN LOS LIMITES

### 2.1.- LOS ACUIFEROS A MODELIZAR

Se trataba de modelizar el Acuífero Superior Central, constituido por calcarenitas pliocenas, y el Acuífero Inferior Occidental, formado por dolomías alpujárrides y calcarenitas miocenas superpuestas a éstas.

Sin embargo, en la esquina occidental del Campo, la Escama de Balsa Nueva podría considerarse como un acuífero individualizado (como ha sido explicado anteriormente) ya que está superpuesta, estructuralmente, al Acuífero Inferior, y cubierta por el Acuífero Superior o, por lo menos, por las formaciones que lo componen generalmente. Pero la escasa extensión de dicha escama (4 km<sup>2</sup> "demostrados", es decir sin tener en cuenta su posible prolongación hacia el SSE), la imprecisión de sus límites, y el hecho de que parece haber una continuidad piezométrica entre ella y el Acuífero Superior, han abogado a favor de englobar la escama en dicho Acuífero Superior. De todas formas, la posibilidad que ofrece el programa NEWSAM de realizar balances por zonas permite individualizar completamente las entradas y las salidas de dicha escama, con respecto al resto del Acuífero superior.

En resumen, pues, son dos los acuíferos a modelizar:

- el Acuífero Superior Central, llamado capa 1

- el Acuífero Inferior Occidental, llamado capa 2

## 2.2.- LIMITES LATERALES Y MALLADO DE LA CAPA 2

Conviene empezar por dicha capa, por el hecho de que han sido las fallas de "zócalo" de la familia F las que han determinado la orientación general del modelo. Dichas fallas, que hunden el "zócalo", tienen una dirección N60°E, que se convertirá en la dirección E-W del modelo. De ahora en adelante, las orientaciones que se darán lo serán con respecto al mallado, es decir que la dirección E-W será, en realidad, la de las fallas F' (N60°E), y la dirección N-S la ortogonal a la anterior, es decir N150°E.

- Los límites N y NW de la capa 2 son de flujo nulo: corresponden a la presencia (a la cota de la superficie libre del manto) de las filitas de la Unidad que constituyen el substrato de las dolomías.

- En cuanto al límite NE, se le ha considerado como límite de alimentación, procedente de la zona del Aguila del Sector nordeste. Esta hipótesis hidrodinámica tiene por objeto el de materializar un flujo probable, a través de una barrera de transmisión constituida por las dolomías muy milonitizadas por la falla F'2, puestas de manifiesto en el sondeo 609-D: en dicho sondeo, el nivel piezométrico se encontraba, en 1984, a la cota - 3,6 m, mientras que se situaba a -5,0 m en los sondeos próximos que captan la capa 2, y sobre la cota +4m en los que captan la zona del Aguila. Al principio, se había admitido un caudal de alimentación constante a través de este límite NE, del orden de 40 l/s. En el curso del calado, apareció la necesidad de considerarlo variable, tal y como se expondrá más en adelante.

- El límite SE es la prolongación del anterior, pero ha sido considerado estanco: la razón radica simplemente en que se

desconoce por completo la relación hidráulica que pueda existir, ahí, entre la capa 2 y el acuífero inferior del Sector nor-este. Es posible que se continúe el frente de alimentación del límite NE, pero nada lo demuestra; en consecuencia, se ha preferido admitir un caudal nulo (no puede tratarse de un límite de descarga, por el valor de las cotas piezométricas), lo que va en el sentido de la seguridad. También es posible que la totalidad del límite formado por la falla F'2 constituya un frente de alimentación, la cual podría ser menor que la modelizada en el límite NE, y no nula en el límite SE; las fuertes transmisividades de la capa 2 hacen que el resultado piezométrico será casi igual si un volumen dado de alimentación entra por una parte o por la totalidad de este límite constituido por la falla F'2.

- El límite Sur se ha considerado también estanco. Corresponde con el gran Horst de Guardias Viejas, del que se desconoce prácticamente todo sino su trazado y algunas cotas piezométricas en torno a + 4 m en el Terciario arenoso-margoso que parece estar en relación con él. La hipótesis estructural que ha llevado a considerar estanco este límite es que la importancia del salto de la falla F6 (varios cientos de metros, según la geofísica eléctrica en gran línea) debería poner en contacto lateral las dolomías de la capa 2 con las filitas de base del horst. Evidentemente, no se puede excluir que exista una aportación del horst hacia la capa 2, a través de un Neogeno más detrítico en las proximidades del alto fondo; sin embargo, aquí también, ha parecido preferible mantenerse del lado de la seguridad.

- El límite occidental es completamente desconocido: en efecto, se ignora no solamente si las dolomías pueden estar en contacto con el mar (bien directamente, lo que parece difícil si se tiene en cuenta que dichas dolomías están cubiertas quizás por la Escama de Balsa Nueva, y seguramente por las margas azules

pliocenas; o bien indirectamente por drenancia), sino también si dichas dolomías se prolongan mucho debajo del mar (ya que, en las proximidades de las Albuferas, parecen disminuir de espesor hasta desaparecer completamente).

Al momento de definir el mallado, el sondeo profundo de Balanegra no estaba realizado todavía. Por si una relación no despreciable existiese entre el mar y la capa 2, el límite de esta última se puso algunos kilómetros mar adentro, para alejar sus efectos, si los hubiese, de la parte conocida de la capa 2.

Al principio, se consideró estanco este límite occidental (por la probable existencia de filitas y, sobre todo, de margas, encima de la capa 2). Por lo tanto, por hipótesis, la capa 2 no tenía salida directa al mar cuando tenía cotas piezométricas positivas y, ahora que las tiene negativas, no puede haber intrusión marina directa; esta segunda consecuencia podría parecer demasiado optimista en ausencia de argumentos fidedignos.

Por lo tanto, una nueva interpretación hidrogeológica fue utilizada en el modelo: se conservó el límite estanco en la mayoría de las mallas situadas debajo del mar (por el fuerte espesor de las margas grises que se intercalan entre el techo del acuífero y el fondo del mar), pero se admitió una comunicación vertical en tres mallas próximas a la costa de Balanegra: ahí, en efecto, era probable que las margas grises pasaran lateralmente a formaciones más o menos detríticas, generadas por la erosión de los relieves muy próximos. Dicha comunicación vertical se restituyó mediante "drenes", que simulan la existencia de una capa ficticia, no impermeable, que se interponga entre el mar y las dolomías; se les impone el potencial cero (el del mar), y no se les atribuye ningún caudal límite, de forma que el flujo pueda establecerse en los dos sentidos, de forma simétrica, según que el

potencial de las dolomías sea positivo o negativo. La importancia de dicho flujo viene condicionada por la diferencia de potencial entre ambas masas de agua, y por un "coeficiente de transferencia" que tiene las dimensiones de una transmisividad vertical, y cuyo valor debe calarse.

A falta de datos concretos sobre la posible conexión de las dolomías con el mar, la solución adoptada permite, en el curso del calado, aumentar o disminuir (e incluso anular) el flujo saliente de agua dulce (o el flujo entrante de agua de mar), simplemente a través del valor del coeficiente de transferencia y del valor de las transmisividades de las mallas del entorno.

• Una vez determinada la situación de los límites y fijado uno de los ejes del mallado (el eje E-W, correspondiente a la dirección de las fallas F), dicho mallado no ha presentado dificultades. La mayor parte del acuífero se discretizó en mallas de 0,5" de lado al 1/50 00 (es decir de 635 m), y el resto en mallas de dimensión doble; estas últimas corresponden en general a los sitios en los que los potenciales son, y permanecerán, desconocidos es decir en la sierra y en el mar. No se ha creído interesante el utilizar mallas más pequeñas, por la gran tranquilidad de la piezometría (ahí donde se la conoce). Incluso el número de mallas medianas podía haber sido sensiblemente reducido (en beneficio de las mallas grandes) de no existir la obligación, inherente al modelo NEWSAM, de que las mallas de dos capas superpuestas no pudiesen diferir en más de un orden de magnitud; la necesidad (como se verá más adelante) de utilizar mallas pequeñas (de 317,5 m de lado) en gran parte de la capa 1, ha obligado a discretizar gran parte de la capa 2 en mallas medianas, cuando mallas grandes hubieran sido suficientes, en muchos casos, para modelizar dicha capa.

Tal y como ha sido definido, el mallado de la capa 2 consiste en 330 mallas, de las cuales 291 medianas (635 m de lado) y 39 grandes (1 270 m de lado), como viene reflejado en la figura adjunta.

### 2.3.- LIMITES LATERALES Y MALLADO DE LA CAPA 1

- Todo el borde Norte y NNE es un límite a flujo nulo, aún cuando gran parte de las mallas correspondientes son la sede de una intercomunicación vertical con el acuífero profundo, como se explicará enseguida.

- En toda la periferia occidental y meridional del acuífero, el mar corresponde a un potencial cero impuesto; las zonas de marismas y de salinas, asimismo, se pusieron a potencial nulo. Ulteriormente, se introdujeron tres modificaciones en la zona meridional, por considerar que ésta sólo contiene un acuífero muy pobre (por desaparición completa, o casi, de las calcarenitas pliocenas) que, además, puede estar más o menos desconectado del resto del sistema. En la práctica, el subafloramiento del substrato margoso entre Matagorda y La Mojonera hubiera justificado el excluir del modelo dicha zona meridional.

- Una de estas modificaciones, precisamente, consistió en "sacar" artificialmente del dominio modelizado la zona de Guardias Viejas: puesto que ya había sido incluida en el mallado, su exclusión hubiera obligado a cambios en cascada, especialmente en los ficheros que se habría tenido que rehacer por completo; se prefirió entonces atribuir a las mallas correspondientes unos potenciales impuestos altísimos (99 m), transmisividades extremadamente pequeñas (pero no nulas, lo que hubiera impedido el

uso del método de resolución directa de Gauss-Jordan (\*), en el cual no puede haber valores nulos en la diagonal de una matriz) y caudales nulos de alimentación y de bombeo. Se consiguió la desconexión con el resto del sistema gracias al uso de mallas-dren, con potencial a la cota + 35 m (cota aproximada del techo de las margas) y caudales entrantes (al resto del sistema) limitados a cero: esta última condición impide el flujo entre la zona de Guardias Viejas y el resto del acuífero, o sea un flujo Sur-Norte, mientras que el potencial impuesto a la cota + 99 m impide, en la práctica, un flujo Norte-Sur.

- La segunda modificación consistió en fijar, de forma arbitraria, un potencial + 1 m a un cierto número de mallas de la zona meridional, o de San Agustín, situadas entre las de potencial cero (las de la orilla del mar) y el subafloreamiento de las margas grises. No tiene justificación física dicha modificación, que no tiene otro objetivo que el de "aplastar" artificialmente la piezometría. En consecuencia, hay que ser consciente de que toda la parte costera situada entre Matagorda, San Agustín y Las Marinas, no es realmente modelizada: se ha recurrido a este artificio para que la piezometría restituida sea parecida a la observada, por lo demás muy constante.

- La tercera modificación se llevó a cabo hacia el final de la fase de calado. Consistió en convertir en mallas-dren todo el límite entre la zona meridional y el resto del sistema, es decir el subafloreamiento de las margas grises al que ya se ha aludido. Como se verá más adelante, dicho subafloreamiento se había traducido, en la modelización, por una barrera de transmisivi-

(\*) Durante buena parte del calado en permanente, se prefirió trabajar en resolución directa en lugar de por el método iterativo; en efecto, la complejidad de la estructura hizo que era muy elevado el número de iteraciones necesario para llegar a la convergencia; limitándose a 500 iteraciones, quedaba siempre un error importante en los balances. Bien avanzado el calado, fue posible volver al método iterativo, obteniéndose la convergencia con menos de 500 iteraciones.

dad, que corresponde a una franja en la cual la parte saturada del acuífero tiene poco espesor y, además, tiene malas permeabilidades por tratarse de la facies arenoso-margosa que hace transición entre el substrato margosos y el acuífero calcarenítico. Sin embargo, en régimen no influenciado (es decir, en ausencia de bombeos), el agua que no se bombea tiene que poder salir del sistema, y no lo puede a través de la citada barrera de transmisividad; en otros términos, en ausencia de bombeo, la zona saturada suprayacente al subafloramiento de margas tiene mayor espesor y mejor calidad hidráulica, por lo que los valores de transmisividades admitidas no pueden reflejar el estado en régimen natural. Este esquema es parecido al que, si la superficie del suelo estuviese próxima al techo del subafloramiento, daría lugar a una línea de manantiales en régimen natural, que casi se secarían en régimen de bombeo. Sin embargo, las transmisividades del entorno se mantienen pequeñas. Con este dispositivo, el flujo hacia la zona meridional está regido por las bajas transmisividades mientras la superficie libre no supera el potencial impuesto de los drenes (es decir la cota de la superficie libre actual), y por los coeficientes de transferencia (equivalentes a transmisividades mayores) cuando sube la superficie libre por encima de dicho potencial.

• La mayor parte del límite nor-este del acuífero se ha traducido también por mallas-dren, que permiten al manto verse en cierta medida hacia el Sector nord-este.

• Por último, el límite norte (zona de Los Alacranes) corresponde a la descarga del Acuífero superior en el inferior. Eran posibles dos formas de traducir esta particular relación hidrodinámica, y han sido testificadas ambas.

- Se puede considerar que, como en el límite nor-este, el agua de la capa 1 vierte hacia la capa 2 mediante una especie de rebozadero (marcado por el techo de las margas grises). Ello se modelizaría mediante mallas-dren. Esta solución presenta a priori la ventaja de que el caudal saliente sea independiente de la diferencia de potencial entre ambos mantos, y por lo tanto de conservar (lo que se observa en la realidad) una superficie libre alta y relativamente constante, a pesar del descenso continuo del manto de la capa 2. Pero tiene dos inconvenientes: el primero es que, al desconocerse el mecanismo exacto de la relación entre ambos mantos, esta solución no permite sino un escaso margen de maniobra (salvo manipulaciones delicadas) a partir de una determinada hipótesis (hecha sin grandes conocimientos de causa) sobre la cota del rebozadero; el segundo inconveniente es el de desligar completamente ambos mantos y, por consiguiente, tener que definir, para cada fase de cálculo, el caudal saliente de la capa 1 e introducirlo (manualmente o mediante un programa de lectura) como entrada a la capa 2.
  
- También se puede admitir, y así ha quedado, que la relación entre ambos mantos se realiza por intercomunicación vertical (drenancia) a través del bisel de margas arenosas hacia el Norte, como ha quedado explicado en el párrafo 1.3 de esta misma parte). Esta solución mantiene una relación hidrodinámica entre ambos mantos (lo que no hacía la anterior), pero hace que los caudales sean estrictamente proporcionales a la diferencia de carga. Para evitar que la capa 1 baje conforme va bajando la capa 2, hay que jugar sobre las transmisividades de la primera y sobre los coeficientes de drenancia de la segunda. El correspondiente calado se comentará más en adelante.

#### 2.4.- RELACION DE LA ESCAMA DE Balsa Nueva con las Capas 1 y 2

El pequeño manto contenido en dicha escama se ha considera

do como parte de la capa 1, con la cual comunica al Sur y al SE (por la continuidad que se observa en la piezometría). En cuanto a sus relaciones con la capa 2, se ha admitido un tipo particular de estructura:

La capa 2 tiene una escasa relación "directa" con el mar. En el pasado, cuando su superficie tenía una cota alta (del orden de + 12 m a principios de los años 1960), su agua pasaba a la escama y, de aquí, al mar. Actualmente, la superficie del manto de la capa 2 está sobre la cota - 6 m, y se ha establecido un flujo en sentido contrario, es decir una entrada de agua de mar en la escama (materializada por la intrusión marina ya puesta de manifiesto), y de aquí a la capa 2. En efecto, se ha podido calcular que los bombeos relativamente escasos que tienen lugar en la escama no pueden ser responsables (por ser sensiblemente menores que las entradas) de la desaturación de la escama y de la consiguiente intrusión marina; por lo tanto, dichos fenómenos deben relacionarse con el descenso de niveles en la capa 2, lo que demuestra una relación hidrodinámica entre la escama y dicha capa 2.

Ha habido, pues, que materializar dicha relación, de sentido variable por añadidura. La drenancia ha parecido el único procedimiento sencillo que permitiese simular un flujo entre los dos mantos, proporcional a la diferencia de carga entre ambos, y que pudiese invertirse. Permite evitar el simular el trinomio capa 1/Escama/capa 2 como un sistema único en el cual se produce un flujo local tridimensional.

Incluyendo a la escama, el mallado de la capa 1 consta de 794 mallas, de las cuales 60 grandes (1270 m de lado), 179 medianas (635 m de lado), y 555 pequeñas (317,5 m de lado). Para poder conocer los balances locales, se dividió este conjunto en ocho zonas (utilizando generalmente las barreras de transmisividad puestas de manifiesto por la piezometría:

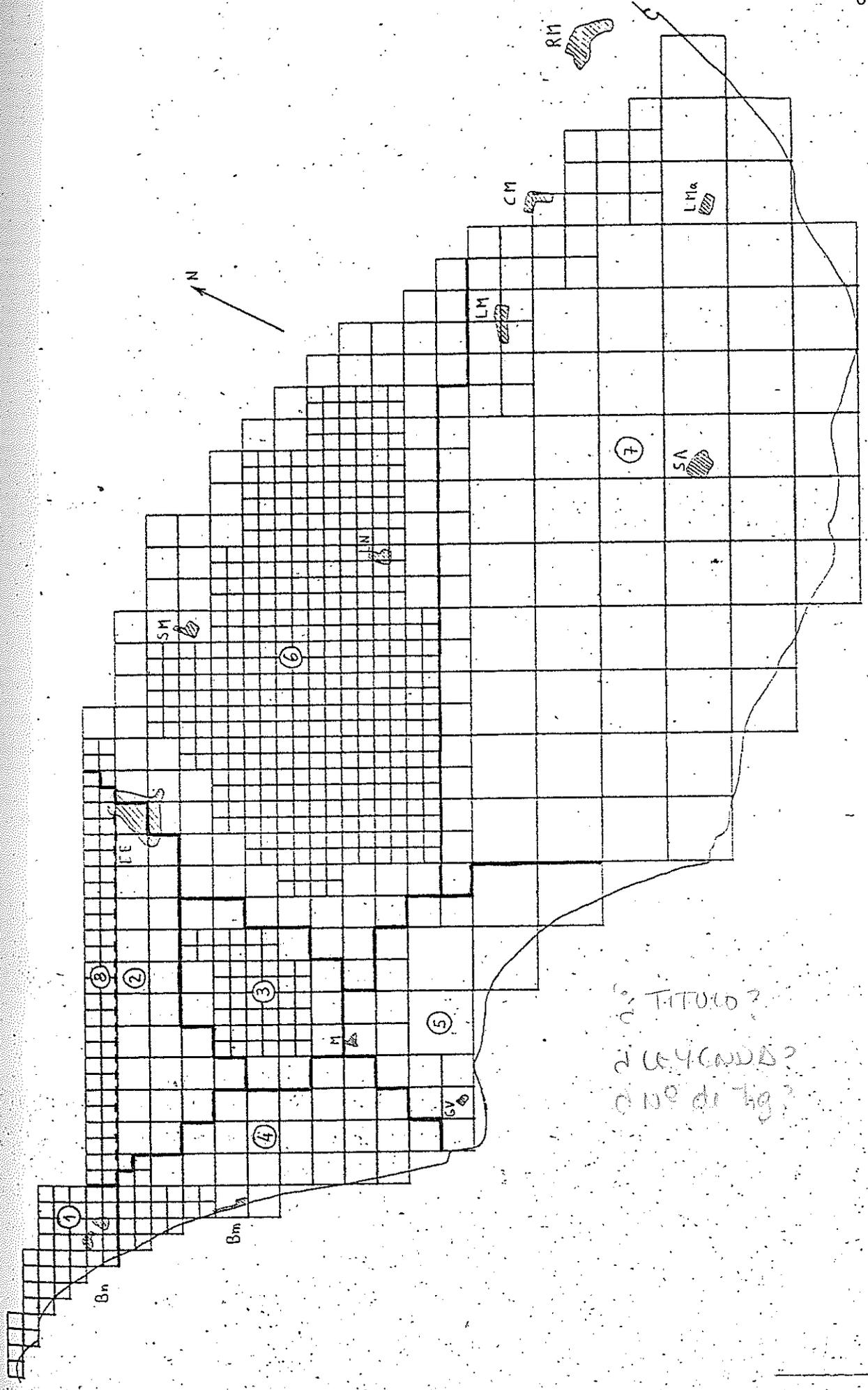
- Zona 1: Escama de Balsa Nueva
- Zona 2: Los Alacranes (\*)
- Zona 8:
- Zona 3: Onayar
- Zona 4: Balerma
- Zona 5: Guardias Viejas (\*\*)
- Zona 6: Santa María
- Zona 7: San Agustín

El mallado y las zonas vienen reflejadas en la figura adunta.

---

(\*) En el curso del calado, se estimó necesario subdividir en dos la zona de Los Alacranes, considerándose como zona 8 la primera fila de mallas, es decir aquellas por las cuales se produce la mayor intercomunicación vertical con la capa 2.

(\*\*) Posteriormente excluida del modelo, como indicado anteriormente.



### 3.- EL CALADO

#### 3.1.- EL CALADO EN REGIMEN PERMANENTE

##### 3.1.1.- Elección de la época

El hecho de que la explotación del Campo de Dalías empezara mucho antes de que se iniciase el control hidrogeológico del mismo impidió, evidentemente, poder considerar como régimen permanente a un régimen no influenciado por los bombeos. Además, cuando dio comienzo el estudio del Campo, a principios de los años setenta, los niveles piezométricos estaban ya bajando, por lo menos en la capa 2.

No quedaba más remedio, por lo tanto, que buscar la menos mala época, dentro del período controlado, es decir desde 1972, aunque los mantos estuviesen explotados desde mucho tiempo atrás. Gracias a la red de piezómetros de control, ya se sabía que:

- En la capa 1, la mayoría de las evoluciones piezométricas eran relativamente rectilíneas, es decir sin fluctuaciones estacionales sensibles, pero algunas descendientes, otras ascendientes, y las últimas relativamente horizontales.
- En la capa 2, por el contrario, todas las evoluciones reflejaban las sucesiones de bombeos y alimentaciones,

y un descenso muy sensible (del orden de 1 m/año) y continuo, excepción hecha del bienio 1975-76/1976-77. Durante este período (y gracias a una alimentación atmosférica excepcional y, probablemente, a una disminución concomitante de los bombeos), los tres estiajes presentaron prácticamente la misma cota piezométrica.

Se podía considerar, por lo tanto, que durante el bienio 1975/1977 la capa 2 no había experimentado variaciones importantes de reservas y, despreciando los efectos de las alimentaciones y bombeos pasados, admitir durante él un régimen permanente.

Puesto que este bienio era el único admisible, en cuanto a régimen permanente se refiere, para la capa 2 y aunque no lo fuera para la capa 1, se decidió calar el régimen permanente sobre los caudales medios del mismo.

Sin embargo, es importante destacar que sólo se pretendía, mediante un calado aproximado de los caudales y de los parámetros hidrodinámicos, restituir una piezometría (en ambas capas) que permitiese inicializar el calado en transitorio. En efecto, por una parte un régimen permanente perfecto no existe y no conviene tomar al pie de la letra los valores calados durante el mismo; por otra parte, no hay que perder de vista que la piezometría que se observa en un momento dado no es sólo el resultado (además de los parámetros del acuífero) de los caudales positivos y negativos del mismo momento, sino también de los del tiempo pasado; por último, se debe hacer constar que no se disponía de mapas piezométricos correspondiente a un mes cualquiera del bienio que se tuvo que elegir; se elaboró, para cada capa, un mapa correspondiente al estado supuesto del manto en un mes determinado, a partir del valor de la cota observada en dicho mes en todos los piezómetros disponibles de la red de control, y teniendo en cuenta la forma

que tenían las isopiezas en febrero 1981 y febrero 1984, meses durante los cuales se procedió a sendas campañas exhaustivas de medidas piezométricas. Cabe aquí una última observación: al utilizar caudales medios del bienio en cuestión, hubiera sido lógico que el mapa piezométrico a restituir correspondiese a un estadio "medio" del manto; ante lo difícil y subjetivo que resultaría la definición de tal estado medio, se optó por elaborar un mapa de estiaje (octubre 1976), a sabiendas de que los caudales medios darían una piezometría más alta, por lo menos en la capa 2 en la que había grandes oscilaciones estacionales. Así ocurrió, y hubo que afectar de un coeficiente 0,7 la alimentación atmosférica (en régimen permanente) de la capa 2 para restituir esta piezometría de estiaje; en la capa 1, de escasas o nulas oscilaciones, estacionales, no hubo que introducir ningún coeficiente reductor.

Hechas estas salvedades, se puede pasar a describir el ca lado de los distintos caudales y parámetros utilizados.

### 3.1.2.- La alimentación atmosférica

El modelo de alimentación atmosférica, explicado en otra parte de la presente memoria y compuesto de los programas THORD y PLUM 2 puestos en serie, es capaz de atribuir a cada malla del sistema y para cada mes del período tratado (octubre 1974 a septiembre 1984), la alimentación que le corresponde a dicha malla. Sin embargo, al no disponer de un curso de agua más o menos permanente cuyos caudales permitiesen calibrar los distintos componentes del modelo de alimentación, hubo que calar estos últimos a la vez que las transmisividades (y, en menor medida, que las porosidades). Conviene recordar que los citados componentes del modelo de alimentación consisten en:

- zonación de la cuenca en zonas isoyetas, y atribución de una serie pluvio-termométrica a cada una

- elección de los parámetros CRT y DCRT
- elección del orden de prioridades entre la formación de lluvia útil, la pérdida por evapotranspiración, y el llenado del "depósito suelo"
- elección de la rapidez con la cual la infiltración que tiene que hacer un recorrido subterráneo lateral llega a la primera malla saturada
- elección de la rapidez con la cual la escorrentía superficial generada en la sierra llega a infiltrarse en las mallas de llanura
- elección de los porcentajes de escorrentía que se infiltran en cada una de las mallas en serie que, al llegar a la llanura, "soportan" una rambla
- elección, asimismo, de la repartición del agua superficial infiltrada en cada uno de los dos mantos, cuando procede.

Para poder encontrar el conjunto de respuestas que permitiese restituir la alimentación atmosférica (y sin tener la seguridad de que la solución fuese única), hubo que tantearlas casi todas, y no solamente en régimen permanente sino también en transitorio. El resultado de estos tanteos de parámetros viene indicado al final del sub-capítulo dedicado al modelo de alimentación atmosférica. En cuanto al resultado cuantitativo, es decir la alimentación año por año, viene dado en el subcapítulo dedicado al programa ALIM.

### 3.1.3.- La alimentación por infiltración de excedentes de riego

Antes incluso de comenzar la realización del modelo matemá

tico, llamó la atención el hecho de que, en algunas zonas de la capa 1, la superficie libre subiese continuamente. No podía tratarse de una recuperación de los niveles iniciales, después del abandono o de la reducción de los bombeos (como, por ejemplo, ocurrió en la zona de Onayar a partir del verano de 1981), puesto que los sectores en los que se notaba la subida no habían sido afectados por ninguna explotación anterior (sino, en algunos, meramente simbólica). Se trataba, entonces, de una sobrealimentación local cuyo único origen posible debía de ser la infiltración de excedentes de riego.

Efectivamente se notó que, si bien la subida piezométrica no se observaba debajo de todos los sectores regados (por estar enmascarada la subida por las depresiones de los bombeos, o por recibir el sector una alimentación atmosférica fuerte o gozar de transmisividades fuertes), no existía dicha subida fuera de las zonas regadas.

Sorprendió mucho la existencia de excedentes de riego en una parte de la provincia de Almería, en la cual es endémica la escasez de agua, y con los sistemas relativamente sofisticados que se utilizan (suelo artificial sobre suela margosa e incluso, desde hace algún tiempo, riego por goteo). Sin embargo, es un hecho, que pudo ser comprobado y cuantificado por el modelo.

A partir del mapa a 1/50.000 de las superficies regadas, elaborado en 1977-78 por el Ministerio de Agricultura, y procurando tener en cuenta las extensiones realizadas desde entonces, se definieron las mallas sobre las cuales se debía producir la infiltración de excedentes. A partir de una dotación media anual de unos 7.500 m<sup>3</sup>/ha (resultado de los estudios agronómicos en el Campo y teniendo en cuenta una ocupación secundaria de buena parte de las parcelas), tanteos sucesivos mostraron que del orden de

un 15% del agua aplicada iba al manto. Ello representaba un caudal medio de 316 l/s (cerca de  $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) para el conjunto de la capa 1, y de 54 l/s (cerca de  $2 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) para la capa 2.

La importancia del caudal así aportado a la capa 1, que era del mismo orden de magnitud que la alimentación atmosférica media, hacía inaceptable la aproximación anterior sobre una superficie regada "media" que fuese representativa del conjunto del periodo de calado (1975-76/1984-84). Afortunadamente, se pudo tener acceso a las fotografías de un vuelo aéreo realizado en 1984, que se pudo transformar (con ciertas dificultades de interpretación) en mapa a 1/50.000.

Ello permitió definir dos periodos sucesivos; para el primero (calado en permanente, y años 1977-78 y 1978-79 del transitorio), se utilizó el mapa elaborado en 1977-78; para el segundo (años 1979-80 a 1983-84 del transitorio), se partió del vuelo de 1984.

En los programas informáticos PIRRIG y PIRRIG2 creados, cada una de estas dos superficies ha sido respectivamente expresada en superficies equivalentes de una malla pequeña ( $a = 317,5 \text{ m}$ ); en otros términos, una malla pequeña regada en su totalidad vendrá representada por la cifra 1, una malla mediana por la cifra 4, y una malla grande por la cifra 16. Conviene señalar que puede ocurrir que una malla lleve una cifra superior a la que le corresponde por su talla: este caso se da únicamente en algunas mallas de borde para las cuales se ha admitido que recibían agua de riego (así como de lluvia útil) llevadas desde aguas arriba gracias a pasadas margosas en la capa no saturada, que se oponían a que dichas aguas llegasen hasta el acuífero inferior infrayacente.

Lo deseable hubiera sido adaptar el calendario de alimentación del manto al de aplicación del riego. No obstante, hubo que admitir que la aportación al manto era constante a lo largo de los meses del año, por las dos razones esenciales siguientes:

- la primera radica en la imposibilidad de saber con exactitud cuanta agua se aplicaba cada mes a cada parcela. Para ello, hubiera sido necesario conocer no solamente la explotación de cada sondeo (que se conoce), sino también adónde iba el agua bombeada; en efecto, son relativamente pocos los sondeos que abastecen a la parcela que les rodea, ya que la mayoría de ellos lo llevan más o menos lejos mediante conducciones, de trazado y utilización desconocidos; además, está el problema de la utilización del agua de las canales de Sol y Arena (ex IRYDA)
- la segunda razón es que, por lo menos en la mayor parte de la capa 1 (que recibe lo esencial de la infiltración de excedentes de riego), las evoluciones piezométricas observadas no enseñan oscilaciones estacionales apreciables, por muy irregulares que sean las aportaciones atmosféricas. En estas condiciones, hubiera sido irracional modular en el tiempo los excedentes de riego, para luego actuar sobre las condiciones de flujo para que aparezcan constantes. En cuanto al resto de la capa 1 (esencialmente, mallas del borde septentrional y de la zona costera) y a la capa 2 (en la cual la importancia de los excedentes de riego es escasa con respecto al resto de la alimentación), el hecho de admitir constante la aportación por el riego no podía sino conllevar, en el peor de los casos, un ligero aplastamiento de las evoluciones piezométricas restituídas por el modelo, es decir una cierta sobreestimación de la alimentación durante las épocas de riego real relativamente escaso (noviembre a

febrero, en general) y, al contrario, una subestimación de dicha alimentación durante los meses de riego fuerte (julio a octubre, o a veces sólo septiembre y octubre).

Para determinar la cuantía del agua de riego infiltrada, se ha partido de las encuestas y datos contenidos en el capítulo 2 (Demandas de agua en la provincia de Almería) de la "Síntesis hidrogeológica de Almería" que acaba de realizar ENADIMSA por en cargo del IGME.

Resulta de este estudio que, incluyendo los cultivos de segunda cosecha, la demanda "agronómica" de los cultivos regados en el Campo de Dalías asciende a un total de  $68,70 \text{ hm}^3/\text{año}$  (sin contar la pequeña parte del Campo que pertenece al municipio de Berja); al repartirse esta cantidad entre  $10.990 \text{ ha}$  físicamente existentes, resulta un valor de  $6\ 250 \text{ m}^3/\text{año}$  por hectárea.

Se ha considerado asimismo, en dicho estudio, que la eficiencia media del riego era de un 85%, por lo que había que aplicar una dotación de  $6250/0,85 = 7\ 350 \text{ m}^3/\text{año}.\text{ha}$  en término medio.

En consecuencia, se ha admitido provisionalmente que la diferencia  $7\ 350 - 6\ 250 = 1\ 100 \text{ m}^3/\text{año}.\text{ha}$  pasaba a alimentar a los acuíferos infrayacentes. Se ha podido comprobar que este valor era aceptable durante los primeros años del calado, pero que resultaba insuficiente en los años de sequía. Después de tanteos sucesivos, se ha determinado que la cifra de  $1\ 560 \text{ m}^3/\text{año}.\text{ha}$  (correspondiente a una eficiencia de un 80%) era la más adecuada para restituir, junto con los demás caudales intercambiados con el exterior, las evoluciones piezométricas observadas durante el segundo período. Ello no quiere decir que, en años secos, la planta necesite el mismo volumen de agua y que se infiltre la totalidad del suplemento aportado; podría significar que se aporta un suplemento superior al que necesitaría la planta por la sequía.

Al final, los caudales aportados, según la adecuada repartición espacial, a cada uno de los acuíferos son los siguientes:

|                         | Capa 1  | Capa 2 |
|-------------------------|---------|--------|
| Período 1975-76/1977-78 | 236 l/s | 58 l/s |
| Período 1978-79/1983-84 | 424 l/s | 89 l/s |

#### 3.1.4.- Infiltración de aguas residuales urbanas

Al no existir, en ningún núcleo urbano, red alguna de alcantarillado, ni planta depuradora, ni conducción de vertido al mar, era necesario admitir que el caudal de aguas residuales debía infiltrarse in situ. Este hecho, por cierto, venía más o menos demostrado por la forma de las isopiezas debajo de las poblaciones de El Ejido y de La Mojenera: ahí, se notaba un cierto abombamiento de la piezometría, índice de una zona de alimentación; además, en estos sectores, el manto experimenta una subida constante del nivel piezométrico.

El estudio realizado en 1984 por ENADIMSA para el IGME sirvió de base al cálculo. Para que las cifras, referidas a dicho año, fuesen representativas del periodo de calado, se procedió a dos modificaciones:

- la población fue disminuída en un 10%
- la dotación utilizada (para todo el año) fue la del invierno (variable entre 200 y 280 litros/habitante .día, según el núcleo considerado).

Por último, se admitió que el consumo (incluyendo la evaporación) no superaba el 25%, es decir que el 75% del agua aplicada se infiltraba hasta el manto.

Las poblaciones consideradas, y los caudales infiltrados correspondientes, vienen reflejados en el cuadro siguiente:

| Poblaciones     | Mallas correspondientes      | Caudal total l/s |
|-----------------|------------------------------|------------------|
| El Ejido        | 121, 122, 145, 183, 184, 230 | 24               |
| Santa María     | 200                          | 5                |
| La Mojonera     | 721, 722, 727, 728           | 6                |
| Las Norias      | 594                          | 4                |
| Balerna         | 204                          | 5                |
| Balanegra       | 28, 34                       | 2                |
| Tarambana       | 78                           | 1                |
| Matagorda       | 497                          | 2                |
| Guardias Viejas | 641                          | 1                |
| San Agustín     | 772                          | 2                |

### 3.1.5.- La explotación por bombeo

Ya se ha dicho con anterioridad que los caudales mensuales de cada pozo vienen siendo controlados desde el año 1980. Para los años anteriores (y concretamente para el período de calado en permanente), han tenido que ser extrapolados.

Para ello, se ha partido de los caudales anuales del período controlado y se ha extrapolado hacia el pasado las tendencias notadas durante dicho período; la extrapolación ha sido corregida para tener en cuenta las indicaciones dadas por el primer inventario de puntos de agua que se realizó en el Campo de Dalías a lo largo del año 1972; también se ha tenido en cuenta, obviamente, la fecha de realización o de abandono de los pozos que no tuvieron actividad durante todo el período del calado, así como cualquier otra indicación que nos hubiese podido proporcionar el dueño o el encargado de los pozos.

Evidentemente, toda extrapolación conlleva un riesgo de error, y no se puede garantizar que los caudales así determinados fueron los reales.

En el caso concreto de la zona de Onayar, se vió que dicha extrapolación había conducido a subestimar los caudales anteriores, y hubo que incrementarlos en un 10%. La explicación de esta anomalía es fácil: cuando se aforaron los pozos de dicha zona, en 1980 y 1981, el nivel piezométrico estaba sensiblemente más bajo que en los años anteriores, debido a la sobreexplotación continua que sufrió esta zona; en consecuencia, era lógico que los caudales correspondientes al período del permanente fuesen más elevados que los que fueron aforados en 1980.

### 3.1.6.- Otras salidas

Al principio del calado, se había introducido en el modelo pérdidas por evaporación directa sobre las marismas y salinas. Sin embargo, posteriormente, se decidió poner a potencial impuesto 0 ó 1 las mallas correspondientes, por lo que dichas pérdidas se quedaron sin efecto.

### 3.1.7.- Parámetros hidráulicos

Los distintos parámetros que rigen el flujo subterráneo (transmisividades, coeficientes de drenancia, coeficientes de transferencia de los drenes) han sido calados mediante numerosos tanteos, tanto en régimen permanente como en transitorio. Serán analizados, conjuntamente con los coeficientes de almacenamiento, en el subcapítulo del calado en transitorio.

### 3.1.8.- Saturación/desaturación

El período elegido para el calado en permanente (bienio 1975-76/1976-77) era el único posible para la capa 2, en la cual estos dos años fueron los únicos en no tener descenso del nivel piezométrico medio.

Sin embargo, en la capa 1, no ocurrió lo mismo durante esos años (ni tampoco en otros) ya que, según el sitio considerado, el nivel piezométrico subió, bajó o se quedó estable. Era necesario, por lo tanto, tener en cuenta los volúmenes de desaturación y de resaturación, es decir, al fin y al cabo, los volúmenes de agua intercambiados entre el manto y sus propias reservas, y añadirlos (algebráicamente) a la ecuación matricial del flujo, convirtiéndola en

$$TH = Q + a^2 S \frac{dh}{dt}$$

Para ello, se considera que un descenso del nivel es equivalente a una aportación al manto a partir de las reservas: es una inyección; al contrario, una subida del nivel equivalente a una salida del manto hacia las reservas: es como un bombeo.

En resumen:

desaturación = inyección hacia el manto (desde las re  
servas)

resaturación = bombeo desde el manto (hacia las rese  
vas)

Se trataba entonces de determinar las mallas en las que, durante el período de calado en permanente, se había producido un cambio (positivo o negativo) en las reservas.

Para ello, se ha considerado la cuarentena de piezómetros disponibles y, en cada uno, se ha determinado la diferencia dh de cota piezométrica entre octubre 1975 y septiembre 1977. Se ha extrapolado dicha diferencia a los sectores próximos, y elaborado con ello un mapa de "iso-dh", en el cual un dh negativo (= desatu  
ración de reservas) se consideraba como una inyección (caudal ne  
gativo según las normas de funcionamiento del programa NEWSAM), mientras que un dh positivo (= constitución de reservas) se con  
sideraba como un bombeo (caudal positivo según dichas normas).

Por otra parte, había que definir la porosidad, o coefi  
ciente S, lo que también dió lugar a un mapa.

El programa EMMA, explicado por otra parte, transforma los datos precedentes en caudales de inyección o de descarga, según el caso, atribuido a las mallas adecuadas.

### 3.2.- EL CALADO EN REGIMEN TRANSITORIO

En el curso del calado en permanente, se habían realizado varias pasadas en transitorio (con un abanico muy restringido de coeficientes de almacenamiento), para asegurarse de que no exis  
tía ninguna incoherencia grave en las hipótesis de base.

En dichas pasadas, se había conseguido ya una muy aceptable restitución de las evoluciones de los piezómetros de la capa 2, mientras que, para varios piezómetros de la capa 1, existían notables diferencias con las evoluciones observadas. La mayor parte de dichas diferencias pudieron ser corregidas actuando sobre los caudales de inyección (mejor calado de los parámetros e hipótesis del modelo de alimentación atmosférica, así como de los coeficientes correctores de los datos pluvio-termométricos de base, modificación del límite entre las áreas climáticas 4 y 5, mejor calado de la infiltración de excedentes de riego ....).

Sin embargo, la actuación sobre los caudales intercambiados con la superficie no fue siempre suficiente, y particularmente en los sectores limítrofes con otros sistemas acuíferos (Esca ma de Balsa Nueva y zona de Los Alacranes, relacionadas con el Acuífero inferior occidental; sectores de borde con el Sector nordeste), lo que demostraba que había que retocar no solamente los coeficientes de almacenamiento, sino también las transmisividades, los coeficientes de drenancia, y los coeficientes característicos de las mallas-dren.

Muy particularmente, presentó problemas la restitución de los piezómetros de la zona de Los Alacranes, por lo cual se produce gran parte de los intercambios verticales con la capa 2: mientras que el calado en permanente había dado mapas piezométricos muy semejante a los elaborados con las medidas de observación, y que era aceptable la restitución de los piezómetros de dicha zona durante los primeros años de transitorio, la restitución de las cotas calculadas a partir del año 1980-81 experimentaba una caída piezométrica que no existía en la realidad.

Podía pensarse que esta anomalía era debida al modelo de alimentación atmosférica, que daba menos agua que la debida en años muy secos. Sin embargo, el hecho de que la capa 2 no presen

taba estos problemas hizo desechar, a priori, esta posibilidad. Efectivamente, dicha anomalía, y otras, pudieron ser arregladas al actuar sobre las características hidrodinámicas de los acuíferos, como se indica a continuación.

### 3.2.1.- Transmisividades

Las sucesivas fases del calado confirmaron la idea general que se tenía sobre el campo de transmisividades de cada uno de los dos acuíferos modelizados:

- en la capa 1, valores muy heterogéneos, dentro de un abanico de mediocres a medianos
- en la capa 2, valores muy altos y homogéneos

#### ● Capa 1:

Los conocimientos, adquiridos con anterioridad a la modelización, sobre la estructura geológica del Acuífero superior central se vieron confirmados. A pesar de su aparente tranquilidad estructural, dicho acuífero se ha visto afectado por dos fenómenos sucesivos: en el aspecto sedimentológico, un paso más o menos gradual entre las margas grises y las calcarenitas (margas progresivamente más arenosas, luego arenas cada vez menos margosas); en el aspecto tectónico, unos movimientos de reajuste que se han traducido por ondulaciones y un gran número de fallas cuyos saltos, aunque pequeños en valores absolutos (de unos pocos metros a 20 ó 25 m) son importantes con respecto al espesor del acuífero (de 10 a 80 m por lo general). La consecuencia de ambos fenómenos es evidente: cuando un determinado sector se encuentra levantado por falla, no solamente el acuífero pierde espesor sino que también pierde calidad hidrodinámica al aumentar relativamente la proporción de las arenas margosas de la base a expensas de las calcarenitas del techo.

Efectivamente, las barreras de transmisividades que se habían determinado, en la fase preliminar, a partir de las columnas de sondeos, de la geofísica eléctrica, y del mapa geológico, fueron confirmadas por el modelo.

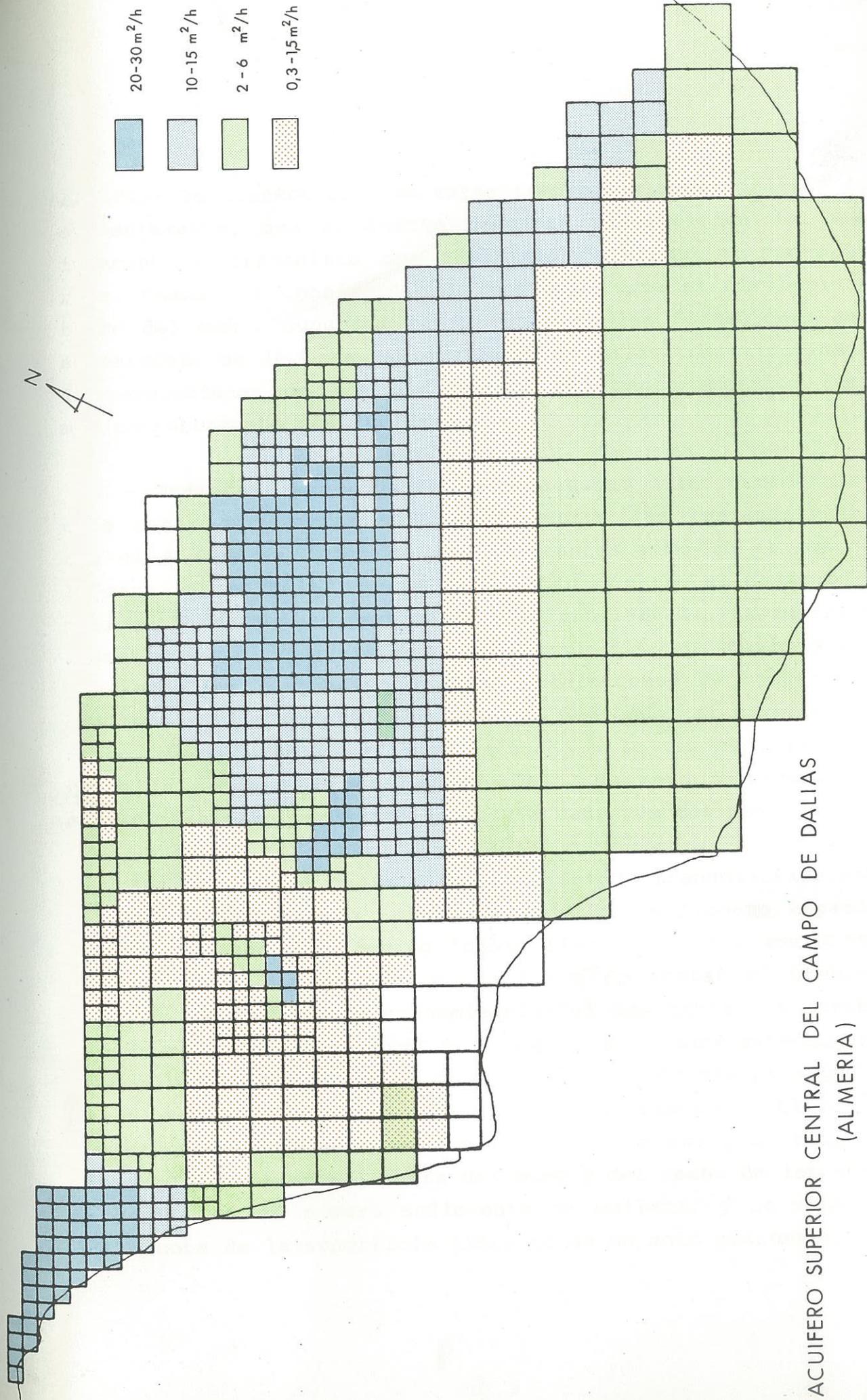
En cuanto a los valores de la transmisividad, son coherentes con los determinados en las campañas de bombeos de ensayo, aunque algo inferiores: en los mejores sectores, este parámetro no supera los  $30 \text{ m}^2/\text{h}$ ; por el contrario, en las barreras de transmisividad, el valor de este parámetro se queda en torno a  $1 \text{ m}^2/\text{h}$ .

Tal y como lo enseña el mapa adjunto, se puede distinguir tres sectores relativamente bien diferenciados:

- la Escama de Balsa Nueva tiene valores de T de  $30 \text{ m}^2/\text{h}$ ; está rodeada por algunas mallas de  $10 \text{ m}^2/\text{h}$ .
- la mayor parte de la llamada zona de Santa María (excepto todos sus bordes) y el bloque de La Mojenera/Las Mariñas (parte NE de la llamada zona de San Agustín) tienen transmisividades de  $10$  a  $30 \text{ m}^2/\text{h}$ .
- en el resto del acuífero, este parámetro está comprendido, aproximadamente, entre  $0,5$  y  $5 \text{ m}^2/\text{h}$ .

Como ya se ha dicho, algunos sectores presentaron problemas en el calado de las transmisividades:

- Zona de Los Alacranes: en un principio, se había pensado que su franja más septentrional debía tener transmisividades relativamente altas, por corresponder a un sector de sedimentación más bien gruesa (borde del acantilado provocado por la fa



ACUIFERO SUPERIOR CENTRAL DEL CAMPO DE DALIAS  
(ALMERIA)

Transmisividades

0 1 2 Km

lla F2); la consecuencia de estas transmisividades "altas" fue, evidentemente, que el fuerte descenso piezométrico del manto inferior se transmitía con demasiada facilidad al manto superior. Cuando se consideró, al contrario, que el nivel piezométrico del manto superior se mantenía en las formaciones arenoso-margosas de la base del acuífero, de bajas transmisividades, las evoluciones de los piezómetros del manto superior fueron muy correctamente restituidas.

- Zona de Onayar: no se ha conseguido calar correctamente esta zona, por variar muy sensiblemente las transmisividades con el tiempo en lugar de ser constantes como en el resto de la capa 1 y en toda la capa 2. En efecto, entre el comienzo del período de calado en permanente y el año 1980-81, la superficie libre en el piezómetro 94-D bajó 13 m, y luego volvió a subir (por abandono progresivo de las instalaciones de bombeo de dicha zona). Ello quiere decir que, al descender el nivel piezométrico, se reducía el espesor saturado a la vez que, al desaturarse la parte superior del acuífero, de mayor permeabilidad, esta última característica se volvía cada vez más mediocre.

En teoría, se podía haber considerado transmisividades variables con el tiempo, bien a través de un fichero especial, o bien utilizando la opción "manto libre" del programa NEWSAM. La dificultad no radicaba en la forma de tratar el problema, sino en los valores de transmisividades que había que atribuir a cada malla por cada paso de tiempo. Para poder determinar dichos valores (con un grado de precisión suficiente para que luego se puedan afinar mediante calados sucesivos), hubiera sido necesario conocer medianamente bien la estructura de esta zona (y más concretamente la cota del muro y del techo de las arenas margosas, en un número suficiente de mallas), y la evolución de la cota de la superficie libre no en un solo piezómetro sino

en varios. Al no disponerse de estos datos mínimos, el calado habría sido muy laborioso, y se ha opinado que esta zona de Onayar, en la cual ya no hay casi bombeos, no merecía que se perdiera más tiempo de calado.

- Escama de Balsa Nueva: tal y como se ha comentado, se ha puesto un valor único de  $30 \text{ m}^2/\text{h}$ , con una aureola de mallas a  $10 \text{ m}^2/\text{h}$ . Es posible que el campo de transmisividades de este sector sea más heterogénea, pero esta gama de valores da una restitución aceptable de las evoluciones piezométricas. Sin embargo, dicha restitución podría ser sensiblemente mejorada, pero no ya solamente a partir de las transmisividades, sino también actuando sobre las transmisividades y los coeficientes de drenancia de la capa 2 infrayacente, y eventualmente sobre los coeficientes de almacenamiento de ambas capas, e incluso, quizás, sobre los caudales de alimentación por lluvia útil. Para todos estos términos, los valores escogidos suministran, en conjunto, una restitución piezométrica que ya se ha calificado de aceptable. Querer hacerla perfecta conllevará, muy probablemente, un número apreciable de pasadas de calado suplementarias que no ha sido posible realizar en el marco del presente estudio.

● Capa 2:

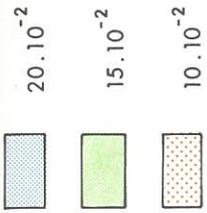
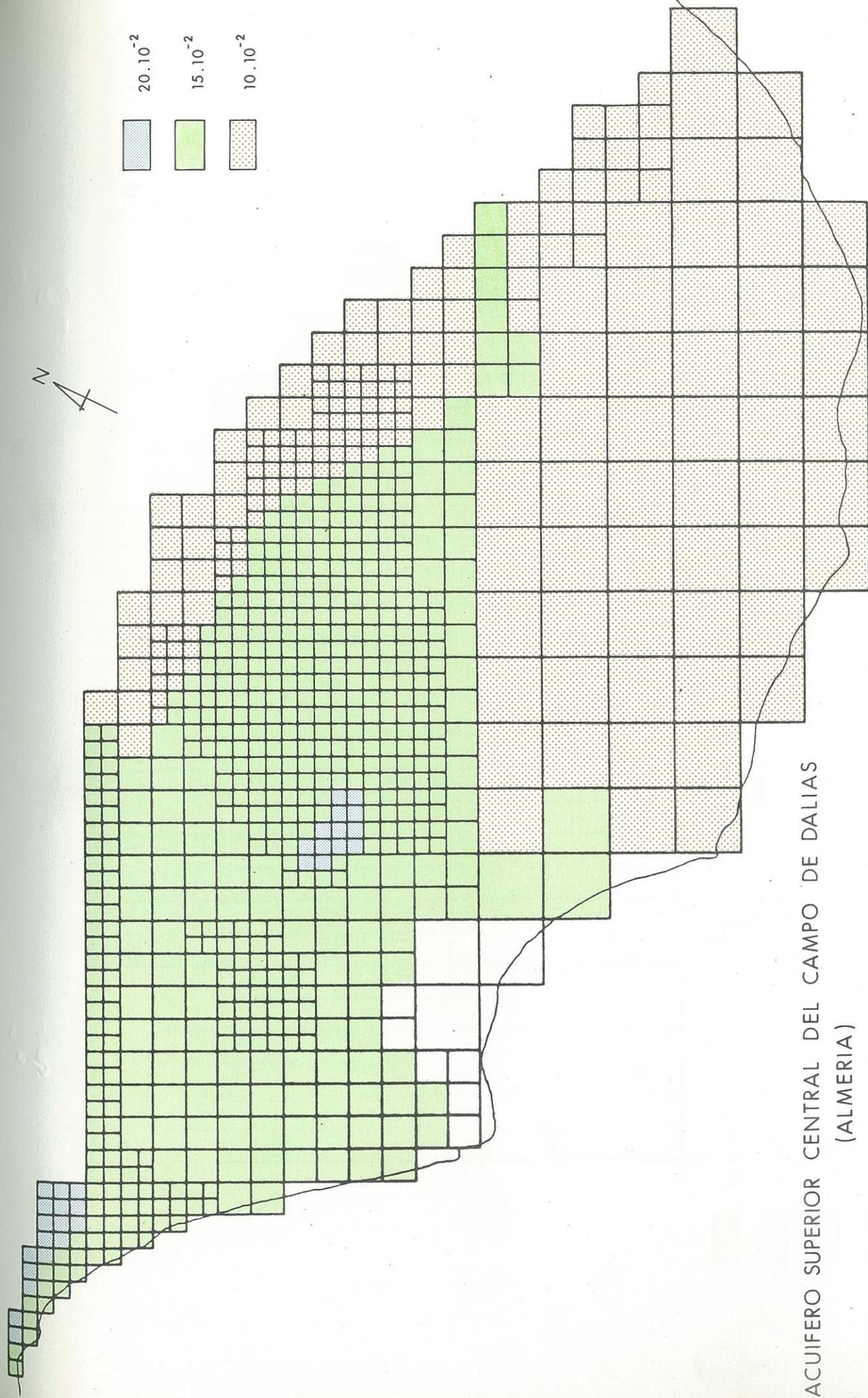
Lo único que se puede garantizar es que las transmisividades son muy elevadas. Al serlo éstas, el modelo no puede ser muy sensible a las variaciones de las mismas. Además, el total desconocimiento de la potencia de las dolomías en los diversos sectores del acuífero impide dar fe a cualquier zonación de las transmisividades. Por esta razón, se ha preferido poner un valor único de  $600 \text{ m}^2/\text{h}$  que, junto con las demás características hidrodinámicas del acuífero y con los distintos términos del

balance, ha permitido conseguir una restitución muy satisfactoria de las evoluciones piezométricas.

### 3.2.2.- Porosidades y coeficientes de almacenamiento

El calado no ha sido muy difícil en el Acuífero superior en el cual, por ser libre el manto, el abanico de las porosidades era finalmente bastante reducido. Sin perjuicio de que se pueda mejorar la modulación espacial de esta característica, se han considerado solamente tres valores: un 20% ha sido atribuido a dos sectores pequeños (en la Escama de Balsa Nueva, y al Oeste de la zona de Santa María) para poder restituir las evoluciones piezométricas, exageradas por el modelo con valores inferiores; en la casi totalidad de la zona de San Agustín y en el límite NE, las porosidades de calado son del 10%; todo el resto del acuífero está representado por valores del 15%.

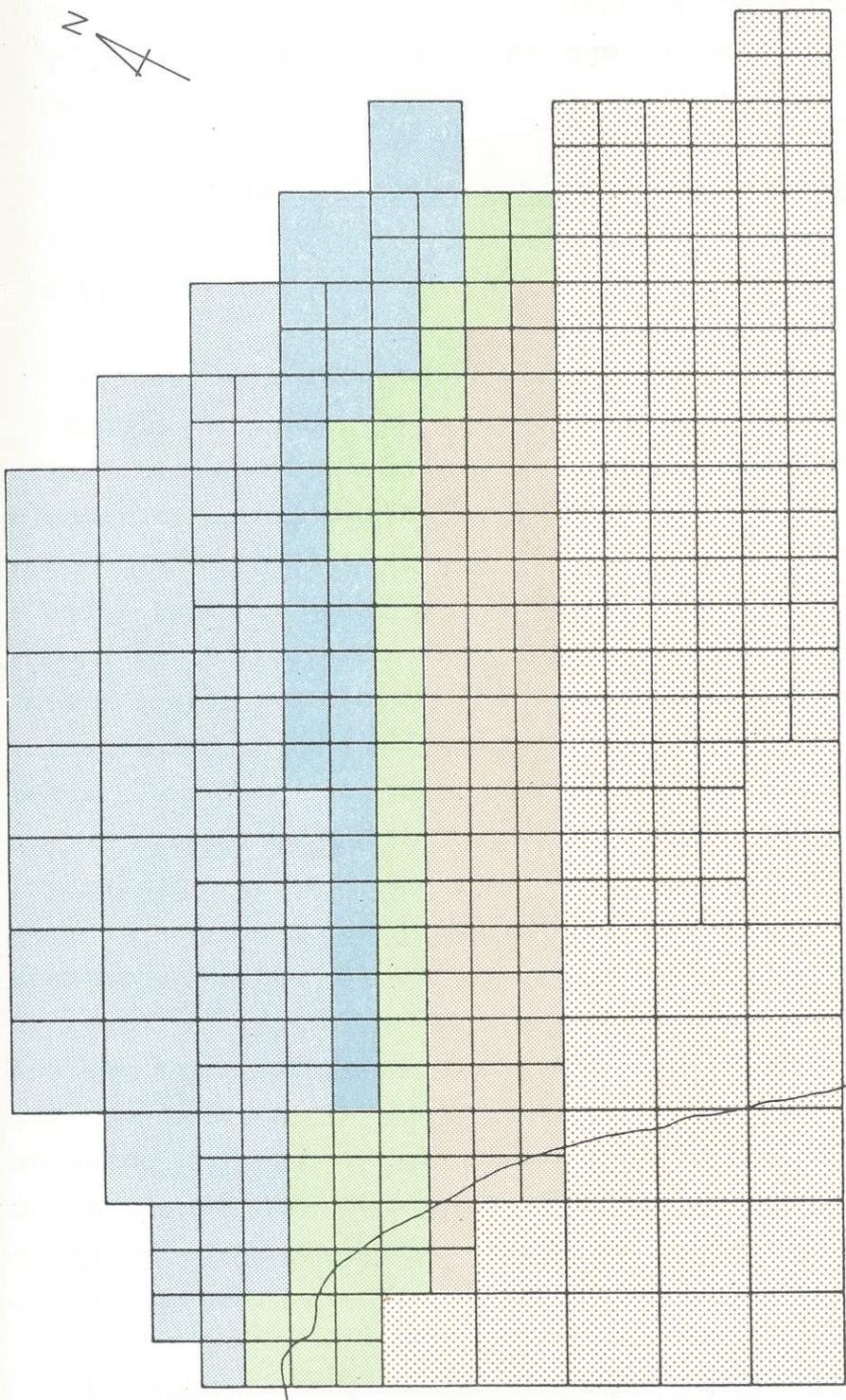
En el Acuífero inferior, eran mucho más abiertas las posibilidades, y éstas se han utilizado. La fuerte disminución de las transmisividades que se aplicó, en la zona de Los Alacranes, a la fila de mallas limítrofes para restituir las evoluciones piezométricas observadas en esta zona del Acuífero superior, se tradujo obviamente por un déficit de alimentación de la capa 2. Sus evoluciones piezométricas restituidas experimentaron una caída brutal, mientras que eran satisfactorias anteriormente (aunque por causa errónea). Por lo tanto, hubo que "buscar agua" para la capa 2, en sustitución de la que erróneamente, venía anteriormente de la zona de Los Alacranes. Gran parte de dicha agua se ha encontrado en las reservas, gracias al incremento no tanto de las porosidades en manto libre (cuyas magnitudes venían limitadas por el sentido común), sino más bien de los coeficientes de almacenamiento de la parte confinada; en efecto, el fuerte espesor de las dolomías en carga permitía admitir valores relativamente eleva



ACUIFERO SUPERIOR CENTRAL DEL CAMPO DE DALIAS  
(ALMERIA)

0 1 2 Km

Porosidades



ACUIFERO INFERIOR OCCIDENTAL DEL CAMPO DE DALIAS  
(ALMERIA)

- $12,5 \cdot 10^{-2}$
- $5 \cdot 10^{-2}$
- $15 \cdot 10^{-4}$
- $7,5 \cdot 10^{-4}$
- $2,5 \cdot 10^{-4}$

0 1 2 Km

Coefficientes de almacenamiento

dos. De hecho, se han manejado valores comprendidos entre  $2,5 \cdot 10^{-4}$  y  $1,5 \cdot 10^{-3}$ , con la repartición que viene indicada en la figura adjunta.

### 3.2.3.- Coefficientes característicos de los "drenes"

#### • Capa 2:

A pesar del incremento de los coeficientes de almacenamiento, seguía habiendo una cierta "deriva" en las evoluciones piezométricas, indicativa de una falta de alimentación. Por ello, se modificó la alimentación lateral procedente del sector noreste, haciéndola creciente con el tiempo en vez de constante. Se podía también haber incrementado el número de mallas de alimentación, atribuyendo este papel a todas las mallas limítrofes con el Sector noreste (en vez de las cinco consideradas), e incluso admitir una alimentación a partir del horst de Guardias Viejas. Debido a la gran transmisividad del acuífero dolomítico, no tiene una enorme importancia el hecho de concentrar la alimentación lateral en cinco mallas en lugar de, por ejemplo, diez. Si un día se intentó mejorar el actual modelo, se podría intentar aumentar el número de mallas de este tipo para repartir mejor la alimentación. Es posible incluso que esta modificación se haga indispensable cuando se modelice el Sector noreste. De momento, se ha preferido cargar todo el peso de la alimentación lateral en el sector en el que se tenía una cierta constancia de que existiera este fenómeno, es decir en las cinco mallas aludidas (núm. 7, 19, 64, 113, 163), que se ha convertido en drenes.

La cota de los drenes ha sido tomada igual a +9m, simplemente por ser este valor la media entre las cotas piezométricas del Aguila en 1975-76 (del orden de +12 m) y en 1983-84 (del

orden de +6 m). Para tener una idea del coeficiente de transferencia de los drenes (CTD), se partió de la idea que, en las últimas pasadas en permanente, se había conseguido un calado satisfactorio (con una piezometría a +3,2 m) con un caudal de alimentación total de 40 l/s, es decir 8 l/s por malla. Por lo tanto, llamando  $H'$  la cota piezométrica del Aguila y  $H$  la de la capa 2, se puede escribir.

$$(H'-H)CTD = Q$$

$$(9-3,2)CTD = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

de donde  $CTD = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (equivalente a  $5 \text{ m}^2/\text{h}$ )

Durante el calado, se tuvo que incrementar en una vez y media dicho coeficiente, que pasa entonces a  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Por otra parte, en el otro extremo del acuífero, es decir en la parte presente debajo del mar, se admitió la existencia de una cierta relación con el mar mediante mallas-dren, como ya se indicó en el párrafo 2.2. Dichas mallas (núm. 65, 89 y 114), se quedaron al final con un coeficiente de transferencia de  $4,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (equivalente a  $15 \text{ m}^2/\text{h}$ ); la cota es evidentemente la del mar.

• Capa 1:

Ya se ha hablado, en el párrafo 2.3, de los drenes colocados en el límite nor-este (es decir, con el Sector nor-este), y de los que se encuentran entre las zonas de Santa María y de San Agustín. Los valores de sus distintas características, determinados en el calado del modelo, son los siguientes:

En cuanto a los drenes del límite NE, se les ha atribuido un potencial (igual a la cota del rebosadero) variable entre +5

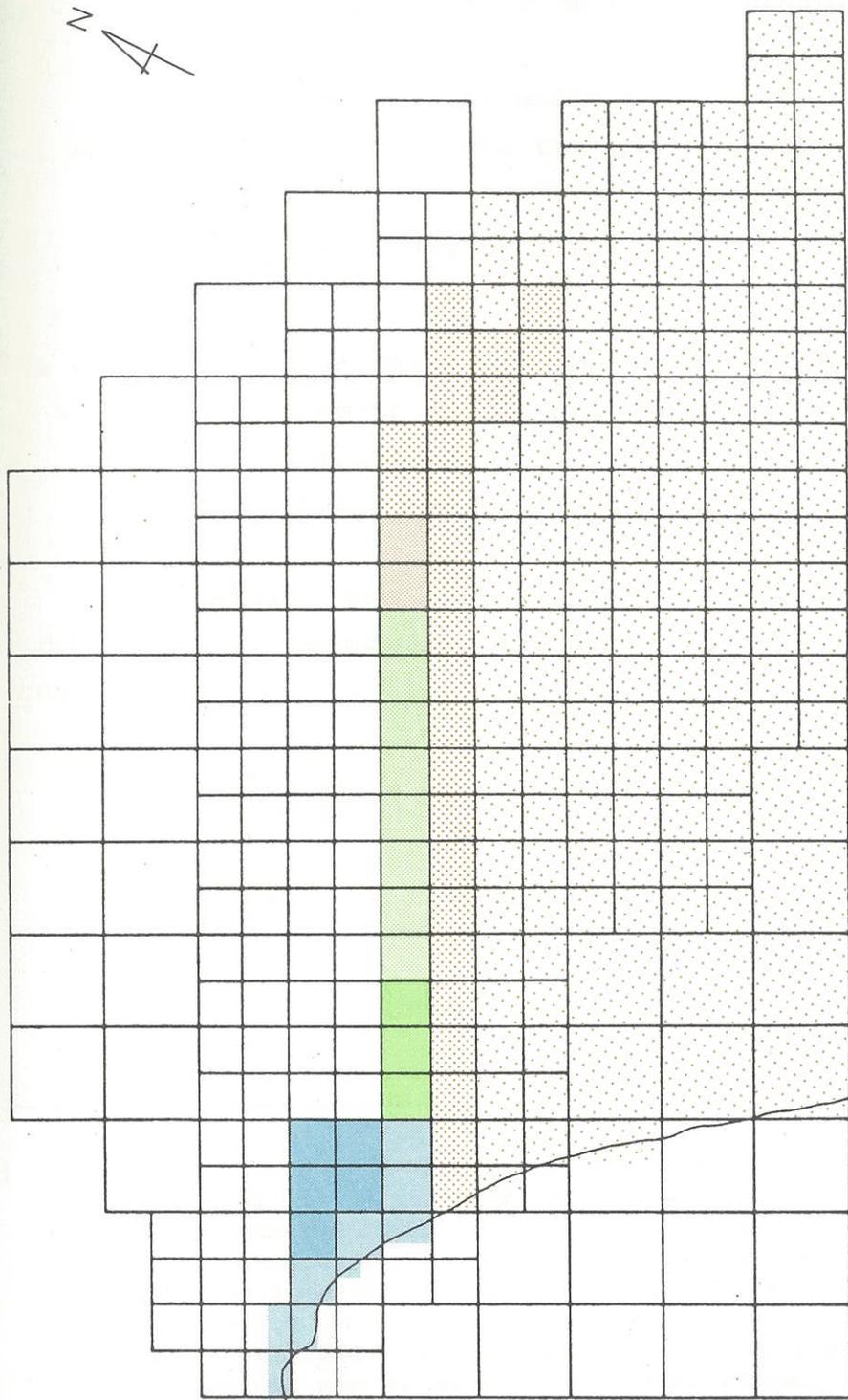
m y +18 m según la malla considerada. Se ha impuesto un caudal-límite nulo en el sentido contrario, para evitar que un caudal ficticio pudiese entrar al sistema. Por último, la modulación espacial del coeficiente de transferencia (entre 1,5 y 7,5  $m^2/h$ ) ha permitido traducir el distinto grado de rebosamiento hacia el Sector nor-este, tal y como aparece en la piezometría.

Con respecto a la barrera de transmisividad constituida por el subafloramiento de las margas grises entre Matagorda y La Mojonera, se ha atribuido a los drenes un potencial variable según el sitio, entre +16 m y +21 m, y un coeficiente de transferencia relativamente elevado (20  $m^2/h$ ) en la mayoría de las mallas.

#### 3.2.4.- Coeficientes de drenancia

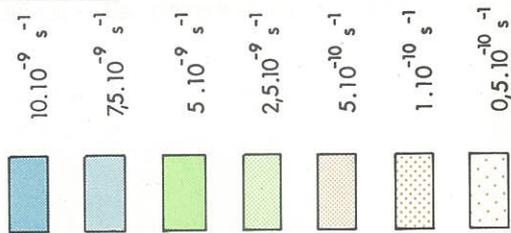
Han tenido que aplicarse a todo el sector en el que existía una superposición entre ambos acuíferos. En la práctica, se ha tenido que calar un coeficiente de drenancia para todas y cada una de las mallas de la capa 2 que estuviesen, total o parcialmente, recubiertas por la capa 1 mediante un semi-permeable constituido por las margas grises pliocenas (en la gran mayoría de las mallas) o por las filitas de la Escama del Balsa Nueva (debajo de ésta).

Los valores que resultaron del calado van desde  $5 \cdot 10^{-11}$  hasta  $1 \cdot 10^{-8} s^{-1}$ . Los más elevados corresponden a la Escama de Balsa Nueva (con 7,5 y  $10 \cdot 10^{-9} s^{-1}$ ), seguidos por la zona de "contacto" de la zona de Los Alacranes (con 2,5 y  $5 \cdot 10^{-9} s^{-1}$ ). Los valores de 1 y  $5 \cdot 10^{-10}$  corresponden a la fila de mallas de Los Alacranes siguiente a la anterior, así como a algunas mallas próximas a la población de Santa María, por las que se piensa que puede existir una débil intercomunicación vertical. Por último, el valor casi simbólico de  $0,5 \cdot 10^{-10} s^{-1}$  corresponde al resto de las mallas recubiertas por el Acuífero superior central.



ACUIFERO INFERIOR OCCIDENTAL DEL CAMPO DE DALIAS  
(ALMERIA)

Coefficientes de drenancia  $K'y/e'$



### 3.3.- EL MODELO DE PROPAGACION DE LA SALINIDAD

La propagación, en un medio poroso, de un cuerpo disuelto en el agua y que no interfiere con el medio obedece a la ecuación

$$\text{div } D (\text{grad } C) - \text{div } VC = m_c \frac{\partial C}{\partial t}$$

en la cual  $C$  = concentración del agua en cuerpo disuelto  
 $D$  = tensor de dispersión  
 $V$  = velocidad de Darcy (\*)  
 $m_c$  = porosidad cinemática (\*)

Si se admite que sólo interviene el fenómeno de convección (es decir, si se desprecia la dispersión), la ecuación precedente se reduce a

$$\text{div } VC + m_c \frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

Esta ecuación, en un flujo bidimensional, se escribe

$$e \frac{\partial}{\partial x} (VC) + e \frac{\partial}{\partial y} (VC) + \phi + e m_c \frac{\partial C}{\partial t} = 0$$

---

(\*) Se recuerda que la velocidad de Darcy, única que puede determinarse sin ambigüedad, es la velocidad ficticia que tendría el fluido si ocupara todo el volumen del medio poroso; sin embargo, el agua en movimiento no ocupa la totalidad del volumen disponible, ya que parte de este viene ocupada por agua inmovilizada (por interacción con los granos de roca, o por que se encuentra en "culos de saco"); por lo tanto, cabe hablar de una porosidad cinemática que, en lugar de ser la proporción del volumen de acuífero ocupada por el agua (= porosidad normal, o estática), es la proporción ocupada por el agua móvil; por lo tanto, la porosidad cinemática es inferior a la porosidad normal.

en la cual:

$e$  = espesor del acuífero

$\varphi$  = suma de los flujos de materia disuelta intercambiados con el exterior y con los mantos adyacentes, por unidad de superficie

El flujo del vector  $VC$  representa el caudal de materia a través de los límites del modelo. Por lo tanto, refleja a la vez una condición de flujo ( $V$ ), y una condición sobre la materia disuelta ( $C$ ). La condición de flujo está ya definida en el modelo de flujo. La condición sobre la materia disuelta se definirá al imponer un valor a la concentración  $C$  sobre algunas mallas del modelo.

La ecuación anterior, bastante análoga en su forma a la ecuación de difusividad, está también resuelta por el programa NEWSAM, por ejemplo para el caso concreto de una intrusión marina. Es importante señalar, sin embargo, que la simulación numérica del fenómeno no contempla, como ya se ha dicho, la dispersión, ni tampoco la forma del bisel salado puesto que no tiene en cuenta las densidades respectivas del agua de mar, del agua dulce, y de la zona de transición (se obtendrá, por lo tanto, curvas verticales de iso-valores de las concentraciones.

Para que el programa NEWSAM realice también los cálculos en concentración, basta con pedirlo, e introducir los datos necesarios que, además de los que utiliza el modelo de flujo, son los siguientes:

- cota del substrato de cada manto
- cota del techo de cada manto

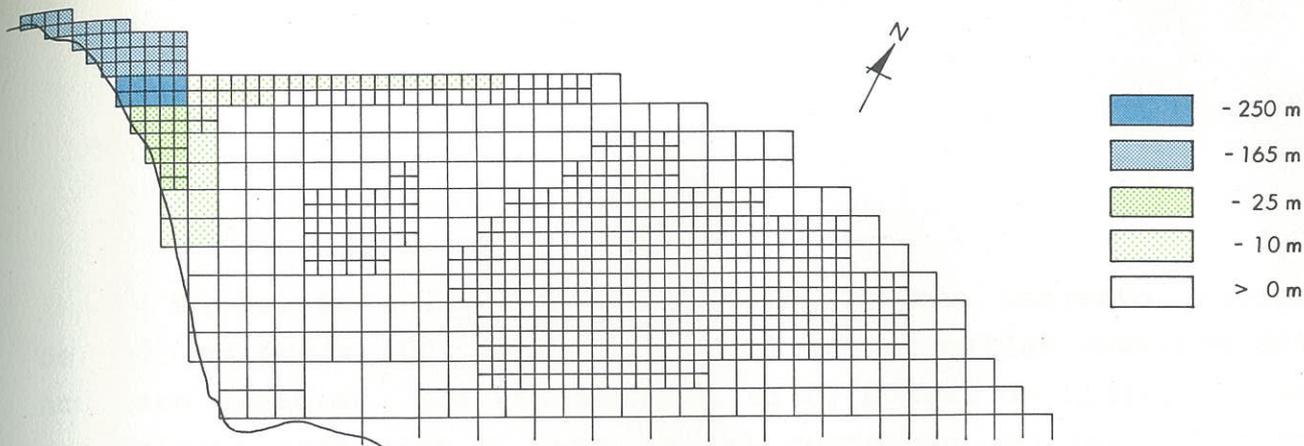
- concentraciones impuestas (equivalentes a los potenciales impuestos, en el modelo de flujo)
- concentraciones impuestas en los drenes (equivalentes a los potenciales impuestos en los drenes, en el modelo de flujo).

Se necesitan además las porosidades cinemáticas. Al desconocerse éstas, se utilizan las porosidades normales; al ser estas mayores que las cinemáticas, las concentraciones en todo punto del acuífero serán mayores que si se hubieran calculado con las porosidades cinemáticas, como lo indica la ecuación anterior. Las porosidades del acuífero superior ya habían sido caladas con el modelo de flujo. En cuanto a las del acuífero inferior, sólo habían sido caladas las correspondientes a la parte libre, siendo sustituidas por los coeficientes de almacenamiento en la parte confinada; para esta última, se utilizaron las porosidades caladas en la parte libre, es decir 5% para las dolomías y 12,5% para las calcarenitas.

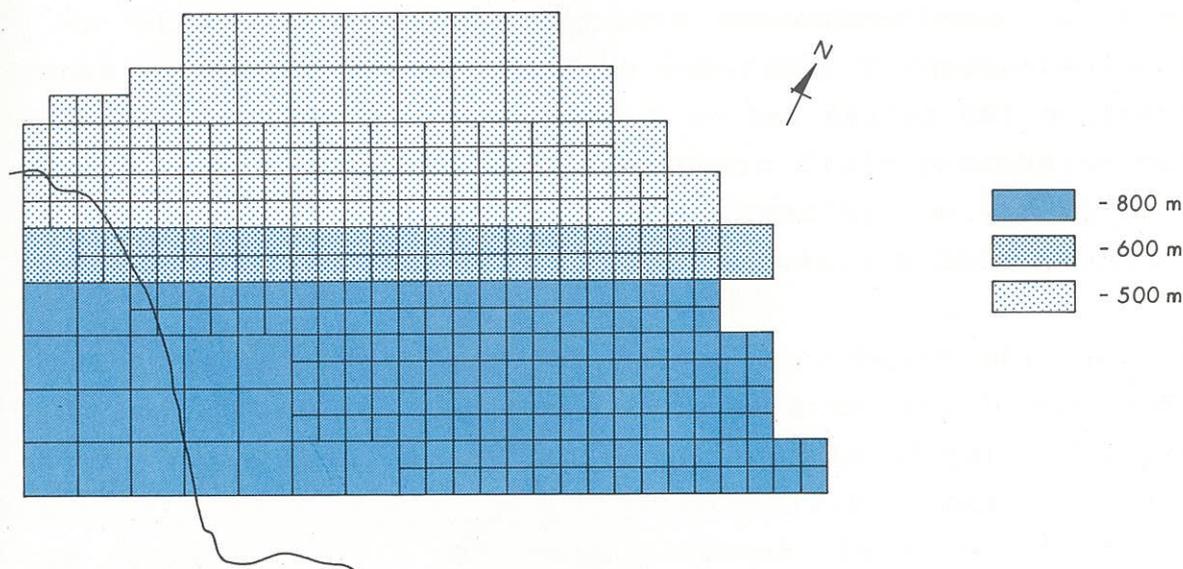
Debido a todo lo dicho anteriormente, el programa NEWSAM de concentraciones suministra un conocimiento solamente aproximado de la propagación de la intrusión marina.

Pero otro factor limitante, quizás más importante en el caso presente, es la imprecisión con la cual se conoce la mayor parte de los parámetros (en particular, los estructurales) necesarios para el uso del modelo de concentración.

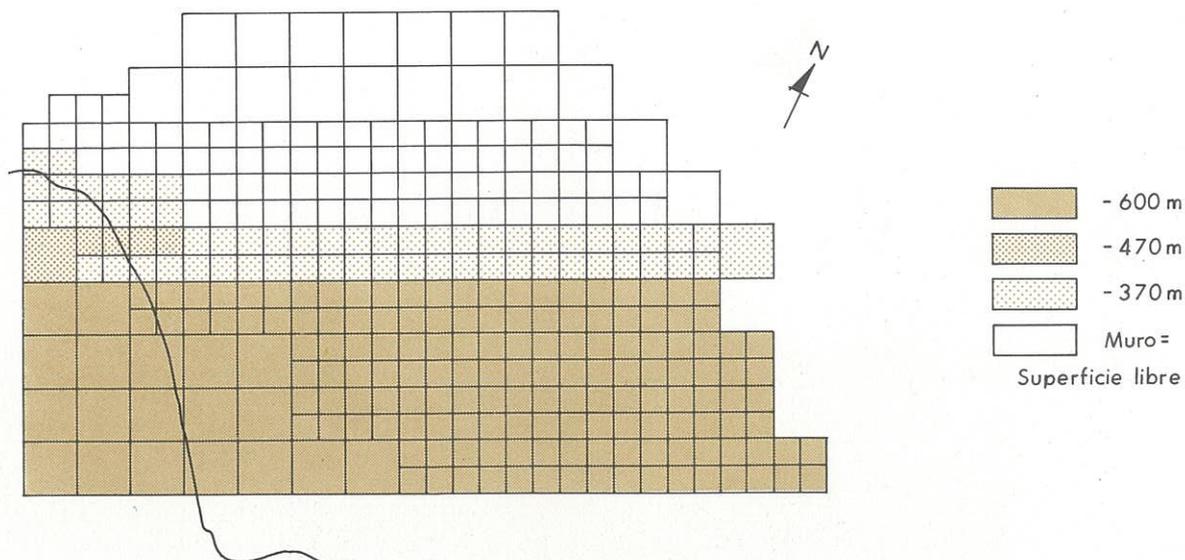
En la figura siguiente se reflejan, en tres mapas distintos, la cota supuesta del substrato de cada uno de los mantos, y la del techo del manto inferior. Estos datos han sido estimados a partir del conocimiento general de la estructura de la zona y de las columnas litológicas de los pocos sondeos del sector de Balanegra, y más especialmente el B-9, recién realizado.



Cota supuesta del substrato del Acuífero superior central



Cota supuesta del substrato del Acuífero inferior occidental



Cota supuesta del <sup>techo</sup> muro del Acuífero inferior occidental

En cuanto a las concentraciones, se han impuesto valores de 100 (es decir 100% de agua de mar) en las mallas costeras del Acuífero superior, que son las que, en el modelo de flujo, tenían potenciales impuestos a cero, y, al contrario valores nulos en las mallas en las que se había impuesto un potencial igual a +1 m.

Por otra parte, se han impuesto concentraciones nulas en los drenes existentes en el acuífero superior, y concentraciones de 100 (es decir 100% de agua de mar) en las mallas del acuífero inferior por las cuales existe un supuesto flujo procedente del mar a través del techo de dicho acuífero (mallas que, en el modelo de flujo, tienen un potencial de dren impuesto a la cota cero).

Los resultados del uso del modelo de concentraciones, es decir la restitución de la intrusión marina en septiembre 1984 (último mes de la fase de calado), se dan en la 3ª parte del presente informe ("Diseño y simulaciones ..."). En efecto, ha parecido que sería más fácil al lector disponer, en el mismo capítulo, del resultado de las simulaciones y del estado de partida. Para cada uno de los dos mantos, se dan curvas de 1, 10, ..., 90 que representan, respectivamente, el 1%, 10%, 25%, 50%, 75% y 90% de agua de mar.

#### 4.- "PROGRAMAS DE MANIOBRA", "PROGRAMAS AUXILIARES" Y FICHEROS

Para la ejecución del modelo matemático, ha sido necesario crear o utilizar más de cuarenta programas informáticos, y construir casi cuarenta ficheros.

Los primeros pueden desglosarse en "programas de maniobra", es decir de manipulación de datos, que han sido creados en el marco del modelo de Dalías y para su uso exclusivo, y "programas auxiliares" que ya habían sido creados con antelación (por la Escuela de Minas de París o por la E.N.ADARO) y que fueron utilizados en la modelización. Por otra parte, unos programas crean ficheros, y otros no.

En cuanto a estos últimos, cabe distinguir entre los ficheros de datos de base y los de resultados.

En las páginas siguientes, se pasará revista brevemente a los distintos programas y ficheros aludidos, y luego se describirán con algo más de detalle los principales programas utilizados o creados. Al final del sub-capítulo, varios organigramas permitirán explicar su forma de utilización.

## 4.1.- LISTA DE LOS PROGRAMAS Y FICHEROS

4.1.1.- Ficheros de base

|           |   |   |             |   |   |
|-----------|---|---|-------------|---|---|
| AGUADPLU: | pluviometrías diarias de Aguadulce, de Octubre 1974 a septiembre 1984 |   |             |   |   |
| ALMERPLU: | "   | " | Almería     | " | " |
| BALERPLU: | "   | " | Balerna     | " | " |
| FELIXPLU: | "   | " | Felix       | " | " |
| MOJONPLU: | "   | " | La Mojonera | " | " |
| ALMERTEM: | temperaturas  | " | Almería     | " | " |
| FELIXTEM: | "   | " | Felix       | " | " |

DOPIEZ: datos mensuales de la red de piezómetros. En la primera línea vienen:

- el Nº de inventario (ENADIMSA) (formato A6)
- el Nº de la capa (I6)
- el Nº de la malla (I6)
- la cota de referencia de las medidas (F6.2)
- un índice de fiabilidad (I6) de dos cifras:
  - 1ª cifra: 1 = no equipado; 2 = equipado
  - 2ª cifra: 1 = no | influenciabile por bombeos próximos
  - 2 = si |

En las líneas siguientes vienen (en formato F6.2) las profundidades hasta el agua, ordenadas de enero a diciembre, entre octubre 1975 y septiembre 1984.

DOPOM2: explotación (en  $10^3 \text{ m}^3$ ) mensual o media (según el caso), por sondeo o por malla (según el caso), entre octubre 1975 y septiembre 1984 (aunque ordenados de enero a diciembre). En un primer grupo vienen los datos mensuales de 190 sondeos controlados, seguidos por un segundo grupo de datos medios de 25 sondeos.

Para cada sondeo, la primera línea indica sucesivamente:

- el nº de inventario (ENADIMSA) (formato A11)
- el nº de la capa (I9):
  - capa 1 = captación del acuífero superior solamente
  - capa 2 = " " inferior "
  - capa 4 = " " " sin aislamien  
to del superior
- el nº de la malla (I10)
- índice de utilización (I10):
  - 1 = riego
  - 2 = abastecimiento urbano
  - 3 = mixto
- tipo de obra (I10)
  - 1 = sondeo
  - 2 = pozo-sondeo
  - 3 = pozo
  - 4 = desaparecido, enterrado, seco ..
- caudal de explotación en litros/segundo (I10)

(En las zonas costeras (en las cuales se trata de pozos muy próximos y de escaso caudal en general), los datos de explotación no se refieren a cada pozo, sino a cada malla en la cual haya bombeo; por ello aparecen solamente el nº de capa, el nº de malla y el índice de utilización)

En las filas siguientes se dan los volúmenes extraídos (formato F5.1). Para los 190 primeros sondeos (reales o sustituidos por mallas), se trata de los volúmenes extraídos cada mes de la serie de observación. Para los 25 "sondeos" siguientes (se trata realmente de mallas, en las cuales puede haber uno o varios pozos), la ausencia de control mensual (por la poca importancia de las explotaciones) ha obligado a poner datos mensuales de un año medio, que se supone se repiten todos los años.

DOPOM3: idem que DOPOM2, con la única diferencia de que algunas explotaciones en la capa 1 han sido modificadas mediante el programa DOPOMPGM.

#### 4.1.2.- Programas NEWSAM

PREPAXY y STEP1: fase de definición geométrica del modelo. Creación de los ficheros 10, 11 y DALIASXY.

STEP22: fase de calado en régimen permanente. Recoge la alimentación atmosférica en el fichero DALIAS.ALIPER, la explotación en DALIAS.POMPERM, la alimentación por riego en FDIRRIG, la saturación/desaturación en FDEMMAG, los resultados de la pasada anterior en PERM2 (o PERM) (es decir que PERM y PERM2 sirven alternativamente de ficheros de lectura y de escritura).

TRANSI: fase de calado en régimen transitorio. Recoge la alimentación atmosférica en DALIAS.ALITRAN, la explotación en DALIAS.POMTRAN, la alimentación por riego en FDIRRIG (los primeros 36 meses) o FDIRRIG2 (los 48 meses siguientes), los resultados del permanente en PERM2, así como las modificaciones introducidas en pantalla. Escribe los resultados de la pasada en RESUTRAN.

TRANSIC: idem TRANSI pero calcula además las concentraciones (transferencia de soluciones salinas) desde el principio del fenómeno de intrusión salina (tomado en octubre 1980). Recoge, además de los datos indicados para el programa TRANSI, los resultados del mismo almacenados en el fichero RESUTRAN. Crea el fichero RESUCON.

SIMULH: idem TRANSI, pero simula el período comprendido entre octubre 1984 y septiembre 1989, suponiendo una serie pluviométrica húmeda. Lee la alimentación atmosférica en FISIHUM, la explotación en POMSIM, la alimentación por riego en FDIRRIG2, los datos del permanente en PERM, y los resultados del transitorio en RESUTRAN. Crea el fichero de resultados RESUSIMH.

SIMULS: idem SIMULH, pero con una serie pluviométrica seca. Lee el fichero de alimentación atmosférica FISISEC (en vez de FISIHUM) y crea el fichero de resultados RESUSIMS (en vez de RESUSIMH).

SIMULHC: idem SIMULH pero, como TRANSIC, calcula además las concentraciones. Utiliza el fichero RESUCON (en vez de RESUTRAN utilizado por SIMULH) y crea el fichero de resultados RESUCONH (en vez de RESUSIMH).

SIMULSC: idem SIMULHC, pero con una serie pluviométrica seca. Lee el fichero de alimentación atmosférica FISISEC (en vez de FISIHUM), y crea el fichero de resultados RESUCONS (en vez de RESUCONH).

RECHARGE: idem SIMULHC y SIMULSC, pero añadiendo una recarga artificial en determinadas mallas. Si se quiere realizar la simulación con una serie pluviométrica húmeda, se lee el fichero FISIHUM, y se escribe sobre RESURECH; si la serie es seca, se lee FISISEC y se escribe sobre RESURECS.

#### 4.1.3.- Programas auxiliares

COMPAR: (programa creado por la E.N.S.M. de París, completado por la sub-rutina TRACII). Permite trazar sobre un mismo grá

fico las evoluciones calculadas y observadas de un mismo valor. Añadido a NEWSAM, permite trazar las evoluciones de los piezómetros elegidos.

**NONSAT:** (programa creado por la E.N.S.M. de París). Calcula la alimentación a través de la zona no saturada. Utiliza el concepto de depósitos de Nash, adaptado por M.Besbés. Para cada zona homogénea, se puede jugar sobre el número de depósitos, así como el plazo y el coeficiente de vaciado. Por consiguiente, la alimentación recibida en superficie viene lisada por la presencia de depósitos ficticios, de vaciado exponencial.

**THORD:** (programa creado por ENADIMSA con la colaboración de la E.N.S.M. París). Calcula y escribe la ETP, la ETR, la lluvia útil PU, la infiltración I y la escorrentía R mensuales, mediante la aplicación de las fórmulas de Thornthwaite (para la ETP) a precipitaciones y temperaturas diarias, de las del "modèle couplé" de Girard-Ledoux-Villeneuve (para ETR y PU) y de una fórmula empírica para I y R. Ha sido utilizado para el modelo del Campo de Dalías, con los nombres THORD1, THORD2, ..., THORD5 para calcular la infiltración y la escorrentía mensuales de cada una de las cinco áreas climáticas y crear así los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5, partiendo de los datos pluvio-termométricos diarios almacenados en los ficheros FELIXPLU, BALERPLU, MOJONPLU, FELIXTEM y ALMERTEM.

Además, escribe en pantalla o impresora, además de los parámetros utilizados,

|  |  |             |
|--|--|-------------|
| - la lluvia total leída para cada mes (mm)                         |  | para compro |
| "                  calculada                  "                  " |  | bación      |

- la temperatura media mensual leída para cada mes (°C)
  - la temperatura media mensual calculada para cada mes (°C)
- para comprobación
- para cada uno de los meses (mm)
    - las precipitaciones PLU
    - la ETP
    - la magnitud PLU - ETP
    - la ETR
    - la lluvia útil PU
    - la infiltración INF
    - la escorrentía RUI
    - el estado de la reserva RES
  - para los meses de octubre, ..., septiembre, los valores de PLU, PU e INF de cada año (mm).

#### 4.1.4.- Programas de "maniobra"

##### a) Con creación de fichero

PLUM2: Transforma las infiltraciones y escorrentías mensuales de las cinco áreas climáticas, en alimentaciones atmosféricas mensuales de cada una de las mallas del modelo, de octubre 1974 a septiembre 1984. A partir de los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5, crea los ficheros DALIAS.ALIPER (para el calado en permanente) y DALIAS.ALITRAN4 (para el calado en transitorio). Además, escribe en pantalla o impresora:

- para cada mes y cada área climática (en mm):
  - precipitaciones
  - lluvia útil

infiltración  
 escorrentía superficial

- para cada manto (capa 1 y capa 2), la alimentación atmosférica de cada mes y cada año en  $\text{hm}^3$
- la alimentación media anual de cada capa (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) entre los años a y a' a definir.

**SIMHUM:** parte del fichero DALIAS.ALITRAN4, donde están ordenados, mes a mes entre octubre 1974 y septiembre 1984, la alimentación de cada malla. Crea un fichero FISIHUM en el cual se almacenan las alimentaciones correspondientes a los cinco años más húmedos de la serie (1974-75, 1975-76, 1976-77, 1978-79, 1983-84)

**SIMSEC:** idem SIMHUM, pero crea un fichero FISISEC correspondiente a los años más secos de la serie (1977-78, 1979-80, 1980-81, 1981-82, 1982-83).

**EMMA:** determina los caudales de saturación/desaturación necesarios para tener en cuenta las relaciones entre manto y reservas, en capa 1, en el calado en permanente: calcula la "densidad de caudal inyectado" (código B de NEWSAM) sobre cada malla interesada, al multiplicar la porosidad por el descenso (o la subida) piezométrico medio observado entre octubre 1975 y septiembre 1977. Crea el fichero FDEMMAG. Además, escribe para cada malla el caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) que le corresponde, bien sea negativo (aportación a partir de las reservas, es decir desaturación de estas últimas), o bien positivo (salida hacia las reservas, es decir constitución de las mismas), o nulo (sin alteración de las reservas).

**PIRRIG:** determina, para cada malla interesada, el caudal de

alimentación que recibe por infiltración de excedentes de riego. La eficiencia del regadío y las superficies regadas corresponden al período 1975-76/1978-79. Crea el fichero FDIRRIG.

PIRRIG2: idem PIRRIG, pero con una eficiencia del regadío y unas superficies regadas correspondientes al período 1979-80/1983-84. Crea el fichero FDIRRIG2.

DOPOMPGM: modifica ligeramente (en algunas mallas de la capa 1) los datos del fichero de base DOPOM2 (explotación por bombeo) y lo transforma en el fichero de base DOPOM3.

POMPERG: transforma el fichero de base DOPOM3 en el fichero DALIAS.POMPERM (leible por NEWSAM), en el cual vienen las explotaciones medias de cada malla durante el período del calado en permanente (1975-76/1976-77).

POMTRPGM: transforma el fichero de base DOPOM3 en el fichero DALIAS.POMTRAN (leible por NEWSAM), en el cual vienen las explotaciones mensuales de cada malla durante el período de calado en transitorio (1977-78/1983-84).

PROBIMAI: calcula para cada malla los caudales medios ( $10^3 \text{ m}^3$  /mes, para el período 1982-83/1983-84) correspondientes a la alimentación A (= lluvia útil + excedentes de riego), al bombeo B, y al balance DEL = A-B. Utiliza los ficheros DALIAS.ALITRAN, FDIRRIG2 y DALIAS.POMTRAN y crea el fichero FIBIMAI. Además, escribe en pantalla o impresora, para cada una de las mallas del modelo (794 de la capa 1, y 330 de la capa 2), el número de la malla (entre paréntesis) y, sucesivamente, los caudales A, B, y DEL.

b) Sin creación de fichero

ALIM: calcula y escribe, a partir de los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5, las alimentaciones mensuales y anuales (de 1974-75 a 1983-84) de cada una de las dos capas (y de cada zona de la capa 1), así como del mar, de la cuenca del Adra y del Sector NE, dentro de los límites de la cuenca de alimentación considerada. Facilita también, para cada mes y año, la alimentación total (= lluvia útil) de dicha cuenca, las precipitaciones que recibe, y el porcentaje de la alimentación con respecto a las precipitaciones.

ALPUMAI: calcula y escribe, a partir del fichero DALIAS.ALITRAN, los caudales de alimentación atmosférica (en litros/segundo) que ha recibido cada malla como promedio del período 1975-76/1983-84.

PALPUMAI: idem ALPUMAI, pero para el período 1975-76/1976-77 (calado en permanente). Utiliza el fichero DALIAS.ALIPER.

TRAPPU: escribe y traza las alimentaciones atmosféricas mensuales (lluvias útiles) desde octubre 1977 hasta febrero 1984, utiliza el fichero DALIAS.ALITRAN.

POMENPGM: calcula y escribe los bombeos mensuales de la capa 1, de la capa 2, y de la suma C1+C2, desde octubre 1977 hasta septiembre 1984. Parte del fichero DALIAS.POMTRAN

PROPOMP: calcula y escribe los bombeos anuales de la capa 1, de la capa 2, y de una "capa 4" (que corresponde a la explotación de la capa 2, pero sin aislamiento de la capa 1 superyacente; en la práctica, el programa inclu

ye en la capa 2 todo lo que no se refiere a la capa 1), para el período 1975-76/1983-84. Parte del fichero DOPOM3.

TRADEB: escribe y traza los caudales mensuales de bombeo (desde octubre 1977 hasta septiembre 1984) en cada una de las dos capas. Utiliza el fichero DALIAS.POMTRAN.

DEBEBN: derivado de TRADEB, pero referido solamente a la Escama de Balsa Nueva.

DEBMARIA: idem, para la zona de Santa María (capa 1).

DEBNAYAR: idem, para la zona de Onayar (capa 1).

DEBPAMPA: idem, para la zona del Pampanico (capa 2).

DEBPROFO: idem, para la zona profunda (capa 2).

DEBTARAM: idem, para la zona de Tarambana (capa 2)

DEBTOMIL: idem, para la zona del Tomillar (capa 2)

TRAPIEZ: traza la evolución de los piezómetros, a partir del fichero DOPIEZ.

TRANSIBI: derivado de TRANSI (modelo de flujo NEWSAM en transitorio), permite sacar mapas de alimentación ( $10^3 \text{ m}^3$ ), de bombeo ( $10^3 \text{ m}^3$ ), y de la diferencia (o balance) entre ambos ( $10^4 \text{ m}^3$ ) para cada una de las dos capas, para el período 1982-83/1983-84. Utiliza esencialmente el fichero FIBIMAI.

TRANLIS: derivado de TRANSI, para sacar solamente una parte del listado de los resultados.

#### 4.1.5.- Ficheros de resultados

BILHY1: Precipitaciones, infiltraciones y escorrentias mensuales (1974-75/1983-84) de la zona climática 1 ("alta" montaña), calculadas mediante el programa THORD1 a partir de los ficheros de datos FELIXPLU y FELIXTEM.

BILHY2: idem, para la zona climática 2 ("mediana" montaña). Programa THORD2 a partir de los ficheros FELIXPLU y FELIXTEM.

BILHY3: idem, para la zona climática 3 ("baja" montaña). Programa THORD3 a partir de los ficheros FELIXPLU, FELIXTEM y ALMERTEM.

BILHY4: idem, para la zona climática 4 (NW del Campo). Programa THORD4 a partir de los ficheros BALERPLU y ALMERTEM.

BILHY5: idem, para la zona climática 5 (SE del Campo). Programa THORD5 a partir de los ficheros MOJONPLU y ALMERTEM.

DALIAS.ALIPER: alimentaciones atmosféricas en permanente, es decir alimentaciones medias de cada malla ( $m^3/s$ ) correspondientes al período 1975-76/1976-77. Calculadas por el programa PLUM2 a partir de los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5.

DALIAS.ALITRAN4: alimentaciones atmosféricas en transitorio, es decir alimentaciones mensuales de cada malla ( $m^3/s$ ) entre octubre 1974 y septiembre 1984. Calculadas por el programa PLUM2 a partir de los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5.

FISIHUM: alimentaciones atmosféricas mensuales de cada malla ( $m^3/s$ ) de cinco años húmedos, para simulación "húmeda" del período 1984-85/1988-89. Seleccionadas por el programa SIMHUM.

FISISEC: idem, pero para cinco años secos. Seleccionadas por el programa SIMSEC.

FDEMMAG: caudales medios de saturación/desaturación durante el período de calado en permanente (octubre 1975 a septiembre 1977), para las mallas interesadas. Calculados por el programa EMMA.

FDIRRIG: caudales de infiltración de excedentes de riego, supuestos constantes entre octubre 1975 y septiembre 1979, y calculados malla por malla por el programa PIRRIG.

FDRRIG2: idem, entre octubre 1979 y septiembre 1984, calculados por el programa PIRRIG2.

FIBIMAI: balances medios malla por malla, para el período 1982-83/1983-84, es decir alimentaciones A (=lluvia útil y riegos), bombeos B, y diferencias A-B. Calculados por el programa PROBIMAI a partir de los ficheros DALIAS.ALITRAN, FDIRRIG2 y DALIAS.POMTRAN.

DALIAS.POMPERM: bombeos en permanente, es decir explotaciones medias de cada malla ( $m^3/s$ ) correspondientes al período 1975-76/1976-77. Calculadas por el programa POMPERPG a partir del fichero DOPOM3.

POMSIM: bombeos mensuales para simulación, es decir explotación mensual en cada malla, supuesta congelada a su nivel del año 1983-84 (último año del calado).

PERM, PERM2: ficheros de entrada/salida de los resultados del calado en permanente: lectura en PERM de los resultados de la pasada anterior, y escritura en PERM2 de los de pasada en curso. Y viceversa. Creados por el programa STEP22 a partir de todos los ficheros necesarios.

RESUCON: resultados del calado en transitorio con la opción "concentración" del NEWSAM, es decir potenciales y concentraciones restituidos para el mes de septiembre 1984.

RESUSIMH: potenciales de las mallas durante los 5 años de simulación (1984-85/1988-89) en la hipótesis "húmeda". Calculados por el programa SIMULH (análogo al programa TRANSI) a partir de los ficheros FISIHUM, RESUTRAN, y todos los necesarios.

RESUSIMS: idem, en la hipótesis "seca". Calculados por el programa SIMULS a partir del fichero FISISEC y otros.

RESUCONH: idem RESUSIMH (hipótesis "húmeda") pero con, además, las concentraciones calculadas por el programa SIMULHC (análogo al programa TRANSIC) a partir de los ficheros FISIHUM, RESUCON y otros.

RESUCONS: idem RESUCONH, pero en la hipótesis "seca". Calculados por SIMULSC a partir de los ficheros FISISEC, RESUCON y otros.

RESURECH: potenciales y concentraciones de las mallas durante los 5 años de simulación, con las mismas condiciones que en RESUCONH pero con, además, una recarga artificial de 25 l/s en la Escama de Balsa Nueva (malla 17) y de 175 l/s en la capa 2 (25 l/s en la malla 47, y

150 l/s en la malla 56). Calculados por el programa RECHARGE (análogo a TRANSIC) a partir del fichero FISIHUM y otros.

RESURECS: idem, pero con hipótesis "seca". Calculados por el programa RECHARGE a partir del fichero FISISEC y otros.

RESUPTE: potenciales calculados durante las simulaciones, en seis "piezómetros":

|    |          |          |          |   |
|----|----------|----------|----------|---|
| 1: | malla 70 | (capa 2) |          |   |
| 2: | "        | 173      | "        | " |
| 3: | "        | 56       | "        | " |
| 4: | "        | 108      | "        | " |
| 5: | "        | 23       | (capa 1) |   |
| 6: | "        | 198      | "        | " |

Fichero provisional

#### 4.2.- EL "MODELO DE ALIMENTACION ATMOSFERICA"

##### 4.2.1.- Principio

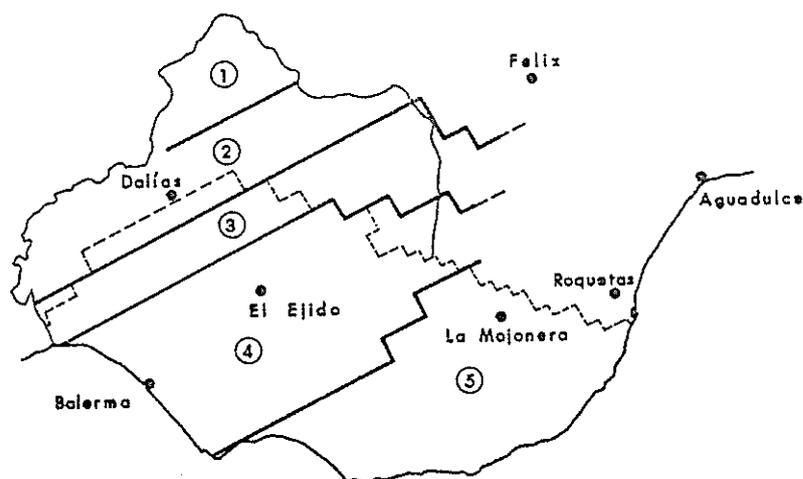
Consta de dos programas puestos en serie:

- el primero calcula la lluvia útil, la infiltración y la escorrentía superficial a partir del método de Thornthwaite
- el segundo atribuye a cada malla de cada acuífero la alimentación que le corresponde.

En la primera versión, se calculaba la lluvia útil, infiltración y escorrentía diarias para dos estaciones-piloto (Felix para la sierra, y Almería para la llanura), únicas que eran no solamente pluviométricas sino también termométricas.

A continuación y mediante relaciones estadísticas simples, se transformaba las precipitaciones brutas de otras estaciones (solamente pluviométricas) en lluvias útiles, infiltraciones y escorrentías. Dicha versión, que no era sino la forma mejorada e informatizada del método utilizado en el informe de síntesis anterior ("Estudio hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería)", IGME, diciembre de 1982), fue abandonada.

En la segunda versión, se calcula la lluvia útil, la infiltración y la escorrentía para cada una de las cinco áreas climáticas en las que ha sido dividida la comarca (tres en la Sierra de Gádor, y dos en el Campo de Dalías). Para ello, se ha tenido que partir de series termométricas generadas linealmente a partir de las de Felix (sierra) y de Almería (llanura); las precipitaciones, asimismo, de cada área han sido generadas mediante una relación lineal con las de las estaciones adecuadas.



Llamando  $P$  a las precipitaciones y  $T$  a las temperaturas, ambas diarias, y sabiendo que los índices  $F$ ,  $A$ ,  $B$  y  $M$  corresponden respectivamente a las estaciones de Felix, Almería, Balerma y La Mojonera, se ha admitido que

$$\begin{array}{l} P = 1,1 P_F \\ T = 0,9 T_F - 2 \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{área climática 1} \\ \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} P = P_F \\ T = T_F \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{área 2} \\ \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} P = 0,8 P_F \\ T = \frac{T_F + T_A}{2} \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{área 3} \\ \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} P = 1,1 P_B \\ T = 0,8 T_A - 2 \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{área 4} \\ \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} P = 0,9 P_M \\ T = T_A \end{array} \left| \begin{array}{l} \text{área 5} \\ \end{array} \right.$$

Por lo tanto, se utiliza cinco veces el mismo programa, llamado THORD (de "Thonthwaite diario") y que se explicará más en adelante. A partir de las cinco series diarias de pluviometría y temperatura, este programa THORD calcula la lluvia útil, infiltración y escorrentía diarias, que luego suma en valores mensuales. Dichos valores son recogidos en cinco ficheros BILHY ("bilans hydriques", es decir balances hídricos). Más concretamente, cada uno de estos cinco ficheros contiene, para cada uno de los meses N entre octubre de 1974 a septiembre de 1984, un valor de la infiltración XINFI y de la escorrentía RUIS (siendo la lluvia útil PU la suma de los dos términos precedentes). Es, por lo tanto, muy fácil acceder a cualquiera de estos términos, siempre que se lo indique por el área climática J y el mes N; por ejemplo XINFI (4,8) definirá la infiltración en el área climática 4 para el mes de mayo del año en el que se está trabajando.

El programa siguiente, llamado PLUM2 (de Pluviometría útil mensual), transforma estos datos de base en alimentación mensual de cada malla. Dicho programa será explicado más adelante.

#### 4.2.2.- El programa THORD(\*)

Este programa determina la lluvia útil, la infiltración y la escorrentía superficial diarias, a partir de las precipitaciones y temperaturas también diarias, y mediante las fórmulas de Thornthwaite. La modificación de dichas fórmulas para hacerlas aplicables a un paso de tiempo diario en vez de mensual, así como la repartición de la lluvia útil entre infiltración y escorrentía superficial, están inspiradas del programa THORDIA (G.López Arechavala, 1982). Sin embargo, el cálculo de la lluvia útil, una vez conocidas las precipitaciones y la evapotranspiración potencial, se realiza de un modo distinto.

Los pasos que da el programa son los siguientes:

- cálculo de la evapotranspiración potencial ETP
- cálculo de la lluvia útil Pu
- repartición de Pu entre infiltración I y escorrentía E.

#### • Cálculo de la ETP

Para determinar la ETP de un mes, la fórmula de Thornthwaite utiliza un "índice de calor" anual  $I_a$ , suma de los doce índices mensuales  $I_m$ .

$$I_a = \sum_{1}^{12} I_m \quad (1)$$

---

(\*) J.P.Thauvin (1985)

$$\text{con } I_m = 0,0874 \cdot t_m^{1,514} \quad (2)$$

siendo  $t_m$  la temperatura media del mes considerado

Se calcula después un coeficiente A, dado por

$$A = 0,675 \cdot 10^{-6} I_a^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I_a^2 + 179,2 \cdot 10^{-4} I_a + 492,39 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Se puede entonces calcular la ETP del mes (en mm), mediante:

$$ETP = 16 \left( \frac{10 t_m}{I_a} \right)^A \frac{F}{30} \quad (4)$$

El coeficiente corrector  $F(*)$ , mayor o menor de 30 según el mes considerado, tiene en cuenta el número de días del mes y la insolación astronómica (es decir, el número de horas de sol que corresponde a la latitud del lugar considerado).

La adaptación a un paso de tiempo diario consiste en considerar esta vez la temperatura media  $t$  de cada uno de los  $n$  días del mes considerado, y modificar las fórmulas anteriores como sigue:

$$I_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_d \quad (2')$$

donde el índice de calor diario  $I_d$  viene dado por

$$I_d = 0,0874 \cdot t^{1,514} \quad (2'')$$

---

(\*) Para la latitud de Almería, los valores de F son los siguientes:

|           |      |         |      |       |      |            |      |
|-----------|------|---------|------|-------|------|------------|------|
| octubre   | 29,1 | enero   | 25,8 | abril | 33,0 | julio      | 37,5 |
| noviembre | 25,5 | febrero | 25,5 | mayo  | 36,6 | agosto     | 35,1 |
| diciembre | 24,9 | marzo   | 30,9 | junio | 36,9 | septiembre | 30,9 |

Las ecuaciones (1) y (3) permaneciendo sin cambio, se calcula la ETP del día por:

$$ETP = 16 \left( \frac{10t}{I_a} \right)^A \frac{F}{30n} \quad (4')$$

Con respecto a las fórmulas originales de Thornthwaite, esta adaptación equivale a admitir que

$$\frac{\sum_1^n a^x}{n} = \frac{\left( \sum_1^n a \right)^x}{n}$$

lo que es lícito al ser poco diferentes las variables  $a$ , es decir las temperaturas diarias de un mismo mes.

• Cálculo de la lluvia útil  $P_u$

El método clásico de Thornthwaite contempla un "depósito-suelo", que se llena por las precipitaciones útiles, hasta un valor máximo llamado RUM (de "reserva útil máxima"), y que "suelta" lluvia útil sólo cuando se ha alcanzado el valor RUM. En la práctica, se trata de un depósito con rebosadero: sólo hay lluvia útil cuando rebosa el depósito, es decir cuando la reserva útil llega a su valor máximo RUM; es un modelo muy rígido próximo al "todo o nada", puesto que no hay lluvia útil mientras no está lleno el depósito pero que, cuando se alcanza el valor RUM, toda la lluvia (disminuída de la evapotranspiración, claro) se vuelve útil.

El modelo utilizado en el estudio es mucho más flexible, en el sentido de que suministra la lluvia útil de forma más continuada (por su mismo principio), y más modulada a las

condiciones del terreno, por disponerse de dos parámetros (en lugar del único RUM) llamados CRT (de "capacidad de retención teórica") y DCRT.

Por otra parte, cabe una alternativa sobre el orden en el que actúan los distintos fenómenos:

- o bien la evapotranspiración actúa sobre las precipitaciones antes de que llenen el depósito-suelo; es el fenómeno que actuaría predominantemente sobre un suelo muy poco permeable pero abundante cobertura vegetal
- o bien la evapotranspiración actúa sobre el depósito-suelo, ya llenado por las precipitaciones; este fenómeno representaría más bien lo que ocurre con un suelo permeable con escasa cobertura vegetal.

Se ha elegido aquí la segunda hipótesis, que representa mejor las condiciones locales, y que da algo más de lluvia útil al sistema.

Con estas premisas, el principio del modelo puede resumirse como sigue:

El agua del depósito-suelo, para un día considerado, es la suma del remanente del día anterior, y de las precipitaciones brutas del día.

Dicha agua va a tener tres destinos distintos:

- Una parte es "improductiva", en el sentido de que no la puede movilizar la gravedad, sino solamente la eva

potranspiración; su valor máximo se llama DCRT. Puesto que el llenado correspondiente es el primero en producirse cuando está vacío el depósito, este parámetro interviene sobre todo al principio de cada período húmedo, cuando el "suelo" está prácticamente seco. Atribuirle un valor alto equivale a reducir sensiblemente (e incluso anular) la rentabilidad de las primeras lluvias. Puede concebirse que un sistema a DCRT alto pudiera representar, por ejemplo, un terreno con cobertura vegetal densa, donde gran parte de las precipitaciones se queda retenida por el follaje donde se evapotranspira; por el contrario, un sistema a DCRT nulo podría representar un terreno sin vegetación apreciable y con una bastante buena permeabilidad vertical.

- Una segunda parte del agua se queda en el depósito, para ser utilizada a partir del día siguiente.

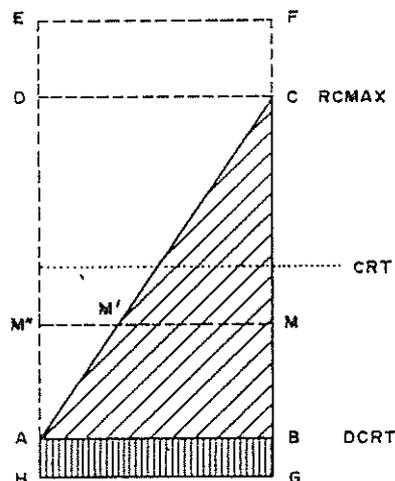
El valor máximo que puede alcanzar la suma de las dos partes que ya se han visto se llama RCMAX. El parámetro CRT representa el llenado medio del depósito, es decir:

$$CRT = \frac{RCMAX + DCRT}{2}$$

- Por último, una tercera parte del agua abandona el depósito el mismo día; su importancia varía linealmente con el llenado del depósito.

El sistema se puede reproducir gráficamente:

- el rectángulo inferior (trama vertical) representa el agua inmovilizada; su valor máximo es DCRT
- el triángulo de la derecha (trama inclinada) representa el agua almacenada para más tarde
- el triángulo de la izquierda y el rectángulo superior (sin trama) representan al contrario el agua disponible en el mismo día.



Sea  $R$  el estado de la reserva (remanente del día anterior, más precipitaciones del día).

- si  $R < DCRT$ , no hay lluvia útil, puesto que todo el agua se dedica a la constitución de la reserva inmovilizable.
- si  $R > RCMAX$ , la cantidad DCRT se queda inmovilizada, como se ha indicado; otra cantidad, igual a la superficie del triángulo ABC, se quedará retenida hasta el día siguiente; por último, el resto (es decir la cantidad igual a la superficie del triángulo ACD y del rectángulo CDEF) será disponible inmediatamente y constituirá la lluvia útil del día.

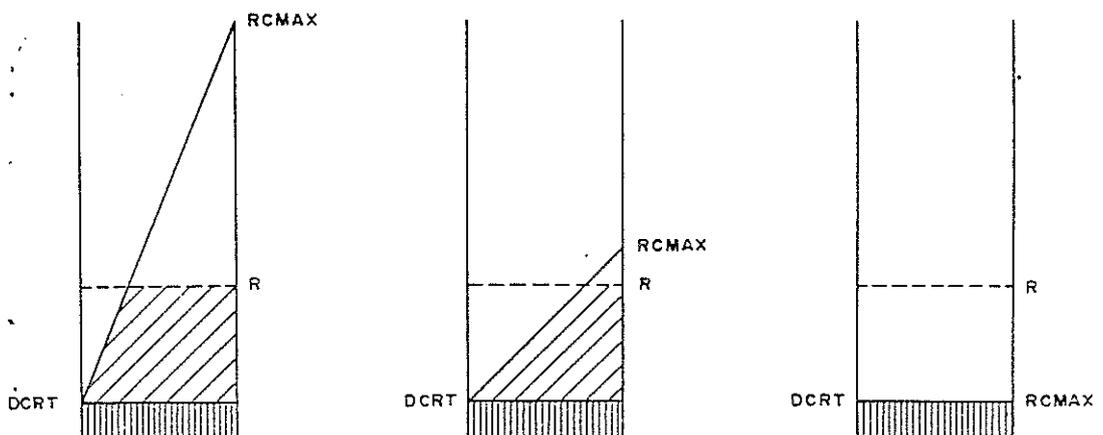
- si  $DCRT < R \leq RCMAX$

(por ejemplo, un valor representado por el punto M), la parte DCRT queda inmovilizada como siempre, una cantidad igual a la superficie del trapecio ABMM' queda retenida hasta el día siguiente, y la última cantidad, igual a la superficie del triángulo AM'M", constituye la lluvia útil del día.

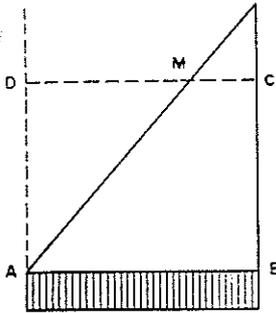
Las superficies de los distintos rectángulos, triángulos y trapecios pueden calcularse fácilmente, tomando la anchura AB igual a la unidad, y utilizando las relaciones de los triángulos semejantes.

Los casos siguientes, en los que se admite que el depósito se llena hasta un valor R, demuestran la flexibilidad del sistema.

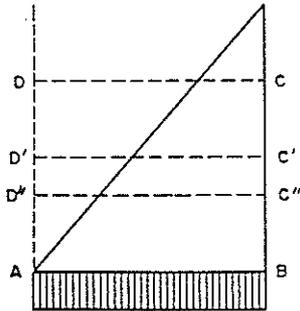
- si se eligen DCRT y RCMAX muy diferentes (recta AC correspondiente fuerte), la mayor parte del agua se queda para el día siguiente (trapecio tramado) y la lluvia útil del día es escasa (triángulo sin tramas)
- si DCRT y RCMAX son más próximos, la lluvia útil del día es más importante
- al límite, igualar DCRT y RCMAX equivale a utilizar un modelo clásico a  $RUM = DCRT = RCMAX$ : una vez alcanzado el valor máximo RUM, todo el agua es liberada el mismo día.



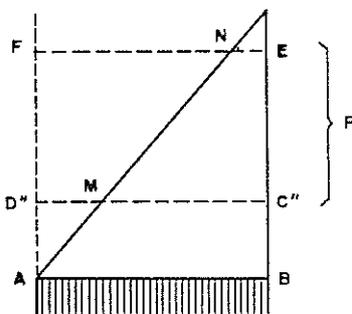
Veamos ahora como funciona el modelo en varios días sucesivos. Supongamos que la reserva es nula al principio.



Las primeras lluvias sirven para llenar la reserva no movilizable (hasta el valor DCRT), y empiezan (si son suficientes) a llenar la reserva móvil, cuyo valor es igual a la superficie del rectángulo ABCD. Dicha reserva movilizable se divide en una parte (igual a la superficie del triángulo ADM) que sale enseguida y constituye la lluvia útil del día, y otra parte (igual a la superficie del trapecio ABCM) que se queda en el depósito.



Sobre esta última cantidad, equivalente a la superficie del rectángulo ABC'D', actúa la evapotranspiración. La reserva remanente corresponde a la superficie del rectángulo ABC''D''.



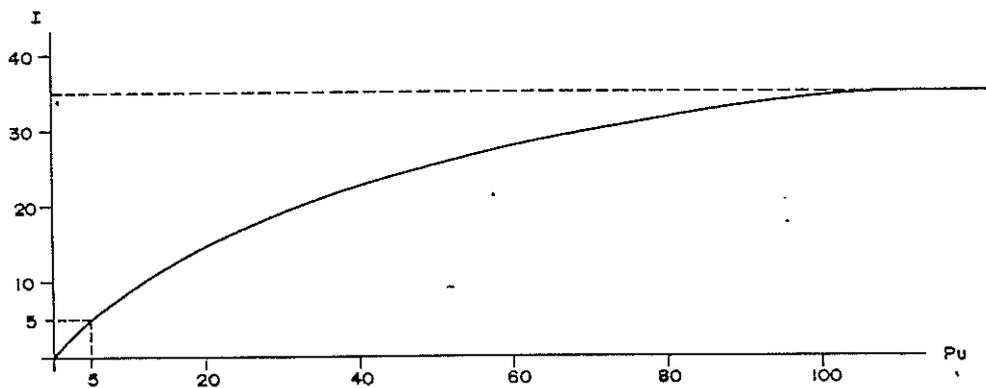
Admitamos que, el día siguiente, llueva una cantidad P. La variación de reserva DR es, por lo tanto, igual a P. La lluvia útil del día es igual a la superficie del trapecio D''MNF. Se queda en el depósito una cantidad igual a la superficie del trapecio MC''EN; disminuida de la evapotranspiración del día, formará la reserva remanente para el día siguiente.

Y así sucesivamente.

• Repartición de  $P_u$  entre infiltración  $I$  y escorrentía  $E$

. Se realiza mediante una función que relaciona  $I$  y  $P_u$ , sacándose a continuación la escorrentía por diferencia ( $E = P_u - I$ ). Dicha función no es sacada de ningún libro, ni se apoya en medidas concretas; sólo es el punto de la experiencia propia y ajena.

Para determinarla, se había admitido que, para una  $P_u$  igual o inferior a 5 mm/día, todo el agua se infiltra; al contrario, cuando  $P_u$  es superior a 105 mm/día, todo el excedente pasa a escorrentía; para valores intermedios, el cociente  $I/P_u$  va decreciendo paulatinamente, de la forma indicada en la figura adjunta.



Sin embargo, para facilitar el tratamiento informático, se ha adoptado un esquema inspirado del depósito-suelo visto anteriormente, mediante dos valores límites  $R_{MIN}$  y  $R_{MAX}$ . Se calculan la infiltración  $X_{INFI}$  y la escorrentía  $R_{UIS}$  como sigue:

- a) si  $PU \leq RMIN$ , todo el agua se infiltra:  $XINFI = PU$   
 $RUIS = 0$

- b) si  $PU > RMAX$ , se infiltra la mitad de la lluvia útil superior a  $RMIN$  (es decir una cantidad igual a la superficie del triángulo ABC, mitad del rectángulo ABCD), más la cantidad  $RMIN$ . De la parte superior a  $RMAX$ , no se infiltra nada

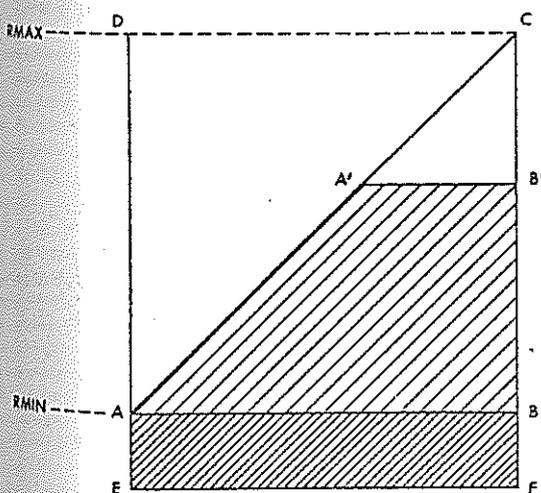
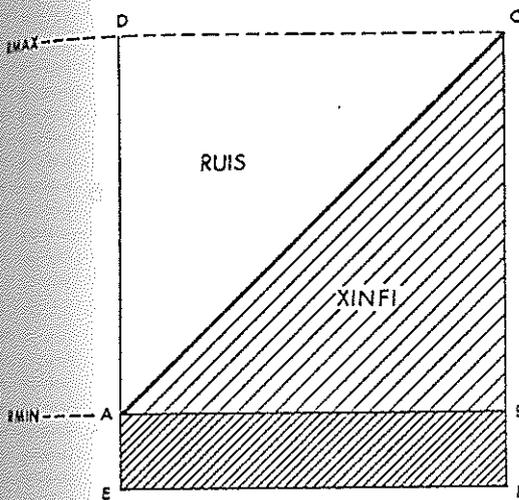
De donde, tomando  $AB = 1$ , se puede calcular

$$XINFI = \frac{RMAX - RMIN}{2} + RMIN$$

$$RUIS = PU - XINFI$$

- c) Si  $RMIN < PU < RMAX$ , se infiltra una cantidad igual a la suma de las superficies del rectángulo ABFE ( $S_R$ ) y del trapecio ABB'A' ( $S_T$ ).

Con  $AB = 1$ , la primera superficie es igual a  $RMIN$ , como en el caso anterior. En cuanto a la del trapecio ABB'A', es igual al producto de la altura  $BB'$  por la media suma de las bases  $AB$  y  $A'B'$ .



$$\begin{aligned} \text{Es decir } XINFI &= S_R + S_T \\ &= RMIN + (PU - RMIN) \left(\frac{1}{2}(AB + A'B')\right) \end{aligned}$$

La longitud A'B' se calcula por las relaciones de los triángulos semejantes:

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{CB'}{CB}$$

$$\text{de donde } A'B' = AB \frac{CB'}{CB}$$

$$= 1 \cdot \frac{RMAX - PU}{RMAX - RMIN}$$

$$\text{Y } \frac{1}{2}(AB + A'B') = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{RMAX - PU}{RMAX - RMIN}\right)$$

$$= \frac{RMAX - RMIN + RMAX - PU}{2(RMAX - RMIN)}$$

$$= \frac{2RMAX - RMIN - PU}{2(RMAX - RMIN)}$$

de donde

$$XINFI = RMIN + \frac{(2RMAX - RMIN - PU)(PU - RMIN)}{2(RMAX - RMIN)}$$

$$RUIS = PU - XINFI$$

En el programa de cálculo del modelo de alimentación atmosférica del Campo de Dalías, se ha tomado

$$RMIN = .5 \text{ mm}$$

$$RMAX = 50 \text{ mm}$$

con lo cual la función  $XINFI = f(PU)$  para estos valores se describe

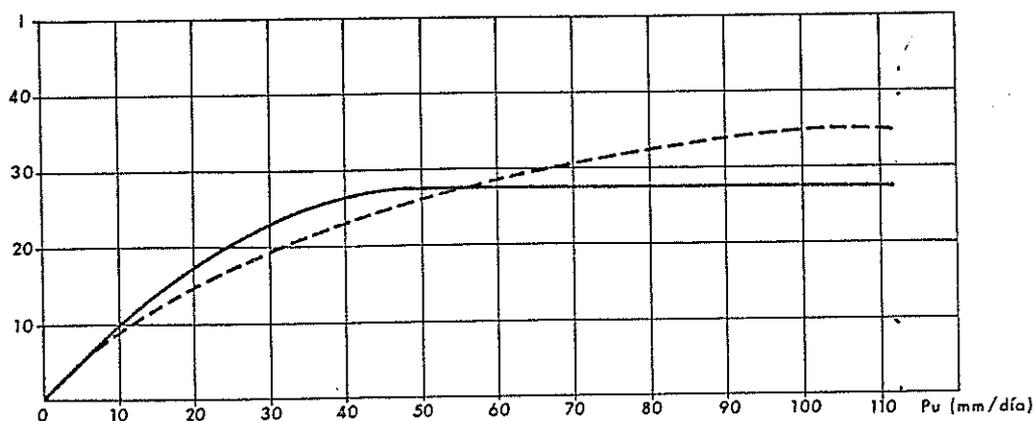
$$XINFI = \frac{(95 - PU)(PU - 5)}{90} + 5$$

$$\approx -0,0111PU^2 + 1,11PU - 0,28$$

En consecuencia, la repartición de la  $Pu$  en infiltración y escorrentía se hace con arreglo a las siguientes ecuaciones (en mm/día):

| Lluvia útil   | Infiltración                          | Escorrentía                         |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| $PU \leq 5$   | $XINFI = 0$                           | $RUIS = 0$                          |
| $5 < PU < 50$ | $XINFI = -0,0111PU^2 + 1,11PU - 0,28$ | $RUIS = 0,0111PU^2 - 0,11PU + 0,28$ |
| $PU \geq 50$  | $XINFI = 27,5$                        | $RUIS = PU - 27,5$                  |

Con respecto a la relación "empírica" indicada con anterioridad, ésta favorece la infiltración para valores de  $Pu$  inferiores a 56 mm, y la escorrentía superficial para valores superiores. Ello es muy compatible con las características geológico-topográficas de la Sierra de Gádor: gran infiltración en las dolomías en general, pero gran escorrentía debida al relieve cuando la lluvia útil diaria es muy importante.



#### 4.2.3.- El programa PLUM2

##### • Principio

Este programa utiliza las infiltraciones XINFI (J, N) y las escorrentías RUIS (J, N) correspondientes al área climática J y al mes N, datos almacenados en los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5 y calculados anteriormente por los programas THORD1, THORD2, ..., THORD5. El programa atribuye a cada malla del modelo la alimentación atmosférica mensual que le corresponde, igual a uno o varios de los términos XINFI y RUIS de la propia malla y, en su caso, de otras mallas. Los datos de los ficheros BILHY, expresados en milímetros, son multiplicados por un coeficiente S (que convierte los milímetros en metros cúbicos por malla de 1" de lado a escala de 1/50 000, es decir de  $1,6129 \text{ km}^2$  de superficie) y por un coeficiente K de dimensión de malla (correspondiendo el valor 1 a una sola malla, entera, de  $1,6129 \text{ km}^2$  de superficie).

Para dar cuenta lo más fielmente posible de la realidad del fenómeno físico, se ha tenido que tener en cuenta la escorrentía superficial generada en la sierra y que llega a infiltrarse en el piedemonte del Campo de Dalías. Para ello, ha sido necesario adoptar un cierto número de hipótesis y de simplificaciones.

Se ha admitido que no se creaba escorrentía en la llanura, es decir que toda la lluvia útil se infiltraba en la malla sobre la cual se generaba; salvo contadas excepciones, el simple examen de un mapa topográfico enseña que no hacen ramblas en el Campo de Dalías.

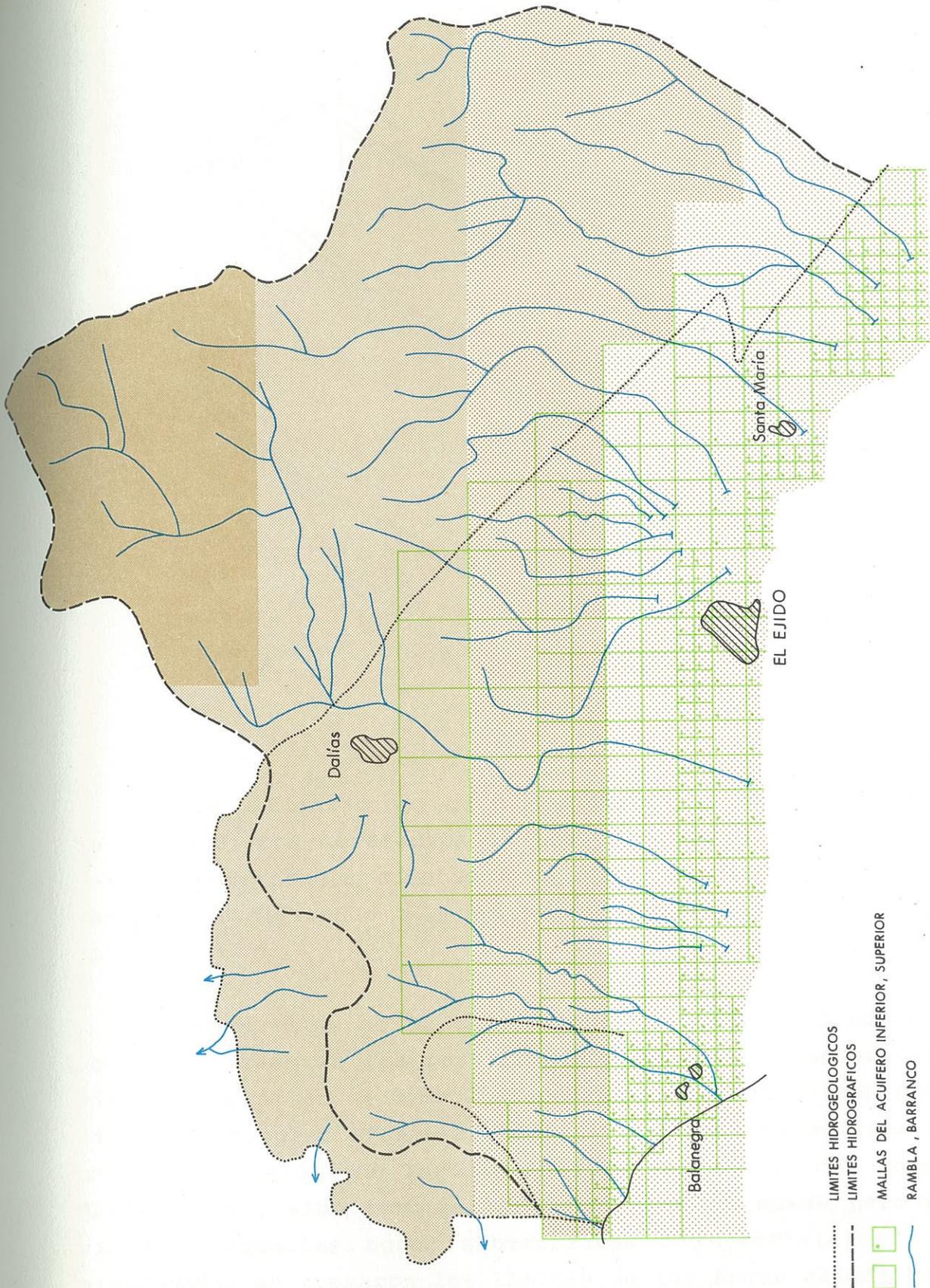
Asimismo se ha admitido que, en la sierra, el término "infiltración" (XINFI) se infiltraba in situ, evidentemente, mientras que el término "escorrentía" (RUIS) corría en superficie, sin sufrir pérdidas, hasta la llanura en la cual se infiltraba. Puede darse varios casos, según la situación de la malla de montaña (véase los esquemas).

1- está en la cuenca vertiente hidrológica del Campo de Dalías, y dentro de los límites del sistema acuífero saturado; es el caso general. El término XINFI se infiltra in situ, y el término RUIS corre hasta infiltrarse, en la llanura, en una o varias mallas como se verá más adelante. . .

2- está en la cuenca vertiente hidrológica del Campo de Dalías, pero en un sistema acuífero no modelizado en el presente estudio. No se tiene en cuenta el término XINFI, y se considera el término RUIS como en el caso anterior.

3- está en la cuenca vertiente hidrológica del Campo de Dalías, dentro de los límites hidrogeológicos de un sistema modelizado, pero en la franja no saturada del mismo. XINFI se infiltra, tiene una escorrentía subterránea sobre el substrato, y va a alimentar la primera malla saturada que encuentre; el término RUIS actúa como en el caso anterior.

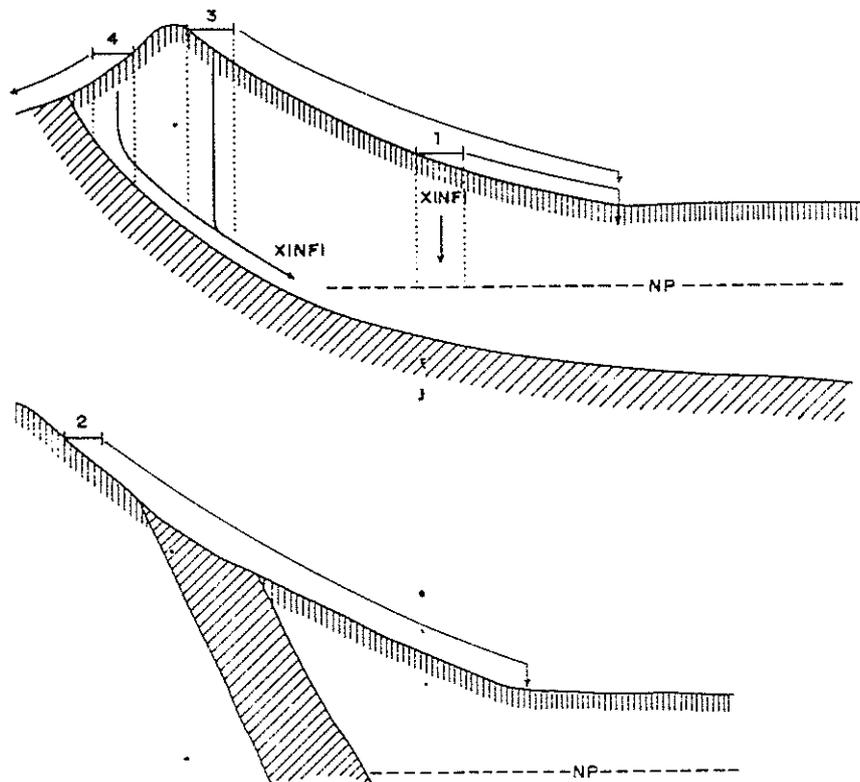
4- está fuera de la cuenca vertiente hidrológica, dentro de los límites hidrogeológicos de un sistema modelizado, pero en la franja no saturada del mismo. El término XINFI tendrá el mismo destino que en el caso anterior, y no se considerará el término RUIS.



- ..... LIMITES HIDROGEOLOGICOS
- - - - - LIMITES HIDROGRAFICOS
- □ MALLAS DEL ACUIFERO INFERIOR, SUPERIOR
- ~ RAMBLA, BARRANCO
- ZONA CLIMATICA 1
- ZONA CLIMATICA 2
- ZONA CLIMATICA 3
- ZONA CLIMATICA 4



ALIMENTACION ATMOSFERICA



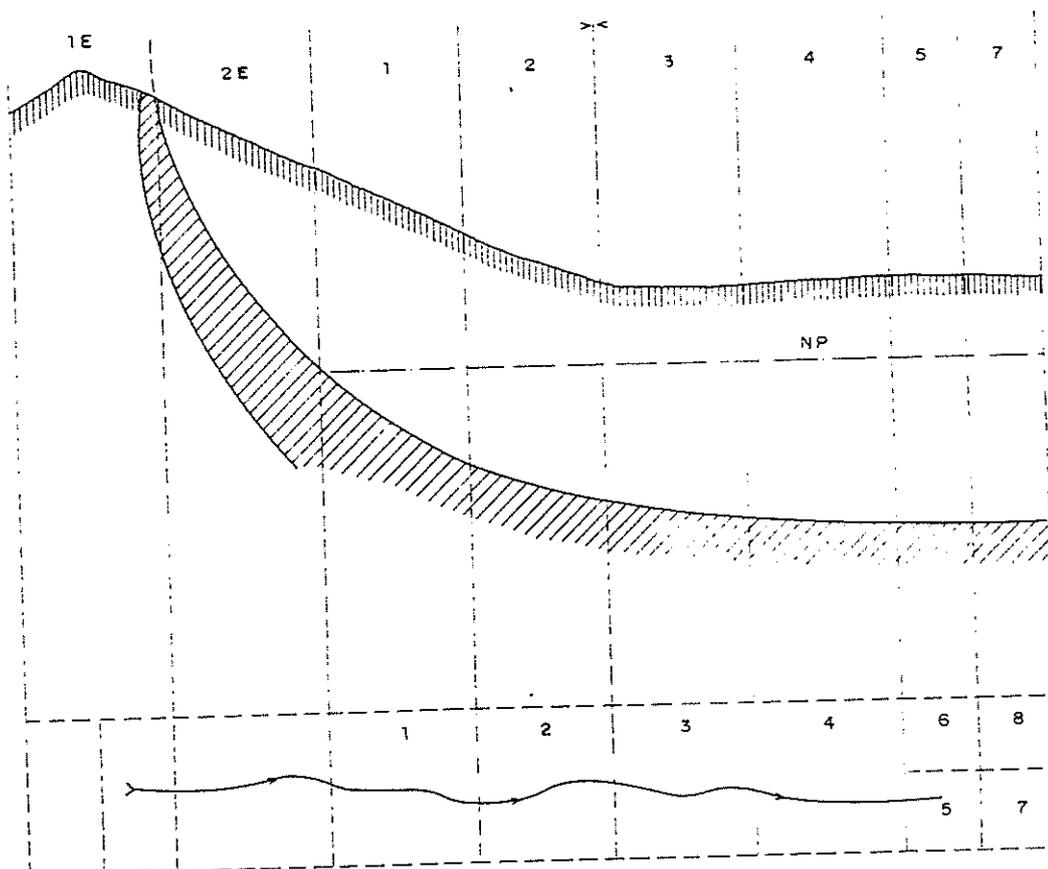
La infiltración, en el Campo, de la escorrentía generada en la Sierra se efectúa en las primeras mallas encontradas, y según porcentajes adoptados en cada caso (y que, por cierto, han sido modificados algunas veces durante el calado del modelo).

Para ello, se ha considerado que toda esta escorrentía venía encauzada en las ramblas que, con mayor o menor rapidez, vienen a morir en el Campo. En consecuencia, el primer paso consistió en dibujar dichas ramblas (y sus cuencas vertientes) en un mapa mallado (que incluía no sólo las mallas del modelo hidrogeológico, sino también las exteriores al mismo pero que en viaban a aquellas aguas subterráneas o superficiales); en el mismo mapa, se trazaron los límites de las áreas climáticas.

Sobre este mapa, se podía ver entonces el número de mallas (internas o, en su caso, externas al modelo) que aportaban escorrentía a las ramblas que llegaban al Campo, así como la pertenencia de dichas mallas a una u otra de las áreas climáticas. Además, al mirar el trazado de cada rambla entre su entrada en el Campo y su desaparición en el mismo, se podía determinar el número y la identificación de cada malla que podía recibir una infiltración de la escorrentía procedente de la Sierra; el porcentaje de dicha escorrentía que se infiltre en cada malla con rambla ha sido determinado de forma arbitraria, con la tónica general de que dicho porcentaje iba decreciendo hacia aguas abajo.

El ejemplo siguiente permitirá entender mejor el proceso.

Admitamos, por ejemplo, que la escorrentía que llega a la llanura por una determinada rambla se infiltra a razón de un 60% en la primera malla, 30% en la segunda, y 10% en la tercera.



Malla 1E: XINFI(3,N) sale al exterior (3 es el número del área climática, y N el mes considerado)

0,5 RUIS(3,N) irá a infiltrarse en las mallas 3 y siguientes

Malla 2E: XINFI(3,N) va a alimentar a la malla 1 por escorrentía subterránea

RUIS(3,N) va a infiltrarse en las mallas 3 y siguientes

Malla 1: XINFI(3,N) alimenta directamente a la malla 1

RUIS(3,N) va a infiltrarse en las mallas 3 y siguientes

Malla 2: XINFI(3,N) alimenta directamente a la malla 2

RUIS(3,N) va a infiltrarse en las mallas 3 y siguientes

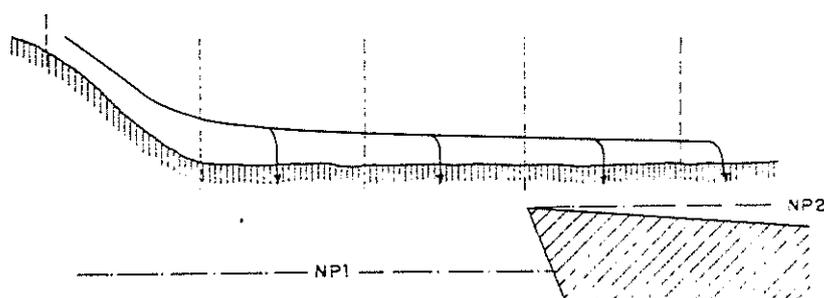
Mallas 3 a 8: siendo mallas de llanura, no tienen escorrentía y toda su lluvia útil se infiltra; las mallas 3 y 4 reciben, cada una, PU(4,N) y las siguientes reciben, cada una, 0,25 Pu(4,N) (0,25 por tratarse de cuartos de malla normal).

Por lo tanto, las alimentaciones de las mallas del modelo serian las siguientes:

|          |  |
|----------|--|
| malla 1: | $Q = S \times 2 \times XINFI(3,N)$                                     |
| " 2:     | $Q = S \times XINFI(3,N)$  |
| " 3:     | $Q = S \times (0,6 \times 3,5 \times RUIS(3,N) + PU(4,N))$             |
| " 4:     | $Q = S \times (0,3 \times 3,5 \times RUIS(3,N) + PU(4,N))$             |
| " 5:     | $Q = S \times (0,1 \times 3,5 \times RUIS(3,N) + 0,25 \times PU(4,N))$ |
| " 6,7,8: | $Q = S \times 0,25 \times PU(4,N)$                                     |

Es obvio que, en la práctica, ninguna cuenca vertiente de rambla tiene forma de "pasillo" con una sola malla de anchura, pero ello no altera el proceso de cálculo.

Otro problema que se planteó fue el saber hacia qué acuífero se infiltraba el agua de cada rambla. En término general, los primeros kilómetros de llanura corresponden al Acuífero inferior, y los siguientes al superior, como indica el esquema siguiente:



Sin embargo, al existir pasadas margosas dentro de las formaciones de piedemonte, puede ocurrir que las aguas infiltradas en sectores que, lógicamente, corresponden al Acuífero inferior sean llevadas hasta el Superior. Estos cambios con respecto al esquema general, así como los porcentajes de infiltración en mallas sucesivas, han sido determinados por tanteos sucesivos en el curso del calado del modelo de flujo.

La última hipótesis adoptada consiste en dar por sentado que la lluvia útil (o una de sus componentes, según el caso) generada en un mes determinado llega al manto el mismo mes, cualquiera que sea su recorrido (infiltración directa; infiltración seguida de un recorrido lateral hasta la primera malla saturada; recorrido superficial).

Es obvio que el recorrido superficial entre una malla de montaña y la malla de piedemonte en la cual se infiltra el agua es instantáneo a la escala del mes. En cuanto a la infiltración directa, sólo se puede hacer observar que, al comparar las fechas de lluvias y las de los "picos" piezométricos, se nota una cierta simultaneidad o un retraso del orden del mes (no se puede ser más preciso al ser mensuales las observaciones piezométricas); se podría ganar algo en precisión si se colocara se unos cuantos limnigrafos en determinados piezómetros, para tener un registro continuo de la evolución de los mantos. No obstante, para el fin perseguido (la realización de un modelo de alimentación atmosférica que suministrase esta última al modelo de flujo subterráneo), el admitir la simultaneidad (a la escala del mes) entre lluvia y alimentación del manto no causa ninguna distorsión grave en la restitución de la evolución observada en los piezómetros de la red de control. Queda el caso de la infiltración seguida por un recorrido en la zona no saturada; se podría temer que, al admitir aquí también una simultaneidad entre la lluvia y la alimentación al manto, se tuviese un sistema mucho más "nervioso" que en la realidad (ya que un recorrido subhorizontal en la zona no saturada suele ser lento); incluso se había pensado en utilizar el artificio del modelo de Nash adaptado a la hidrogeología por M.BESBES en su tesis doctoral (consiste en simular la zona no saturada mediante un cierto número de depósitos en serie, de vaciado exponencial); no fue necesario, probablemente por la muy buena transmisividad de las dolomías, y por el corto recorrido lateral .

• Proceso de cálculo

Hay un total de 74 ecuaciones distintas, que representan las 1124 mallas del modelo de flujo. En otros términos, hay 74 grupos de mallas, cada uno con su ecuación específica (que vienen detalladas a continuación. Algunos grupos tienen solamente una malla (suelen ser mallas de piedemonte, cuya alimentación es muy diversificada), otros tienen unas cuantas, y otros, incluso, se componen de varias decenas de mallas (corresponden a las mallas de llanura, que no reciben más que su propia lluvia útil); hay también un grupo de mallas con alimentación nula (zona confinada del acuífero inferior).

En el programa, los grupos vienen caracterizados por un número de orden (1 para el primer grupo, 2 para el segundo, etc.), así como por la ecuación de alimentación correspondiente. Mediante las instrucciones adecuadas, el programa atribuye a las mallas de cada grupo la ecuación que caracteriza a éste, y calcula para cada mes la alimentación correspondiente, después de haber leído en los ficheros BILHY el valor de los términos XINFI (J, N) y RUIS (J, N).

• Ecuaciones de alimentación atmosférica

Vienen indicadas en el cuadro 1. Conviene recordar el significado de los símbolos utilizados:

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| XINFI     | = | infiltración                                      |
| RUIS      | = | escorrentía superficial                           |
| PU        | = | lluvia útil, suma de los dos términos precedentes |
| 1,2,...,5 | = | número del área climática                         |

Cuadro 1.— Las ecuaciones de alimentación atmosférica

| Nº ec. | RUIS 1 | XINFI 2 | RUIS 2 | XINFI 3 | RUIS 3 | PU 4   | Mallas capa 1  | Mallas capa 2                |
|--------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|----------------|------------------------------|
| 01     | 5,40   | 3,00    | 7,00   | —       | —      | —      | —              | 5                            |
| 02     | 1,78   | —       | 2,00   | —       | 0,55   | 0,25   | —              | 79                           |
| 03     | 0,27   | —       | 0,61   | —       | 0,20   | 0,25   | —              | 113                          |
| 04     | 0,06   | —       | 0,54   | —       | 0,16   | 0,25   | —              | 103                          |
| 05     | 0,34   | —       | 0,87   | —       | 0,58   | 0,50   | 161            | —                            |
| 06     | 0,03   | —       | 0,20   | —       | 0,25   | 0,25   | 162            | —                            |
| 07     | 5,84   | —       | 6,48   | 0,25    | 1,79   | —      | —              | 56                           |
| 08     | 0,27   | —       | 0,82   | —       | 2,785  | 0,50   | 125            | —                            |
| 09     | 0,30   | —       | 0,68   | —       | 0,225  | 0,50   | 126, 160       | —                            |
| 10     | 0,41   | —       | 0,92   | —       | 0,30   | 0,0625 | 159            | —                            |
| 11     | 0,24   | —       | 0,67   | —       | 0,38   | 0,25   | 200, 201       | —                            |
| 12     | 0,105  | —       | 0,605  | —       | 0,85   | 0,25   | —              | 162                          |
| 13     | 0,20   | —       | 0,61   | —       | 0,45   | 0,25   | —              | 186                          |
| 14     | —      | 0,60    | 0,19   | 0,50    | 0,14   | 0,125  | 17             | —                            |
| 15     | —      | 3,50    | —      | —       | —      | —      | —              | 1, 3                         |
| 16     | —      | 4 00    | —      | —       | —      | —      | —              | 2                            |
| 17     | —      | 3,20    | —      | —       | —      | —      | —              | 4                            |
| 18     | —      | 2,00    | —      | —       | —      | —      | —              | 6                            |
| 19     | —      | 1,00    | —      | —       | —      | —      | —              | 7                            |
| 20     | —      | 0,25    | —      | —       | —      | —      | —              | 8, 20                        |
| 21     | —      | 1,35    | —      | —       | —      | —      | —              | 9, 10                        |
| 22     | —      | 2,40    | —      | —       | —      | —      | —              | 11                           |
| 23     | —      | —       | 0,12   | —       | 0,12   | 0,0625 | 66             | —                            |
| 24     | —      | —       | 0,94   | —       | 1,88   | 0,25   | —              | 76                           |
| 25     | —      | —       | 0,40   | —       | 0,48   | 0,25   | —              | 83                           |
| 26     | —      | —       | 0,09   | —       | 0,36   | 0,25   | —              | 84                           |
| 27     | —      | —       | 0,21   | —       | 0,33   | 0,25   | —              | 87                           |
| 28     | —      | —       | 0,58   | —       | 1,016  | 0,25   | —              | 71                           |
| 29     | —      | —       | 0,06   | —       | 0,12   | 0,25   | —              | 99                           |
| 30     | —      | —       | 0,30   | —       | 0,63   | 0,0625 | 61, 62, 94, 95 | —                            |
| 31     | —      | —       | 0,40   | —       | 0,84   | 0,25   | 123            | —                            |
| 32     | —      | —       | 0,05   | —       | 0,24   | 0,0625 | 63, 64, 96, 97 | —                            |
| 33     | —      | —       | 0,20   | —       | 1,20   | 0,50   | 98             | —                            |
| 34     | —      | —       | 0,30   | —       | 0,07   | 0,50   | 265            | —                            |
| 35     | —      | —       | 0,50   | —       | 0,25   | 0,50   | 266            | —                            |
| 36     | —      | —       | 0,20   | —       | 0,03   | 0,0625 | 312            | —                            |
| 37     | —      | —       | 0,03   | —       | 0,04   | 0,0625 | 314, 339       | —                            |
| 38     | —      | —       | 0,21   | —       | 0,10   | 0,25   | 342, 417       | —                            |
| 39     | —      | —       | 0,10   | —       | 0,05   | 0,0625 | 416            | —                            |
| 40     | —      | —       | 0,10   | —       | 0,05   | 0,25   | 418            | —                            |
| 41     | —      | —       | 0,05   | —       | 0,30   | 0,375  | —              | 109, 110                     |
| 42     | —      | —       | 0,02   | —       | 0,036  | 0,25   | —              | 95                           |
| 43     | —      | —       | —      | —       | 0,05   | 0,0625 | 36, 67, 68     | —                            |
| 44     | —      | —       | 0,05   | 0,375   | 0,05   | —      | 4              | —                            |
| 45     | —      | —       | 0,09   | —       | 0,10   | 0,0625 | 5              | —                            |
| 46     | —      | —       | 0,05   | —       | 0,05   | 0,0625 | 6              | —                            |
| 47     | —      | —       | 0,19   | —       | 0,14   | 0,0625 | 23, 29         | —                            |
| 48     | —      | —       | 0,10   | —       | 0,07   | 0,0625 | 34             | —                            |
| 49     | —      | —       | —      | 1,00    | —      | —      | —              | 12 a 19, 64                  |
| 50     | —      | —       | —      | 0,25    | —      | —      | —              | 26 a 41, 48 a 55,<br>57 a 63 |
| 51     | —      | —       | —      | 0,3625  | —      | —      | 1, 3           | —                            |
| 52     | —      | —       | —      | 0,25    | —      | —      | 2              | —                            |
| 53     | —      | —       | —      | 0,525   | —      | 0,0625 | 7, 8, 10       | —                            |
| 54     | —      | —       | —      | 0,525   | 0,05   | 0,0625 | 9              | —                            |
| 55     | —      | —       | —      | 0,50    | —      | 0,125  | 15, 16, 18     | —                            |
| 56     | —      | —       | —      | —       | 0,337  | 0,25   | —              | 73                           |
| 57     | —      | —       | —      | —       | 0,37   | 0,25   | —              | 82, 85, 86                   |
| 58     | —      | —       | —      | —       | 0,045  | 0,25   | —              | 97, 98                       |
| 59     | —      | —       | —      | —       | 0,60   | 0,50   | 163            | —                            |
| 60     | —      | —       | —      | —       | 0,05   | 0,25   | 203, 264       | —                            |
| 61     | —      | —       | —      | —       | —      | 0,0625 | 12             | —                            |
| 62     | —      | —       | —      | —       | 0,05   | 0,0625 | 13, 19         | —                            |
| 63     | —      | —       | —      | —       | 0,65   | 0,25   | —              | 74                           |
| 64     | —      | —       | —      | —       | 0,427  | 0,25   | —              | 75                           |

| Nº ec. | PU 4   | mallas capa 1   | mallas capa 2   |
|--------|--|---|---|
| 65     | 1,00   | 643, 644  | —   |
| 66     | 0,75   | —   | 163   |
| 67     | 0,35   | 459, 490, 491   | —   |
| 68     | 0,25   | 111 a 122, 124, 127, 134 a 147, 168 a 174, 179 a 183, 202, 204 a 208 225 a 227, 267 a 271, 288 289, 343 a 346, 359, 360, 419 a 427, 492 a 502, 565 a 574, 637 a 642, 645, 646, 689 a 698  | —<br>—<br>—<br>—  |
| 69     | 0,25   | —<br>—<br>—   | 72, 77, 78, 80, 81, 88, 96, 100, 101, 102, 104 a 108, 136 a 138 |
| 70     | 0,0625   | 11, 14, 20 a 22 24 a 28, 30 a 33, 35, 37 a 60, 65, 69 a 93, 99 a 110 128 a 133, 148 a 158, 164 a 167, 175 a 178, 184 a 199, 209 a 224, 228 a 263, 272 a 287, 290 a 311, 313, 315 a 338, 340, 341, 347 a 358, 361 a 415, 428 a 458, 460 a 489, 503 a 526, 533 a 556, 575 a 598, 605 a 628, 647 a 678 | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—                                      |
| Nº ec. | PU 5   | mallas capa 1   |   |
| 71     | 1,00   | 710 a 718, 731 a 740, 749 a 758, 766 a 794  |   |
| 72     | 0,25   | 563, 564, 635, 636, 679 a 688, 699 a 709, 719 a 730, 741 a 748, 759 a 765   |   |
| 73     | 0,0625   | 527 a 532, 557 a 562, 599 a 604, 629 a 634  |   |
| Nº ec. | mallas capa 2 con alimentación nula (acuífero confinado)                                 |   |   |
| 74     | 21 a 25, 42 a 47, 65 a 70, 89 a 94, 111, 112, 114 a 135, 139 a 161, 164 a 185, 187 a 330 |   |   |

Cuadro 2.— Número de la ecuación de alimentación atmosférica de cada malla (Capa 1)

| Nº mallas | Nº ec. |
|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 1         | 51     | 2         | 52     | 3         | 51     | 4         | 44     |
| 5         | 45     | 6         | 46     | 7, 8      | 53     | 9         | 54     |
| 10        | 53     | 11        | 70     | 12        | 61     | 13        | 62     |
| 14        | 70     | 15, 16    | 55     | 17        | 14     | 18        | 55     |
| 19        | 62     | 20 a 22   | 70     | 23        | 47     | 24 a 28   | 70     |
| 29        | 47     | 30 a 33   | 70     | 34        | 48     | 35        | 70     |
| 36        | 43     | 37 a 60   | 70     | 61, 62    | 30     | 63, 64    | 32     |
| 65        | 70     | 66        | 23     | 67, 68    | 43     | 69 a 93   | 70     |
| 94, 95    | 30     | 96, 97    | 32     | 98        | 33     | 99 a 110  | 70     |
| 111 a 122 | 68     | 123       | 31     | 124       | 68     | 125       | 08     |
| 126       | 09     | 127       | 68     | 128 a 133 | 70     | 134 a 147 | 68     |
| 148 a 158 | 70     | 159       | 10     | 160       | 09     | 161       | 05     |
| 162       | 06     | 163       | 60     | 164 a 167 | 70     | 168 a 174 | 68     |
| 175 a 178 | 70     | 179 a 183 | 68     | 184 a 199 | 70     | 200, 201  | 11     |
| 202       | 68     | 203       | 60     | 204 a 208 | 68     | 209 a 224 | 70     |
| 225 a 227 | 68     | 228 a 263 | 70     | 264       | 60     | 265       | 34     |
| 266       | 35     | 267 a 271 | 68     | 272 a 287 | 70     | 288, 289  | 68     |
| 290 a 311 | 70     | 312       | 36     | 313       | 70     | 314       | 37     |
| 315 a 338 | 70     | 339       | 37     | 340, 341  | 70     | 342       | 38     |
| 343 a 346 | 68     | 347 a 358 | 70     | 359, 360  | 68     | 361 a 415 | 70     |
| 416       | 39     | 417       | 38     | 418       | 40     | 419 a 427 | 68     |
| 428 a 458 | 70     | 459       | 67     | 460 a 489 | 70     | 490, 491  | 67     |
| 492 a 502 | 68     | 503 a 526 | 70     | 527 a 532 | 73     | 533 a 556 | 70     |
| 557 a 562 | 73     | 563, 564  | 72     | 565 a 574 | 68     | 575 a 598 | 70     |
| 599 a 604 | 73     | 605 a 628 | 70     | 629 a 634 | 73     | 635, 636  | 72     |
| 637 a 642 | 68     | 643, 644  | 65     | 645, 646  | 68     | 647 a 678 | 70     |
| 679 a 688 | 72     | 689 a 698 | 68     | 699 a 709 | 72     | 710 a 718 | 71     |
| 719 a 730 | 72     | 731 a 740 | 71     | 741 a 748 | 72     | 749 a 758 | 71     |
| 759 a 765 | 72     | 766 a 794 | 71     |           |        |           |        |

Cuadro 3.- Número de la ecuación de alimentación atmosférica de cada malla (Capa 2)

| Nº mallas | Nº ec. |
|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
| 1         | 15     | 2         | 16     | 3         | 15     | 4         | 17     |
| 5         | 01     | 6         | 18     | 7         | 19     | 8         | 20     |
| 9, 10     | 21     | 11        | 22     | 12 a 19   | 49     | 20        | 20     |
| 21 a 25   | 74     | 26 a 41   | 50     | 42 a 47   | 74     | 48 a 55   | 50     |
| 56        | 07     | 57 a 63   | 50     | 64        | 49     | 65 a 70   | 74     |
| 71        | 28     | 72        | 69     | 73        | 56     | 74        | 63     |
| 75        | 64     | 76        | 24     | 77, 78    | 69     | 79        | 02     |
| 80, 81    | 69     | 82        | 57     | 83        | 25     | 84        | 26     |
| 85, 86    | 57     | 87        | 27     | 88        | 69     | 89 a 94   | 74     |
| 95        | 42     | 96        | 69     | 97, 98    | 58     | 99        | 29     |
| 100 a 102 | 69     | 103       | 04     | 104 a 108 | 69     | 109, 110  | 41     |
| 111, 112  | 74     | 113       | 03     | 114 a 135 | 74     | 136 a 138 | 69     |
| 139 a 161 | 74     | 162       | 12     | 163       | 66     | 164 a 185 | 74     |
| 186       | 13     | 187 a 330 | 74     |           |        |           |        |

Por ejemplo, la ecuación nº 14 se escribiría:

$$A = S[0,60XINFI(2,N) + 0,19RUIS(2,N) + 0,50XINFI(3,N) + 0,14RUIS(3,N) + 0,125PU(4,N)]$$

Siendo A la alimentación (en m<sup>3</sup>) del mes N, y siendo S = 1612,9 un coeficiente de conversión de los mm (sobre mallas de 1,6129 km<sup>2</sup> de superficie) en m<sup>3</sup>.

Los cuadros 2 y 3, por su parte, dan el número de la ecuación de alimentación atmosférica de las mallas ordenadas por número creciente, correspondiendo el cuadro 2 al Acuífero superior central (capa 1) y el cuadro 3 al Acuífero inferior occidental (capa 2).

#### 4.2.4.- Critica del modelo

En su estado operativo actual, se trata de un modelo relativamente pesado y sofisticado. Nada impide, obviamente, hacerlo más ligero para una aplicación más sencilla que el Campo de Dalías. Aquí sin embargo, este modelo parece ser intermedio entre un modelo sencillo, pero que no daría cuenta de la alimentación real, y otro más elaborado y que refleja más fielmente todos los aspectos de los fenómenos de alimentación por la lluvia útil, pero a costa de una gran dificultad de manejo.

Veamos sus inconvenientes y ventajas en cada una de sus dos etapas.

- El programa THORD

Basado en las fórmulas de Thornthwaite, vale lo que valen estas. Son discutibles, y han sido discutidas, pero presen

tan la gran ventaja de necesitar solamente precipitaciones y temperaturas (también se podía haber utilizado la fórmula de Turc). Su adaptación a un paso de tiempo diario es discutible en la medida en la que es heterodoxa con respecto a la filosofía de Thornthwaite, que sólo pretendía clasificar los climas; lo es también en el aspecto estrictamente matemático, pero eso no arrastra ningún error importante.

Una vez calculados, por las fórmulas de Thornthwaite, las evapotranspiraciones potenciales, no cabe duda de que el "depósito-suelo" a CRT/DCRT es más sofisticado y representativo que el a RUM, mucho más rígido. Se puede considerar, por lo tanto, que las lluvias útiles así calculados son "mejores" que las derivadas del modelo clásico.

La repartición de la lluvia útil en infiltración y escorrentía se hace según una función arbitraria y, por tanto, discutible. Pero cualquier otra repartición lo sería tanto, o más.

- El programa PLUM2

Su principal inconveniente es que la parte informatizada no representa sino la punta del iceberg. Su parte más importante radica en la determinación "manual" de las ecuaciones de alimentación, la cual es la más larga y penosa; también es la más arbitraria, pero ello es inherente a cualquier representación de un fenómeno tan difícil de coger como la infiltración de las precipitaciones. Sin embargo, presenta la ventaja de representar bastante bien este fenómeno, puesto que, a través de él, se ha llegado a un calado satisfactorio del modelo de flujo. La mayor parte de las hipótesis y simplificaciones admitidas, por ser arbitrarias, pueden ser discutidas, cambiadas y mejoradas; no obstante, habida cuenta del grado de representatividad que se buscaba en este modelo, son perfectamente coherentes y satisfactorias.

#### 4.3.- OTROS PROGRAMAS DE CIERTO INTERES

##### 4.3.1.- El programa ALIM

La cuenca considerada en los cálculos de la lluvia útil contiene todos los puntos de los que una parte por lo menos de dicha lluvia útil llegará a infiltrarse en uno de los acuíferos modelizados (véase el "modelo de alimentación atmosférica"). En ciertos casos, sólo será "útil" para dichos acuíferos el término de escorrentía (=RUIS), mientras que el término de infiltración (=XINFI) irá a parar a los acuíferos (no modelizados) del Sector nor -este. En otros casos, por el contrario, sólo será "útil" el término de infiltración, ya que la escorrentía superficial irá al río Adra o se perderá al mar. Considera, por lo tanto, una especie de cuenca envolvente.

El programa ALIM utiliza los ficheros BILHY1, BILHY2, ..., BILHY5, (creados por los programas THORD1, THORD2, ..., THORD5, que contemplan, cada uno, una de las cinco áreas climáticas consideradas), y calcula las alimentaciones mensuales y anuales (para el período 1974-75/1983-84) del Acuífero inferior occidental (=couche2), del Acuífero superior central (=couchel) y decada una de las siete zonas de éste; además, indica dichas alimentaciones para el mar (=MER), la cuenca superficial del río Adra (=BV ADRA) y los acuíferos del Sector nor -este (=SECTEUR NE), procedentes de la cuenca "envolvente" descrita más arriba. Por último, el programa facilita, para cada mes y año del período, la alimentación total (=lluvia útil PU) de dicha cuenca, así como las precipitaciones brutas que recibe, y el porcentaje de dicha alimentación total con respecto a estas precipitaciones brutas.

Puesto que, muy a menudo, la lluvia útil generada por las precipitaciones en un punto determinado va a parar, en uno

de sus términos por lo menos, a uno o varios puntos de otro sector, no es posible, obviamente, calcular los porcentajes PU/P para cada una de las entidades consideradas.

Para llevar a cabo el cálculo, el programa utiliza sendas ecuaciones de alimentación, como por ejemplo, para la zona 1:

$$QZ1(N) = (0,6 * XINFI(2,N) + 0,98 * RUIS(2,N) + 5,45 * XINFI(3,N) + 1,11 * RUIS(3,N) + 2,57 * PU(4,N)) * S * 1.E - 06$$

en la cual:

N = mes considerado

2,3,4 = nº del área climática

PU = lluvia útil

XINFI = término de infiltración

RUIS = término de escorrentía superficial

S = 1612,9 = coeficiente de conversión de mm en m<sup>3</sup> por m<sup>2</sup> de la lluvia útil  
 lla de 1270 m de lado (1 mm/mes = 1612,9 m<sup>3</sup>/mes)

1.E-06 = factor de conversión de m<sup>3</sup> en hm<sup>3</sup>

#### 4.3.2.- Los programas PIRRIG y PIRRIG2

Crean los ficheros FIDRRIG y FDIRRIG3 de alimentación suplementaria a los mantos a partir de los excedentes de riego.

Los dos programas son exactamente idénticos, radicando su única diferencia en los datos de base introducidos. Estos se refieren a las superficies regadas y al porcentaje de excedentes de riego.

El programa PIRRIG, y el fichero FDRRIG utilizado por NEWSAM, corresponden al período 1976-77/1978-79. Para dicho período, se ha admitido que la superficie regada era la que se determinó en el "Inventario y análisis de áreas de regadío" (Ministerio de Agricultura, 1978), y que la "rentabilidad" del regadío era del 85%; si la demanda de la planta, en término medio del Campo de Dalías, es de  $6\,250\text{ m}^3/\text{año}\cdot\text{ha}$ , la disponibilidad debe ser de  $\frac{6\,250}{0,85} = 7\,350\text{ m}^3/\text{año}\cdot\text{ha}$ ; se admite, por lo tanto, que la diferencia  $7\,350 - 6\,250 = 1\,100\text{ m}^3/\text{año}\cdot\text{ha}$  se infiltra. Ello corresponde a  $34,88\text{E-}6\text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ , es decir a  $3,51\text{E-}4\text{ m}^3/\text{s}$  por micromalla de 317,5 m de lado.

El programa PIRRIG2, y el fichero FDIRRIG3 utilizado por NEWSAM, corresponden al período 1979-80/1983-84, más seco que el anterior (excepto el último año) y con una mayor superficie regada. Esta última ha sido sacada de la campaña fotogramétrica de 1984. En cuanto al porcentaje de excedentes de riego, se ha admitido una "rentabilidad" del regadío de un 80%, lo que corresponde a  $1\,560\text{ m}^3/\text{año}\cdot\text{ha}$ , es decir a  $4,99\text{E-}4\text{ m}^3/\text{s}$  por micromalla de 317,5 m de lado.

Los datos de base introducidos en cada uno de los dos programas tiene que serlo de una forma compatible con las normas de NEWSAM.

La primera orden de lectura se refiere a la del coeficiente ECH ( $3,51E-4$  y  $4,99E-4$ , respectivamente).

En la segunda, se leen las secuencias de mallas (del nº IDEB al nº IFIN con el paso IPAS = 1), el valor VAL (expresada en superficies de micromallas de 317,5 m de lado) por que que hay que multiplicar el coeficiente ECH para cada una de las mallas indicadas, y el número de la capa acuífero NCO. Por ejemplo, la línea de las mallas indicadas, y el número de la capa acuífera NCO. Por ejemplo, la línea de las mallas indicadas, y el número de la capa acuífero NCO. Por ejemplo, la línea

12      13      1      0.75      0

indica que, para las mallas nº 12 y 13, el excedente de riego se obtendrá por el producto de ECH (en  $m^3/s$  por micromalla) por 0,75 (es decir que cada una de las mallas 12 y 13 tienen  $0,75 \times 317,5^2 = 75\ 605\ m^2$  regados).

El parámetro NCO se ha dejado en blanco (es decir igual a cero) pero una instrucción reza que si  $NCO = 0$  hay que tomarlo igual a 1 (es decir: capa nº 1). Para la capa 2, se indica expresamente  $NCO = 2$ .

Además de crear los ficheros utilizados por NEWSAM, el programa escribe el caudal (en  $m^3/s$ ) de cada una de las 1 124 mallas del modelo (794 para la capa 1 y 330 para la capa 2). Por último, suma los caudales unitarios, para cada una de las dos capas, y escribe el caudal (en  $m^3/s$ ) que llega a cada capa en el concepto de infiltración de excedentes de riego.

#### 4.3.3.- El programa EMMA

Conociendo las mallas afectadas por el fenómeno de desaturación/resaturación, la magnitud y el signo de tal fenómeno, y el valor de la porosidad(\*), era fácil elaborar un programa que determinase el caudal intercambiado con las reservas, conociendo además la superficie  $a^2$  de la malla considerada.

La existencia en el NEWSAM, del concepto de "densidad de caudal bombeado (o inyectado)" (códigos C y B, respectivamente), equivalente a una lámina de agua, permite encargar al programa NEWSAM que transforme S.dh en caudal sin tener que darle la superficie  $a^2$  de cada malla (porque ya se le ha indicado la dimensión  $a$  de cada malla en la fase de definición geométrica del mallado). Tan sólo hay que darle un coeficiente de conversión para que transforme los metros cúbicos/año en metros cúbicos/segundo. Dicho coeficiente, evidentemente, es igual a

$$\frac{1}{365 \times 86\,400}$$

En resumen, el programa consiste fundamentalmente en una serie de bucles DO tales como

$$DO10...I = 1,36 \quad (\text{es decir, de la malla 1 a la malla } 36)$$

$$10 \quad Q(I....) = S.C.h$$

Para simplificar los cálculos, se calculan previamente las distintas magnitudes S.C a utilizar, a partir de los distintos valores de la porosidad S.

---

(\*) Conviene señalar aquí que los coeficientes S utilizados en el programa EMMA no han sido modificados a cada vez que se les cambiaba en el curso del calado en transitorio. En consecuencia, los volúmenes de saturación/desaturación no son estrictamente coherentes con los que dan el modelo de flujo en transitorio.

El programa se termina por una orden de escritura sobre impresora, y otra orden de escritura sobre el fichero FDEMMAG que será utilizado durante las fases de cálculo para el calado en permanente.

#### 4.3.4.- Los programas PROBIMAI y TRANSIBI

Estos programas calculan y trazan, respectivamente, la alimentación total, la explotación y la diferencia entre ambos términos, para cada una de las 1124 mallas del modelo, y como media de los dos últimos años del período de calado, es decir 1982-83/1983-84.

La alimentación considerada es la suma de la alimentación atmosférica, y de la infiltración de excedentes de riego.

Los ficheros utilizados por el programa PROBIMAI son ALITRAN (alimentación atmosférica), FDIRRIG3 (excedentes de riego) y POMTRAN (bombeos). Se crea el fichero FIBIMAI.

Los resultados vienen escritos en tres bloques:

- en el primero viene la alimentación A de cada malla K (o sea  $A(K)$ ,  $10^3 \text{ m}^3/\text{mes}$ ), precedida del número de la malla entre paréntesis; la capa 1 corresponde a las mallas 1 a 794, y la capa 2 a las siguientes (cuyo número se halla al restar 794 del valor indicado)
- en el segundo viene, con las mismas características, el bombeo de cada malla, o sea  $B(K)$
- en el tercero, asimismo, se indica el balance por malla  $\Delta(K) = A(K) - B(K)$ .



21 indica que estas magnitudes se añaden (cifra 2) a las anteriormente indicadas bajo el mismo código D, y que la introducción de los datos se va a realizar por puntos (cifra 1).

2ª línea: 19

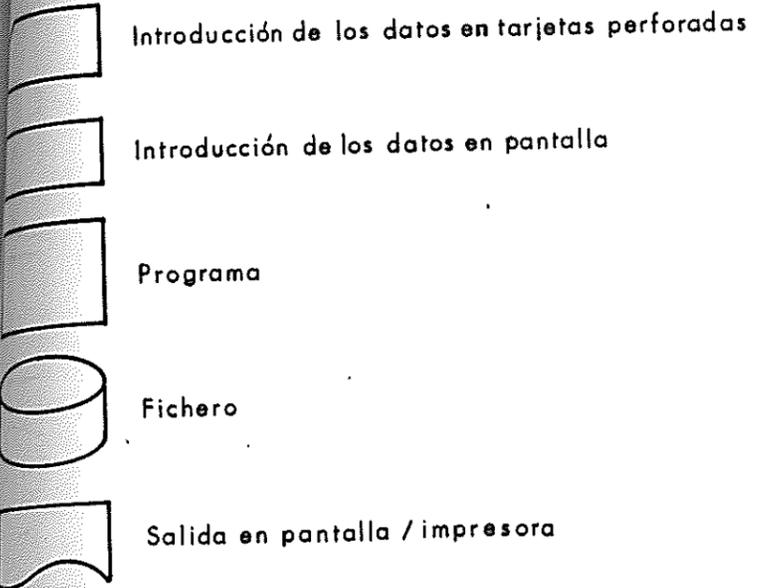
indica que el suplemento añadido de alimentación se referirá a 19 mallas.

Líneas siguientes: 121 8 etc.

121 es el número de la malla, y 8 el caudal en litros/segundo.

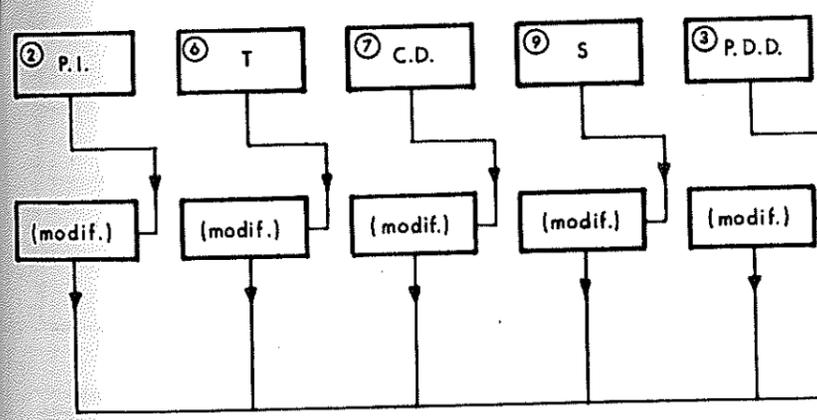
Por último, es necesario precisar que, para los mapas de alimentación y de bombeo, la unidad en la que serán expresados las magnitudes será la del mismo fichero de partida FIBIMAI (es decir  $10^3 \text{ m}^3/\text{mes}$ ), lo que se expresa por la unidad 1 (ó 0.1E + 01). No obstante, para el tercer mapa, hubo que utilizar la unidad 0.1 (ó 0.1E + 00), es decir  $10^4 \text{ m}^3/\text{mes}$ , porque no caben físicamente más de 2 signos en una micromalla, y uno de los dos podía ser el signo menos.

**BOLOS**



**ABREVIATURAS**

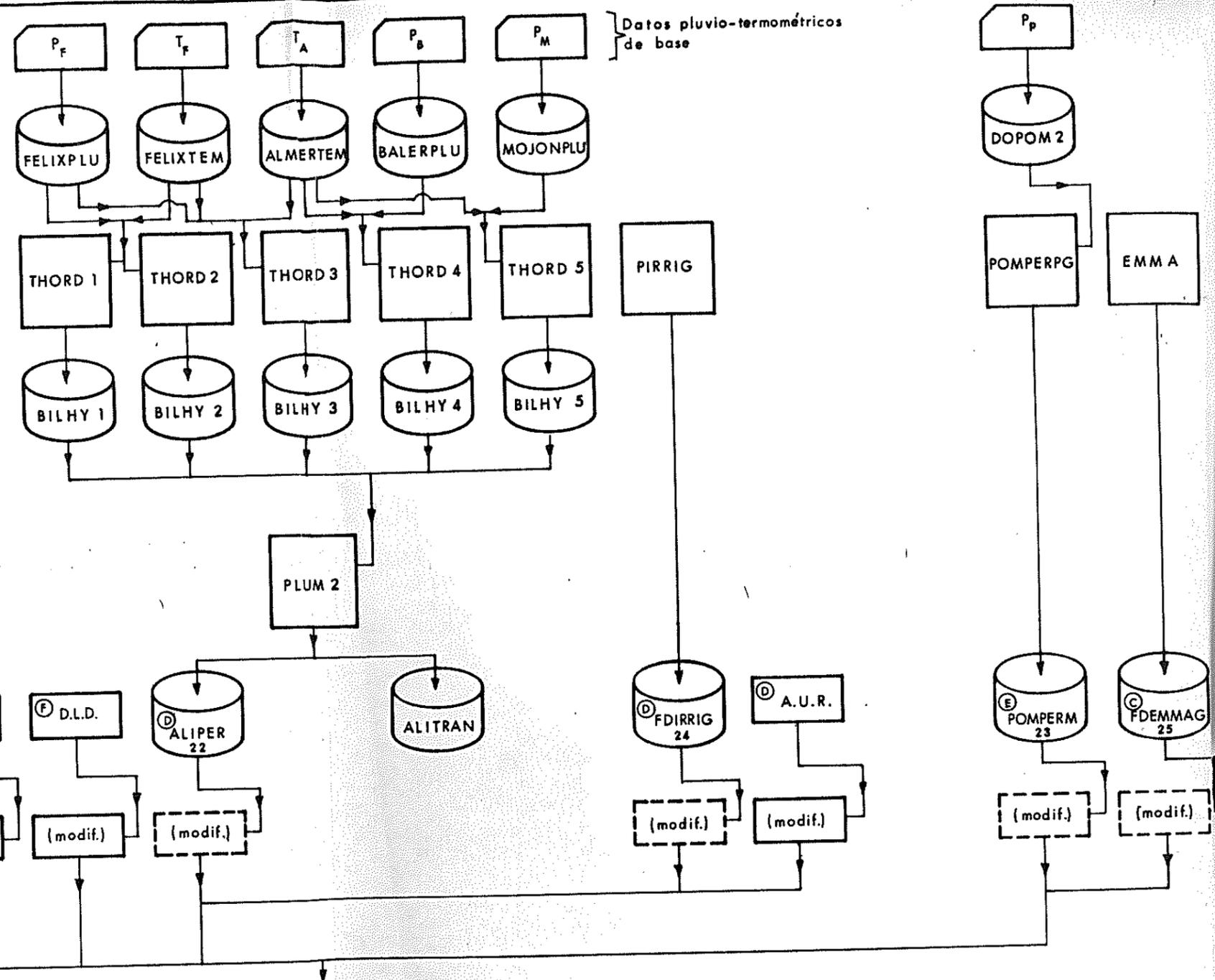
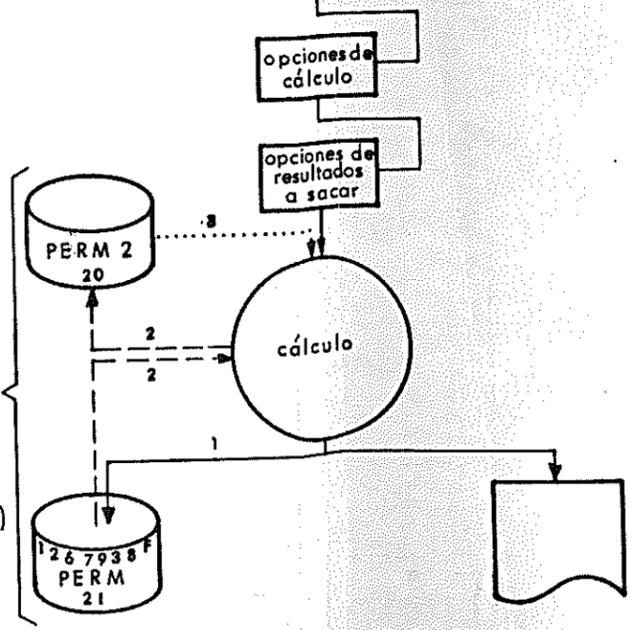
$P_N, T_N$ : Pluviometrías, temperaturas diarias de la estación N  
 $P_p$ : Bombeos mensuales malla por malla



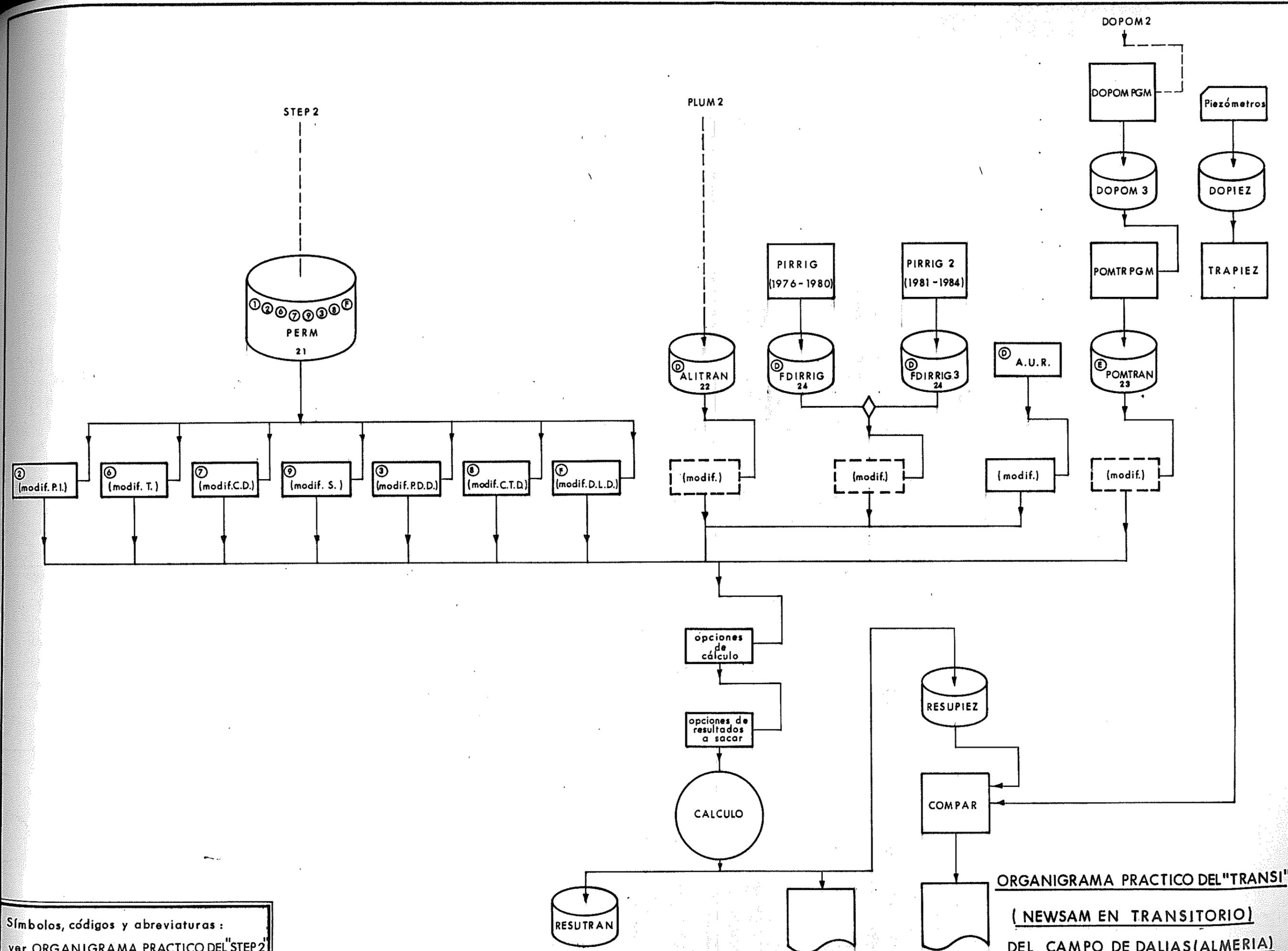
**CODIGOS Y ABREVIATURAS**

- ② Potenciales impuestos (P.I.)
- ⑥ Transmisividades (T)
- ⑦ Coef. de drainancia (C.D.)
- ⑨ Coef. de almacenamiento (S)
- ③ Potenciales de los drenes (P.D.D.)
- ⑧ Coef. de transferencia hacia los drenes (C.T.D.)
- ⑥ Caudales límite de los drenes (D.L.D.)
- ④ Inyecciones
  - Lluvia útil
  - Excedentes de riego (FDIRRIG)
  - Aguas residuales urbanas (A.U.R.)
- ⑤ Bombeos
- ① Densidad de caudales bombeados (FDEMMAG = caudales de desaturación / resaturación)

(el fichero de salida de una pasada se convierte en el fichero de entrada de la pasada siguiente)



**ORGANIGRAMA PRACTICO DEL "STEP 2"**  
 (NEWSAM EN PERMANENTE)  
 DEL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)



Símbolos, códigos y abreviaturas:  
ver ORGANIGRAMA PRACTICO DEL "STEP 2"

ORGANIGRAMA PRACTICO DEL "TRANSI"  
(NEWSAM EN TRANSITORIO)  
DEL CAMPO DE DALIAS (ALMERIA)

## 5.- CONCLUSIONES

El conjunto formado por el modelo matemático y los programas accesorios representa una herramienta cuya utilidad será tanto mayor cuanto mejor sea su fiabilidad. Se trata entonces de definir la fiabilidad que ofrece esta herramienta en el estado actual, es decir la bondad del calado del modelo matemático y de los demás programas; entre estos últimos el modelo de alimentación atmosférica puede ser no solamente el más útil independientemente del modelo, sino también aquel cuya representatividad más influya en la del modelo matemático. Al habérselo criticado ya en el subcapítulo anterior, no se volverá a tratar este tema sino por su incidencia en la representatividad del modelo de flujo, que es la que se va a tratar ahora.

Se puede decir que un modelo matemático tiene dos vertientes, a menudo confundidas en el tiempo: por una parte, existe el modelo conceptual, en el curso del cual se definen y resuelven los problemas de estructura hidrogeológica, condiciones en los límites, naturaleza y localización de los caudales entrantes y salientes, etc.; por otra parte, existe el modelo de simulación numérica en el cual, mediante la cuantificación de los distintos parámetros que entran en el cálculo, se procura restituir una piezometría (en el espacio y el tiempo) que sea la más parecida posible a la realmente observada. El modelo de simulación numérica, antes de hacer posible la simulación del futuro, permite demostrar la coherencia de las hipótesis avanzadas en el mode

lo conceptual y, en este caso, determinar una solución al problema planteado. Pero no permite asegurar que la solución presentada sea la única, salvo determinados casos en los que es elevado el grado de conocimiento adquirido sobre los aspectos conceptuales y numéricos de los acuíferos estudiados.

Las múltiples soluciones posibles en la problemática del Campo de Dalías pueden reunirse en dos grupos:

- en el primero, entrarían todas las combinaciones de los diferentes factores (estructura; parámetros hidrodinámicos y condiciones en los límites; cuantía de los caudales de alimentación y descarga ...) que, a pesar de ser muy diferentes de los adoptados, pudiesen dar lugar a una buena o aceptable restitución de las piezometrias observadas.
- en el segundo, cabrían las combinaciones de dichos factores, no muy distintos de los adoptados, pero que también pudiesen facilitar una restitución aceptable de las piezometrias observadas.

A pesar de la imprecisión existente todavía en algunos de los factores mencionados, el intervalo relativamente estrecho en el cual pueden moverse los mismos permite descartar las soluciones del primer grupo y presumir que la solución real no es muy distinta de la que proporciona el modelo aquí presentado. En efecto:

- a) Las transmisividades deducidas de bombeos de ensayo se escalonan entre 10 y 50 m<sup>2</sup>/h para las zonas testificadas del acuífero superior, mientras que el modelo, para las mismas zonas, da un campo de transmisividades de 10 a 30 m<sup>2</sup>/h; para el acuí

fero inferior, los bombes de ensayo permiten sacar valores de 300 a 800 m<sup>2</sup>/h (sin que, por cierto, se pueda explicar claramente la razón de esta relativa heterogeneidad), mientras que, en el modelo, se ha admitido una transmisividad única de 600 m<sup>2</sup>/h. En ambos casos, por lo tanto, las T caladas en el modelo son semejantes a las de los bombes de ensayo.

b) Las porosidades de calado no pueden compararse con las deducidas de bombes de ensayo, ya que las primeras son relativas a un drenado total del acuífero mientras que las segundas, por la corta duración que suelen tener los bombes de ensayo, sólo representan un drenado parcial; los valores del 10 al 20% admitidos en el calado pueden parecer algo altas pero no deben ser muy diferentes de las reales. Ocurre lo mismo con los coeficientes de almacenamiento del acuífero profundo, cuyos elevados valores ( $2,5 \cdot 10^{-4}$  a  $1,5 \cdot 10^{-3}$ ) deben relacionarse con la gran potencia que se sospecha tienen las dolomías hundidas, a la vista de lo que tienen en afloramiento.

c) El conocimiento de los <sup>volúmenes</sup> caudales de explotación puede considerarse difícilmente mejorable, por lo menos desde el año 1980-81.

d) El modelo de alimentación atmosférica suministra valores de lluvia útil muy diversos según el grado de humedad o de sequía del año considerado, y la repartición de las lluvias diarias. Es casi imposible, por lo tanto, que dicho modelo facilite alimentaciones sistemáticamente sobre (o infra) estimados.

e) La estructura geológica y las condiciones en los límites, por último, no pueden ser muy distintas, después de los estudios llevados a cabo desde hace tantos años, de los que han servido de base al modelo conceptual.

En consecuencia, parece ser que sólo cabe la posibilidad de que la solución presentada, sino es exactamente la real, difiera poco de la misma.

La unicidad de la solución sólo podría demostrarse mediante un análisis sistemático de sensibilidad y un calado mucho más largo. Los presupuestos disponibles, no acordes con la complejidad del problema planteado (teniendo en cuenta, además, la imposibilidad de calibrar el modelo de alimentación sobre cursos de agua), no permitieron llevar a cabo estas actuaciones.

Vamos a ver, por lo tanto, donde pudiera haber alguna inexactitud en los componentes del modelo de simulación numérica.

El punto más débil del mismo es, sin duda, la alimentación atmosférica, puesto que sólo ha podido calarse indirectamente sobre la piezometría, la cual viene a su vez condicionada por los parámetros hidrodinámicos y por la descarga. Con respecto a otros estudios llevados a cabo en otras zonas de la provincia, la alimentación de la comarca Dalías/Gádor parece elevada, aunque en consonancia más estrecha con las que se deducen de estudios en la provincia de Málaga (todo ocurre como si la "rentabilidad" de las precipitaciones disminuyese de Oeste a Este, por ejemplo desde el Torcal de Antequera); las menores alimentaciones específicas del resto de la provincia de Almería podrían estar en línea con esta disminución de Oeste a Este.

¿Cómo podría admitir el modelo una disminución de la alimentación atmosférica?. Esencialmente a través de las modificaciones siguientes:

- una disminución concomitante de la explotación por bombeo y/o un aumento de los otros caudales entrantes

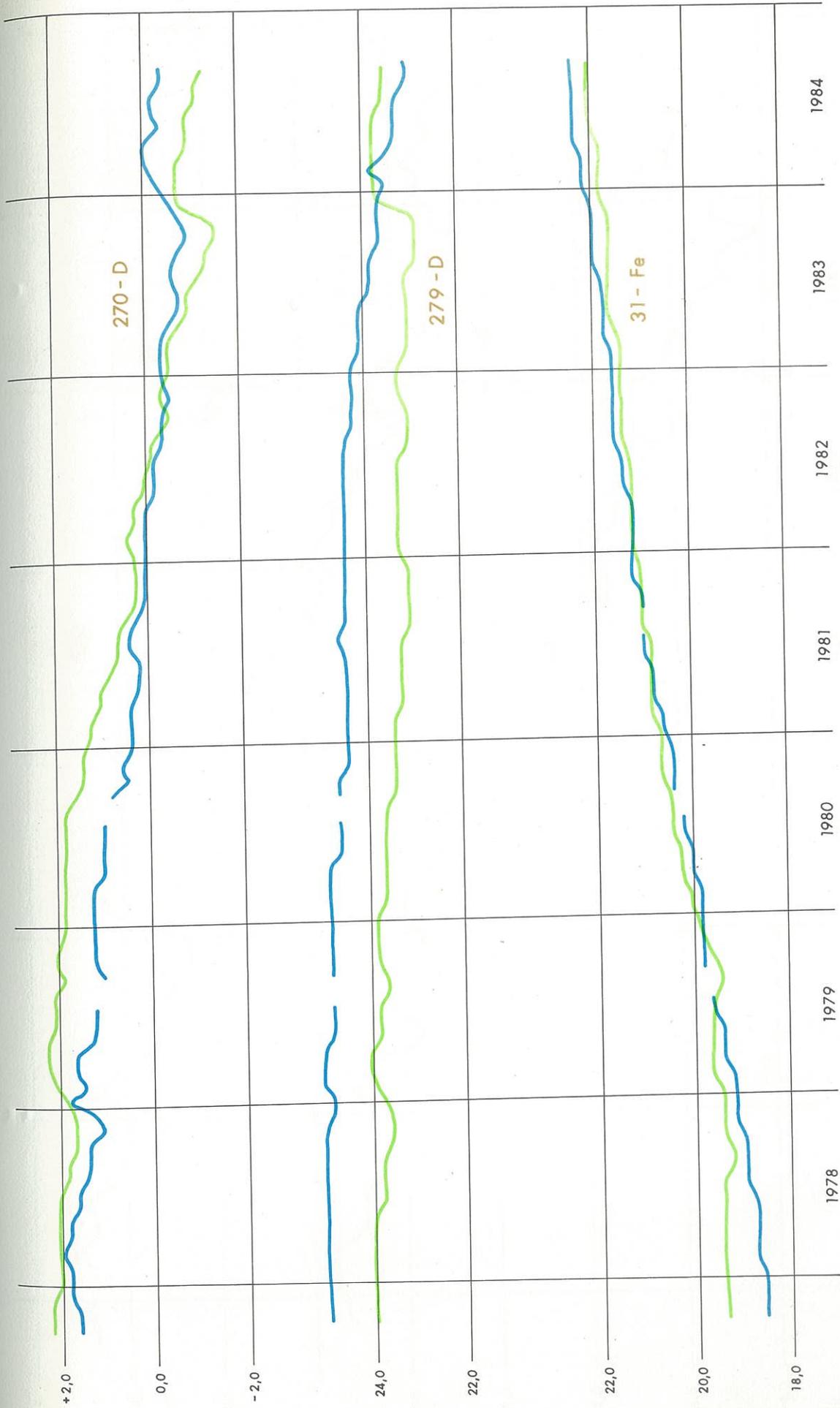
- una disminución de las transmisividades y/o un aumento de las porosidades y coeficientes de almacenamiento.

Ya se ha dicho que el control de la explotación mensual suministra datos que se pueden considerar, salvo error local, realmente inmejorables en el marco actual de la investigación. Por otra parte, compensar la disminución de la alimentación atmosférica por un incremento de las otras alimentaciones tropieza con lo factible: la principal otra alimentación es la procedente de infiltración de excedentes de riego, que difícilmente pueden aumentarse sensiblemente más ya que alcanzan del 15 al 20% del volumen de agua aplicado. Ocurre un poco lo mismo con la entrada lateral subterránea al acuífero inferior procedente del Sector <sup>Noreste</sup> nord-este, que ya es bastante elevada (unos 160 l/s, es decir unos 5 hm<sup>3</sup>/año, al final del calado).

En cuanto a los parámetros hidrodinámicos, no es verosímil que las transmisividades sean sensiblemente más pequeñas que las adoptadas, las cuales, como ya se ha dicho, están en consonancia con las sacadas de bombeos de ensayo y más bien inferiores a éstas. Por otra parte, compensar una disminución de la alimentación atmosférica por una mayor aportación procedente de las reservas, es decir, por un aumento de las porosidades y coeficientes de almacenamiento, tropieza con los valores ya bastante altos que se han puesto en el modelo.

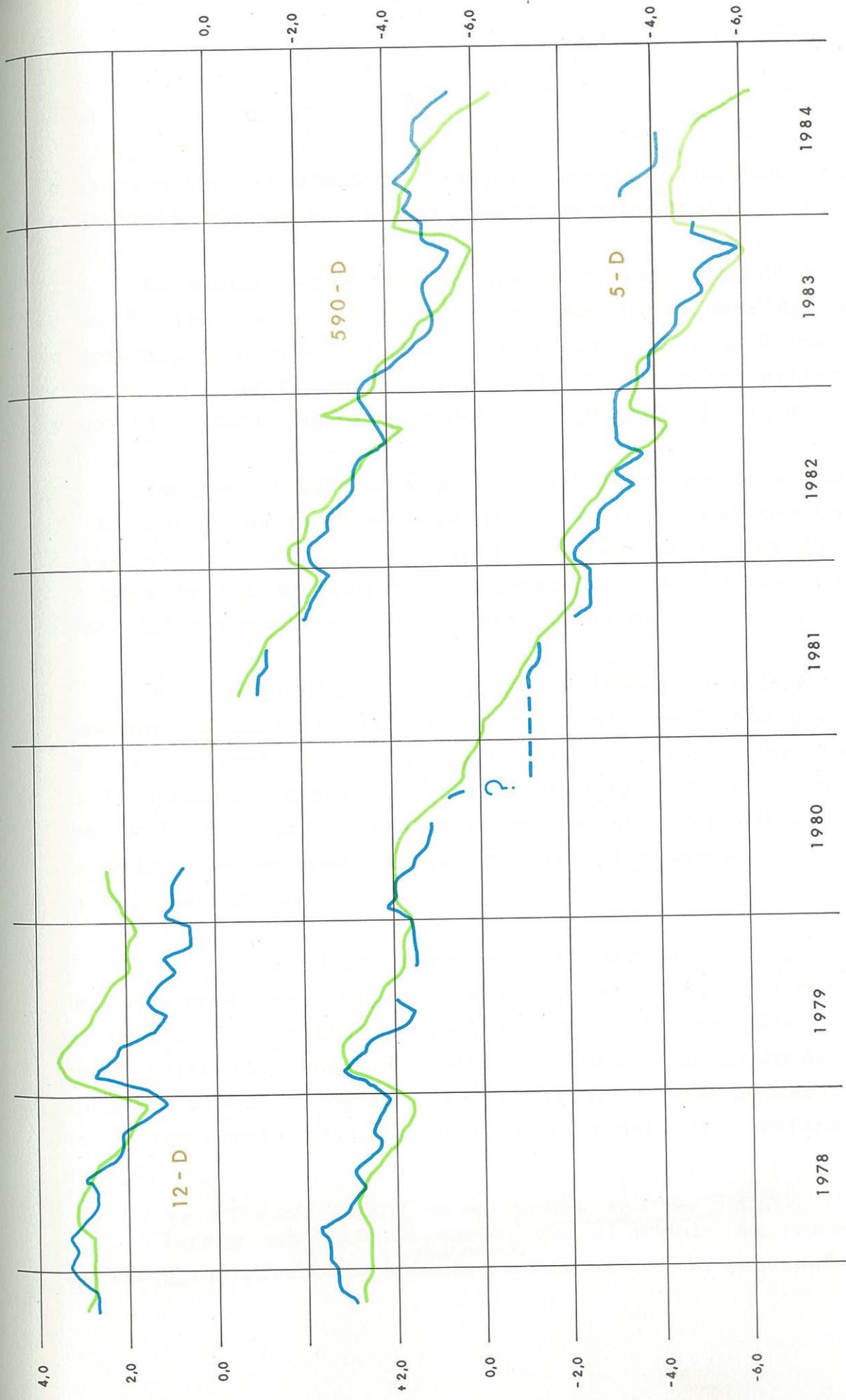
Por último, cabe observar que la restitución de las piezometrias (en mapas piezométricas y en evoluciones con el tiempo), si bien es muy aceptable, nunca peca por exceso de agua sino, en ocasiones, por falta de la misma (véase las figuras siguientes).

En consecuencia, se puede considerar que los distintos factores que entran en el modelo de flujo están correctamente



OBSERVADAS  
CALCULADAS

ACUIFERO SUPERIOR CENTRAL . EVOLUCIONES PIEZOMETRICAS



 OBSERVADAS  
 CALCULADAS

ACUIFERO INFERIOR OCCIDENTAL - EVOLUCIONES PIEZOMETRICAS

calados y que dicho modelo, aunque siempre mejorable, puede ya constituir una muy buena herramienta de simulación.

Es bastante más difícil juzgar de la bondad de la restitución de las concentraciones, tanto por la escasez de datos de comprobación (que no existen sino en la Escama de Balsa Nueva), como por el insuficiente conocimiento de los datos estructurales y por el carácter aproximado del mismo modelo de concentración.

Para el Acuífero Superior, solamente se debe considerar la Escama de Balsa Nueva, ya que la zona de Balerna carece de datos sobre la cota del substrato, y que el sector litoral de la zona de San Agustín viene enormemente influenciado por los potenciales impuestos en el modelo de flujo.

Para dicha Escama, el grado de intrusión dado por los piezómetros de control viene aproximadamente reflejado por el modelo, si se tiene en cuenta que los piezómetros suministran cotas de la interfase mientras que el modelo da zonas isoconas verticales. A lo sumo podría pensarse que la intrusión calculada es algo menor que la real, aunque es difícil comparar los dos modos de representación.

En lo que al Acuífero inferior se refiere, el único dato de que se dispone es que, en el sondeo B-9 (único que haya alcanzado dicho acuífero en su parte litoral), no parece haber todavía intrusión sensible. Según el modelo, por el sondeo pasaría aproximadamente la curva 1 (es decir 1% de agua de mar), resultado perfectamente en consonancia con el dato (no confirmado) del sondeo.

*De todos modos, no se puede afirmar que.*  
 Parece ser, por lo tanto, <sup>scptiblement</sup> que el modelo de concentración facilite <sup>scptiblement</sup> ~~informaciones~~ bastante en línea con la realidad.

En conclusión, se puede pensar que el estado de calado del modelo del Campo de Dalías (tanto el modelo de flujo como el de concentraciones) es satisfactorio (aunque mejorable), y que dicho modelo puede ser utilizado como herramienta de simulación (exceptuando unos pocos puntos como, por ejemplo, la pequeña zona de Onayar ya mencionada).

TERCERA PARTE

DISEÑO Y SIMULACIONES DE ALTERNATIVAS DE GESTION

## 1.- DISEÑO DE ALTERNATIVAS DE GESTION

### 1.1.- BREVE RECORDATORIO DE LOS ELEMENTOS DEL PROBLEMA

- La superficie regada en el Campo de Dalías (casi exclusivamente con aguas subterráneas propias) supera ya las 11 000 ha. Aunque momentáneamente congelada por decreto, dicha superficie podría más que duplicarse si existiesen recursos hídricos suficientes, aunque habría que tener en cuenta, obviamente, el aspecto de la comercialización de la producción.
- En cifras redondas, la agricultura regada "consume" unos 81 hm<sup>3</sup>/año (\*), de los que sólo 5 provienen del exterior (Canal de San Fernando y Acequia Nueva). Los 76 hm<sup>3</sup>/año restantes se reparten aproximadamente en:

|      |                      |          |          |          |            |
|------|----------------------|----------|----------|----------|------------|
| - 20 | hm <sup>3</sup> /año | desde el | Acuífero | Inferior | Occidental |
| - 14 | "                    | "        | "        | Superior | Central    |
| - 22 | "                    | "        | "        | Superior | Nor-este   |
| - 20 | "                    | "        | "        | Inferior | Nor-este   |

- También en cifras redondas, los abastecimientos urbanos dependientes del Campo de Dalías se elevan a unos 20 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales unos 14 se extraen del Acuífero inferior occidental para la ciudad de Almería y algunos pueblos más, y unos 3 se sacan de cada uno de los dos acuíferos del Sector ~~Nor-este~~ <sup>Nor-este</sup>. La importante dotación de Almería vendrá mantenida por la presa de Benínar cuando entre en funcionamiento.

(\*) media 1982-83/1983-84

- El Acuífero Inferior Occidental ha bajado unos 18 m entre 1964 y 1984, o sea, 0,9 m por año. La depresión ha sido del orden de 0,7 m/a entre 1964 y 1977 y, en los siete años siguientes (de los cuales cuatro han tenido precipitaciones escasas), dicha depresión ha sido de 1,3 m/a de promedio. Se puede pensar, pues, que la depresión media debe ser superior al metro/año en condiciones normales, y en el estado actual de la explotación. Al estar ya el nivel piezométrico a la cota - 6 m, el manto va a sufrir una intrusión marina, directamente por drenancia con el mar, e indirectamente a través de la Escama de Balsa Nueva. *¿en qué pedro?*
- El Acuífero superior central baja ligeramente en su parte occidental, y sube ligeramente en su parte oriental (sobrealimentación por excedentes de riego). No podría conllevar ninguna consecuencia grave el aumentar la explotación.
- El Acuífero superior del Sector <sup>Noreste</sup> ~~nor-este~~ baja continuamente: el punto más bajo de su superficie libre se sitúa sobre la cota -15 m, y la cota 0 m se encuentra a menos de 2 km de la <sup>costa</sup> ~~orilla~~, donde está bien establecida una intrusión a la altura de la Rambla de las Hortichuelas.
- Por último, <sup>en el área de Agüedulee</sup> el Acuífero inferior del Sector <sup>Noreste</sup> ~~nor-este~~ sufre también una intrusión marina <sup>preocupante</sup> incipiente, debido a la importancia de los bombeos de que es objeto, y de la proximidad de los mismos a la orilla del mar.
- La calidad química de las aguas de los dos acuíferos inferiores es excelente, mientras que suele ser deficiente, e incluso francamente mala, en los dos acuíferos superiores.

• La presa de Benínar está prevista<sup>o</sup> que regule unos 35 hm<sup>3</sup> / año, de los ~~cuales unos 10~~ <sup>que unos 10 son</sup> para el bajo Adra y el resto, al horizonte 2010, para Almería capital. ~~Por lo tanto, el Campo no debería recibir ninguna dotación de Benínar a largo plazo,~~ <sup>Ella supone que al</sup> ~~sin embargo,~~ <sup>llegar</sup> a lo largo del próximo cuarto de siglo, la dotación de Almería se cubrirá progresivamente, entre los 12 - 13 hm<sup>3</sup>/a actuales y los 25 previstos a largo plazo, <sup>Sobrando</sup> queda pues un volumen <sup>inicial</sup> de unos 12 hm<sup>3</sup>/año (decreciente con el tiempo hasta anularse hacia el año 2010) <sup>que puede destinarse al Campo</sup>

• La precedente estimación de regulación ~~parece algo optimista,~~ ~~no sólo en cuanto al porcentaje de regulación de las aportaciones de Adra (90%?), sino también en cuanto a la importancia misma de dichas aportaciones.~~ ~~Si, a pesar de todo, se verifican,~~ <sup>presupone</sup> quedará un caudal suplementario del orden de 4 hm<sup>3</sup>/a sin regular, que podría serlo (al menos en parte) por los acuíferos del bajo Adra y del Campo de Dalías.

• A largo plazo, <sup>parece posible</sup> está proyectado que transiten por Benínar, para su regulación, ~~las~~ <sup>que resulten excedentarias en dichas cuencas</sup> aportaciones naturales de la cuenca alta del río Guadalfeo ~~y que no tengan utilización ahí.~~

## 1.2.- PLANES TECNICOS DE POSIBLES ACTUACIONES

### 1.2.1.- Planteamientos

Los diferentes factores que se acaban de mencionar podrían permitir, mediante algunos estudios complementarios, reordenar la utilización de los recursos hídricos de la ~~comarca~~ <sup>region</sup> en función de la decisión política (fundada sobre criterios esencialmente socio-económicos) que se tome acerca de la "congelación" o del incremento de la producción agrícola del Campo. En efecto, ~~que da por decidir, en función de criterios sociales y del estado del mercado (nacional e internacional) de las hortalizas en pri-~~ ~~meros, si es preferible,~~ <sup>para llevar a cabo una planificación hidro-</sup> ~~lógica de la zona, si es preferible:~~

- mantener la producción a su nivel actual, en cuyo caso se mantendría la explotación global de los acuíferos del Campo, se buscaría a corto plazo un paliativo a la intrusión, y se procuraría llegar a largo plazo a un sobrequílibrio de los acuíferos más afectados por dicha intrusión.
- incrementar muy rápidamente la producción, poniendo en cultivo la mayor parte posible del Campo; en este caso, se trataría de una explotación casi minera de los recursos hídricos, que se traduciría o bien por una intrusión marina amplia en un número de años que queda por determinar, o bien por actuaciones cada vez más costosas para mantener los biseles salados dentro de límites aceptables.
- incrementar la producción por etapas, pasando a la fase siguiente sólo cuando hayan sido controlados los efectos de la anterior, y diseñadas (y cuantificadas económicamente) las actuaciones hidrogeológicas necesarias para que se desarrolle dicha fase siguiente sin consecuencias dramáticas. *Entre otras actuaciones, controlar la impregnación de recursos al Campo.*
- no programar nada y actuar a posteriori, como se ha hecho hasta ahora.

En el aspecto estrictamente hidrogeológico de garantizar un recurso duradero, es obvio que debe ser preferida la primera decisión, cuyas repercusiones hidrogeológicas son de solución relativamente fácil. Pero tropieza con <sup>una posible deficiencia</sup> la mediocridad del aprovechamiento <sup>regional</sup> del agua y con el concomitante estancamiento socioeconómico <sup>de la zona</sup>, razones por las cuales se debe más bien elegir la tercera decisión. En cuanto a la segunda, sólo tendría cabida en el supuesto de que así lo aconsejen muy fuertes condicionantes

o la garantía de impositión de los recursos hídricos necesarios en su momento, desde otros cuencos, etc.  
 sociales y/o económicos. No parece útil hablar de la cuarta de  
 cisión, que suma los inconvenientes de las otras sin tener sus  
 ventajas.

Cualquiera que sea el tipo de decisión tomada (incluso la  
 cuarta), habrá que actuar en el campo hidrogeológico y (salvo  
 para la cuarta) reordenar la utilización de los recursos hídri-  
 cos. Ello puede efectuarse según varias modalidades en función  
 de la "política del agua" que se adopte:

- Una podría ser el reequilibrar el balance de los flujos  
 para cada uno de los acuíferos del Campo (lo que implica  
 necesariamente una reducción de los bombeos y/o una apor-  
 tación de recursos exógenos).
- Otra sería buscar el reequilibrio tan sólo para los acuí-  
 feros que, en caso contrario, padecerían una intrusión  
 marina (lo que permitiría una tercera vía competitiva,  
 la de bombear menos en los acuíferos "con riesgo" y más  
 en los otros, concretamente en el Superior Central, de calidad que  
 es sólo médicamente aceptable)
- Una variante de la anterior consistiría en reconstituir,  
 en el Acuífero Inferior Occidental, las reservas hasta  
 la cota cero, y luego contentarse con un equilibrio de  
 los flujos.
- Otra podría ser el oponerse localmente (es decir, cerca  
 de la orilla del mar) a la intrusión marina, y seguir  
 explotando los acuíferos de forma "minera" hasta un tér-  
 mino por definir y elegir (por ejemplo, un horizonte tem-  
 poral determinado, a partir del cual otros recursos,  
 competitivos, puedan ser disponibles; o un umbral econó-  
 mico, que sería un costo determinado de las actuaciones

contra la intrusión ya que, grosso modo, estas últimas costarían tanto más cuanto más importante sea la depresión con respecto al nivel del mar).

Es necesario, pues, contemplar varios parámetros, no independientes por cierto, de los cuales los más importantes son el tiempo, la factibilidad técnica de las actuaciones, y el costo de las mismas.

En particular, la situación actual obliga a tomar medidas locales para luchar contra la intrusión marina y evitar que se amplie, siendo insuficiente el sólo reequilibrio de los balances para que, a corto plazo, desaparezcan los biseles salados. Ello no impide, sin embargo, que ya se empiece a actuar en este sentido.

También existen, de todas formas, problemas de factibilidad. Crear, por ejemplo, una barrera hidráulica en una formación tan transmisiva como el Acuífero inferior del Sector nord-este equivale a que se pierda mucha agua en el mar. Este mismo problema ya no se daría a la misma escala en la Escama de Balsa Nueva, ya que su escasa superficie y sus transmisividades medianas deberían permitir la obtención de la barrera hidráulica con relativa facilidad. En cuanto a la aportación "directa" de agua de mar al Acuífero inferior occidental, su escaso caudal, si se confirmase, no plantearía demasiados problemas, por lo menos a corto y medio plazo.

En lo que respecta a la reconstitución de reservas, podría tropezar con el problema de los volúmenes de agua a poner en juego, y de su coste: reconstituir, en el Acuífero inferior occidental, reservas hasta la cota cero "costaría" un mínimo de  $32 \text{ hm}^3$  - (es el volumen de agua "desaturada" según el modelo, entre la

cota cero y la cota piezométrica de finales de 1984); este volumen equivale aproximadamente a un año de explotación actual, o a un año de regulación por la presa de Benínar. Es mucho, pero no fuera de alcance puesto que se puede disponer, al menos durante varios años, de la dotación a largo plazo prevista para el abastecimiento de Almería.

En resumen, podrían fijarse los siguientes "planes técnicos" referidos a la reordenación de la utilización de los recursos hídricos de la región:

- para el Acuífero inferior occidental (es decir, concretamente, actuando en la Escama de Balsa Nueva) y, en su caso, para el Acuífero superior nord-este, crear barreras hidráulicas de ejecución rápida y relativamente barata (aunque no sean óptimas) para frenar la intrusión marina.
- para el conjunto de los acuíferos del Campo, excepto el superior central, tender a reequilibrar el balance de flujos entre entradas y salidas, mediante disminución de las últimas (promoviendo una política de ahorro, y sustituyéndolas parcialmente por aguas derivadas de Benínar y/o bombeadas desde el Acuífero superior central), e incremento de las primeras por recarga artificial a partir de las aguas de esta presa (tanto la dotación regulada destinada a las necesidades futuras de Almería, como los eventuales excedentes sin regular).

Al fin y al cabo, las operaciones correspondientes son de tres tipos:

- Redistribución espacial de la explotación, es decir utilizar de otra forma el agua disponible, tanto los recursos internos como los externos, con el fin de reducir la explotación de

los acuíferos con riesgo de intrusión, sin que por ello sufran un perjuicio grave los utilizadores actuales.

- Promoción del ahorro de agua, es decir reducir las pérdidas, tanto con el agua de riego como en la de abastecimiento.

- Realimentación artificial de los acuíferos a partir, esencialmente, de las aguas que transitan por el embalse de Benínar. Esta forma de actuar permitirá:

- . "poner a flote" los mantos con dificultades.
- . utilizar varios embalses naturales para regulación, en complemento de Benínar.
- . utilizar este último casi en régimen continuo (en el sentido de convertir los desembalses obligados en derivación de volúmenes para recarga), lo que redundaría en un incremento de rentabilidad de las instalaciones.

#### 1.2.2.- Redistribución espacial de la explotación

Existen dos opciones:

- Utilizar sólo los recursos actuales, es decir los de los cuatro acuíferos del Campo (ya que no se prestan a mucha reordenación los recursos traídos por los pequeños canales de San Fernando y de Fuente Nueva), habida cuenta de que el abastecimiento de Almería se realice a partir de Benínar, y no ya de los acuíferos del Campo.

El principio básico de la redistribución consiste en aliviar el grado de explotación del Acuífero inferior occidental y del Acuífero superior nor -este, incrementar el del Acuífero inferior central, y procurar que la explotación del Acuífero inferior nor -este sea menos vulnerable a la intrusión marina (bombeos más alejados de la costa y a menor profundidad).

En principio la redistribución de la explotación conlleva necesariamente implicaciones de bombeos y de transporte del agua. Para ello se dispone de:

- Tres canales Este-Oeste (los de los sectores I, II y III) y un canal Oeste-Este (el del sector IV), cedidos por el IRYDA a la Comunidad Sol y Arena. De los cuatro canales, los dos primeros se alimentan únicamente del Acuífero inferior nord-este, cuya explotación no puede ser incrementada, ni siquiera a cambio de un control riguroso de la intrusión marina; el tercero y el cuarto utilizan las aguas de los acuíferos superior nord-este e inferior occidental, respectivamente, de los cuales se desea reducir la explotación.
- Una red privada de extracción y transporte del agua. Si bien están conocidos los puntos de extracción, no ocurre lo mismo con las conducciones. De todas formas, al ser privadas las instalaciones, sería deseable (para no duplicarlas) encontrar una fórmula que permitiese al Organismo de cuenca el poder utilizar las mismas (o la parte de ellas que resulten necesarias).

Se ve, por lo tanto, que la redistribución espacial de la explotación tropieza con varias dificultades:

- Un problema logístico: los canales existentes se alimentan por acuíferos sobreexplotados o cuya explotación necesita un control riguroso, mientras que ningún canal pasa encima del único acuífero utilizable (el superior central); en lo que a conducciones se refiere, forman una red de la que no existe plano de conjunto.
- Un problema legal, ya que todas las instalaciones de extracción y de transporte pertenecen a particulares (persona físicas o morales).
- Un problema técnico-legal, ya que las aguas del único acuífero utilizable tienen una calidad hidroquímica mediocre, y que es difícil obligar a un regante a utilizar un agua peor que la que venía utilizando, aunque, por mezcla, se consiga un agua de substitución de aceptable calidad para los cultivos.

Esta solución, por consiguiente, parece de aplicación bastante difícil. Quizás sea más sencillo jugar la carta de la incitación, limitándola al binomio Acuífero inferior occidental/Acuífero superior central.

En este sentido, el Organismo de Cuenca podrá realizar, al SE de El Ejido, una batería de sondeos capaz de extraer 100 ó 200 l/s, y ceder el agua (de forma gratuita o por un precio muy atractivo) a los utilizadores del Acuífero inferior que lo aceptasen. Para evitar la multiplicación de los gastos de enganche, este agua podría proponerse en prioridad a los regantes más importantes, lo que no resulta muy social pero seguramente más rentable. Esta solución permitiría reducir en unos 5 hm<sup>3</sup>/a la explotación del Acuífero inferior, si resultase suficientemente atractiva para los regantes. No es mucho, pero no es incompatible con ninguna otra actuación.

• También se pueden incorporar recursos externos directamente utilizables que, hoy en día, sólo pueden proceder de la cuenca del Adra. En ellos cabe distinguir:

- Los volúmenes regulados por la presa de Benínar, y traídos al Campo mediante el Canal del mismo nombre.
- Los volúmenes del Adra sin regular por la presa, y que también podría traer el Canal.
- Los volúmenes eventualmente bombeados en el acuífero dolomítico drenado por las fuentes de Marbella.
- Los volúmenes eventualmente bombeados en los acuíferos (aluvial y plioceno) del delta del Adra.

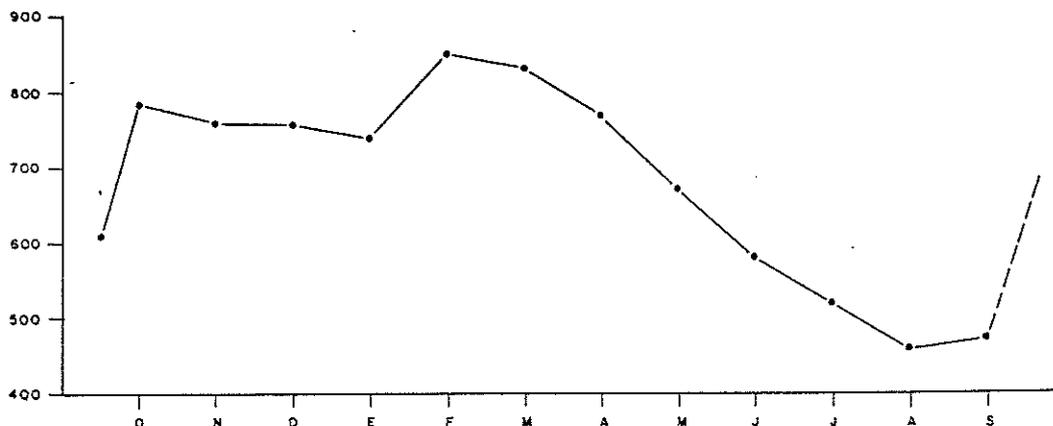
La peculiar problemática de la utilización de estos recursos viene estudiada en el párrafo siguiente.

### 1.2.3.- Utilización de los recursos del Adra

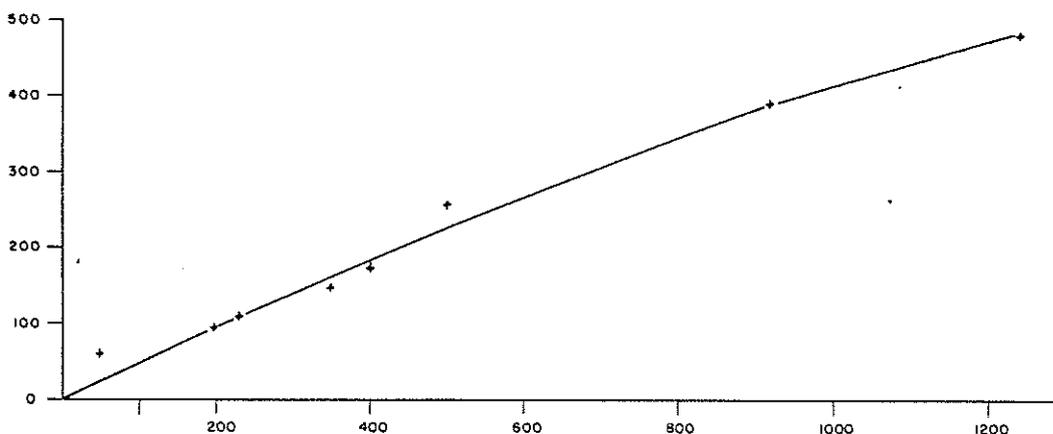
#### • Medio Adra

Justo aguas abajo de la presa de Benínar, el río Adra va encajado en un cañón a través de las dolomías de la ventana tectónica de Turón. En la salida de dicho cañón, el río recibe las aguas de las fuentes de Marbella, que surgen en su propio cauce.

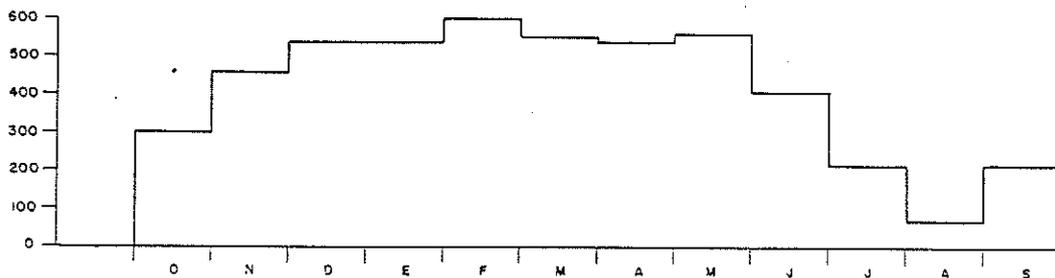
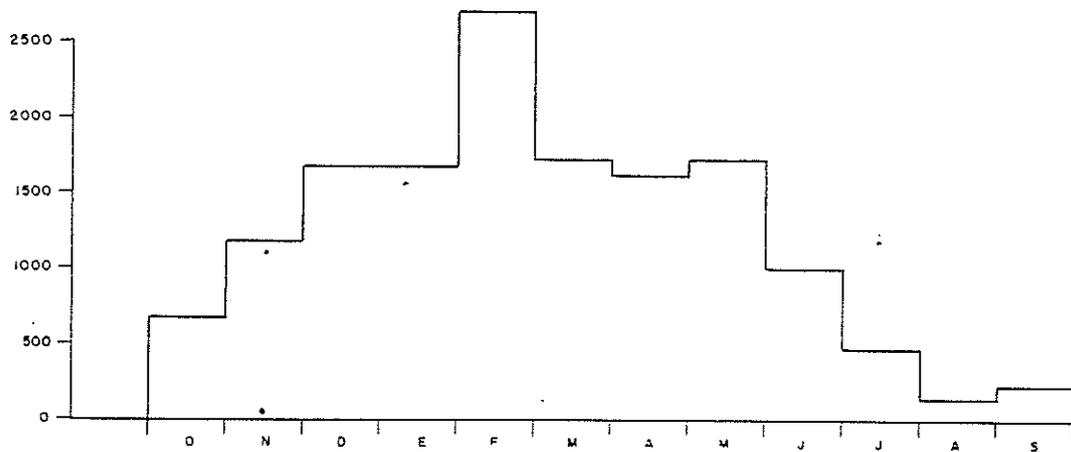
A pesar de las dificultades de aforo, un ensayo de reconstitución del hidrograma medio de las fuentes (SGOPU, informe interno, Junio de 1981) dió un caudal medio de unos 675 l/s (= 21,3 hm<sup>3</sup>/a), con un máximo de 850 l/s en febrero y un mínimo de 460 l/s en agosto.



Por otra parte (SGOPU, informe interno, abril de 1982,) se ha intentado confirmar y cuantificar las pérdidas  $Q_p$  del río Adra a su paso por el cañón dolomítico entre la presa y Marbella, en función de su caudal  $Q$ . A pesar de que, en dicho informe, se admite una relación lineal entre pérdidas y caudal del río ( $Q_p \simeq 0,42 Q$ ), parece más adecuada (a la vista de los puntos representativos presentados), una relación lineal ( $Q_p \simeq 0,46 Q$ ) para  $Q \leq 500$  l/s, y luego una relación más bien parabólica, con una asíntota para  $Q_p$  igual o algo superior a 600 l/s (J.P. Thauvin, tesis, 1986).



Aplicando la curva resultante al hidrograma medio del Adra en la presa (de caudal medio interanual  $38,6 \text{ hm}^3/\text{a}$ ), se puede calcular que, en término medio, el Adra pierde por el cañón unos 415 l/s ( $= 13,1 \text{ hm}^3/\text{a}$ ), es decir la tercera parte de su caudal.



Si se considera que dicho caudal vuelve a salir por las fuentes de Marbella, se puede decir que, si se secase el río Adra en el cañón (por el efecto de la presa de Benínar), el caudal propio de dicha fuente sería del orden de 260 l/s en media interanual, es decir unos 8,2 hm<sup>3</sup>/a.

Es importante señalar que ha sido comprobado (entre otras pruebas, por coloración con fluoresceína) que pertenecen al mismo sistema hidrogeológico las dolomías situadas debajo del embalse, las drenadas por las fuentes de Marbella, y las drenadas por el río Chico (ventana de Peñarrodada).

Caben ahora algunas observaciones:

- La cota piezométrica de las fuentes de Marbella es del orden de 165 m, pero era de unos 180 m en los sondeos de reconocimiento del embalse de Benínar. Existe, pues, un gradiente en

tre el embalse y Marbella, así como entre el mismo y los sondeos que explotan la ventana de Peñarrodada. Si se consigue impermeabilizar totalmente el vaso de Beninar, es posible que se reduzca la alimentación de Marbella, pero también la de Peñarrodada.

Por otra parte, y sobre todo, la puesta en servicio de la presa provocará una merma muy importante (e incluso una anulación casi completa durante los meses y años secos) de las infiltraciones del río Adra en el cañón, y por tanto de la alimentación de las fuentes de Marbella, pero también, probablemente, de la alimentación de la ventana de Peñarrodada (en la medida en que parte de las pérdidas se produzcan en la entrada del cañón y, por lo tanto, puedan disponer de un gradiente suficiente hasta Peñarrodada).

- Las cotas piezométricas de los sondeos de Peñarrodada van bajando. Son ahora iguales, o algo inferiores, a las de Marbella, mientras que les eran superiores en 2 ó 3 m anteriormente. Cabe esperar, por lo tanto, que el caudal de las fuentes vaya disminuyendo en beneficio de la zona de los sondeos de explotación.

#### • Bajo Adra

El delta, de unos 12 km<sup>2</sup> de superficie, alberga dos acuíferos (un aluvial libre, y un plioceno confinado). Ambos descargan al mar un cierto caudal, como lo demuestran las fotografías aéreas en infrarrojo (1985).

Las demandas del Adra son de dos tipos. Por una parte, la demanda urbana corresponde a la de 18 150 habitantes (más unos 2 200 durante el verano), a los cuales se añaden unos 700

habitantes de barriadas situadas al Oeste. Se puede estimar en unos  $5\,500\text{ m}^3/\text{día}$  la demanda total en verano y en  $4\,100\text{ m}^3/\text{día}$  - la del resto del año. El abastecimiento se realiza únicamente en aguas subterráneas, mediante una toma de 25 l/s en las fuentes de Marbella y bombes en el sondeo 164-Ad que explota las calcarenitas pliocenas; además, dos pequeñas galerías traen unos 2 l/s cada una a las fuentes públicas del pueblo de Adra. No hay, por tanto, ningún problema de abastecimiento (incluso para los próximos veinte años), aunque sí hay una servidumbre de unos  $2,6\text{ hm}^3/\text{a}$  que habrá que mantener cuando la entrada en servicio de la presa altere el régimen de las fuentes y la alimentación del delta.

Por otra parte, hay una demanda agrícola para regar 2 030 ha, que puede estimarse (en base a una dotación de  $6\,500\text{ m}^3/\text{año}$  por hectárea) en unos  $13,2\text{ hm}^3/\text{año}$ . Al cubrir la actual zona regada la casi totalidad de las tierras cultivables, no cabe esperar un importante incremento de la demanda agrícola. El agua de riego proviene en parte de pozos caseros que captan el acuífero aluvial, y, en mayor proporción, del mismo río Adra mediante cinco boqueras.

La última servidumbre del delta la constituye el Canal de San Fernando que, mediante galería y dos pozos de bombeo, lleva al Campo de Dalías un volumen anual del orden de  $4,3\text{ hm}^3$ .

En total, la demanda del delta (incluyendo las servidumbres) puede ser estimada en unos  $20,1\text{ hm}^3/\text{a}$ , de los cuales unos 7,2 (abastecimiento y canal de San Fernando) se reparten de forma aproximadamente constante a lo largo del año.

La alimentación del sistema hídrico del delta puede ser estimada en unos  $2,5\text{ hm}^3/\text{año}$ , por lluvia útil en el mismo delta

y en su cuenca vertiente. Pero también, y sobre todo, consiste en una parte importante de las aguas del río Adra. Puesto que la demanda agrícola se abastece en gran parte por el mismo río, no cabe aquí distinguir entre aguas subterráneas y superficiales. Los recursos correspondientes pueden ser cuantificados. Por una parte, es el caudal del mismo río a su salida del cañón (justo aguas arriba de las fuentes de Marbella) que, a partir de los datos del SGOPI, puede estimarse en 25,5 hm<sup>3</sup>/a; por otra parte, es el caudal de Marbella, cuantificado en 21,3 hm<sup>3</sup>/a; por último, es la aportación de la cuenca intermedia (incluyendo el río Chico), que debe ser del orden de 8 hm<sup>3</sup>/a.

La alimentación total actual del delta, por lo tanto, debe ser del orden de 57 hm<sup>3</sup>/a.

Cuando se ponga en servicio la presa de Beninar, no se verán afectadas las alimentaciones del mismo delta (2,5 hm<sup>3</sup>/a) ni las procedentes de la cuenca intermedia (8 hm<sup>3</sup>/a). Pero el caudal de las fuentes de Marbella se reducirá a unos 8,2 hm<sup>3</sup>/a y, del caudal del mismo río, sólo quedará el 10% sin regular, es decir 3,8 hm<sup>3</sup>/a. Los recursos globales interanuales, por lo tanto, alcanzarán los 22 hm<sup>3</sup>/a, es decir un 10% más que la demanda a medio plazo.

#### • Conclusiones

En consecuencia, puede decirse que está cubierta la demanda, hasta bien entrado el próximo siglo (aunque conviene recordar que el caudal de la fuente de Beninar puede disminuir si se incrementan las explotaciones por bombeo en la ventana de Peñarrodada). Por lo tanto, no se trata tanto de buscar nuevos recursos para el delta cuando esté en servicio la presa de Bení

nar, sino más bien de regular lo mejor posible los que queden. Para ello, se dispone de varios sistemas hidrogeológicos:

- el delta aluvial: sus reservas pueden ser del orden de los  $100 \text{ hm}^3$ , lo que sobraría para atender a las demandas durante los meses secos, e incluso durante los años secos (con la condición de que no se sucedan varios seguidos). Pero, al tratarse de un acuífero costero, no tienen mucha importancia las reservas, sino más bien el caudal de salida al mar (o la carga de agua dulce) que sea suficiente para mantener la cuña salada a una profundidad tal que no ocasione perjuicio alguno.

La fórmula de Ghyben-Herzberg permite tener una idea de la carga que habría que mantener. Admitamos que, para que no se manifieste el fenómeno de "up coning" en curso de bombeo, se tiene que mantener la interfase (ficticia) sobre la cota -80 m en el sector de bombeo que, lógicamente, estaría hacia la parte alta del delta, es decir, a unos 2 km de la orilla del mar. En este caso, habría que mantener una cota piezométrica del orden de + 2 m en dicho sector (lo que daría un gradiente de  $1 \cdot 10^{-3}$  hacia el mar). En este sector, la cota piezométrica es actualmente de + 5 m en estiaje, lo que deja un apreciable margen de maniobra. Por otra parte, es obvio que el riesgo de intrusión marina disminuiría si el substrato impermeable del acuífero aluvial estuviese a una profundidad relativamente escasa (algunas decenas de metros).

Se puede suponer, por lo tanto (y mientras no se realice el indispensable complemento de estudio), que el

acuífero aluvial aguantaría un incremento de explotación, incluso relativamente importante si fuera de corta duración.

- el delta plioceno: está muy mal conocido, pero podría dar lugar, en caso de urgencia, a una explotación de complemento.
  
- las dolomías de Marbella-Peñarrodada: nada impide que se exploten, temporalmente, por uno o varios sondeos cerca de las fuentes de Marbella, para garantizar el complemento de caudal necesario durante las épocas secas. No se puede perder de vista, no obstante, que cualquier explotación forzada de las fuentes conllevará una disminución paulatina del caudal natural, llegando a su agotamiento. Pero se sabe resolver este tipo de problema que, por cierto, no es esencialmente hidrogeológico sino también económico y, en su caso, jurídico.

Se puede sacar de todo lo que antecede unas conclusiones generales. Aún en el caso de que se consiguiese la regulación esperada del río Adra por la presa de Beninar, con todas las consecuencias negativas para los recursos del bajo Adra, estos últimos seguirían siendo suficientes sin que se tenga que recurrir a una parte de los volúmenes regulados por la presa: a escala interanual, estos recursos "residuales" bastarían para atender a las necesidades actuales y futuras del bajo

Adra; sólo se plantearía un problema de regulación, que se podría resolver gracias a los acuíferos del delta y de la unidad de Marbella-Peñarrodada.

En la medida en que se asegura que los vecinos del bajo Adra van a disponer de los mismos caudales que utilizan actualmente y que podrán utilizar a medio plazo, y ello con una garantía del 100% que no tienen hoy en día, y si, además, la autoridad competente se hace cargo (total o parcialmente) de los gastos de bombeo, ¿es realmente indispensable atribuir al bajo Adra una parte de los volúmenes regularizables por el embalse de Benínar, como está previsto actualmente?.

Por otra parte, ¿es indispensable intentar (mediante un gasto que puede ser muy importante) impermeabilizar el vaso de Benínar, puesto que las fugas van a pasar en el acuífero dolomítico de Marbella (que ya produce una cierta regularización natural, fácilmente mejorable mediante sondeos cercanos a la fuente), y puesto que los excedentes sin regularizar pueden serlo, al menos en parte, en el delta del Adra? No se trata aquí de negar la importancia de la presa de Benínar, sino sólo de proponer que los estudios y obras previstos en el embalse no busquen una impermeabilización total (en caso de que fuera posible) para obtener la regularización prevista, sino únicamente permitir una capacidad suficiente para que dicha regularización pueda ser alcanzada conjuntamente con el embalse, el acuífero de Marbella, y el del delta.

#### 1.2.4.- Promoción del ahorro de agua

Se trata simplemente de medidas de sentido común, que conviene recordar sin desarrollarlas.

En lo que se refiere a las aguas urbanas, y sin entrar en la rentabilidad de colocar contadores individuales y renovar periódicamente la red de distribución, sólo se puede indicar que, si se creasen plantas depuradoras para los principales núcleos del Campo, convendría intentar reutilizar las aguas depuradas, directamente o por infiltración provocada hacia el manto más adecuado.

En lo que respecta a las aguas de riego, conviene hacer dos observaciones. La primera es que, por lo visto, se utiliza una dotación sensiblemente superior (del 10 al 20%) a la que realmente demanda el cultivo; si bien es cierto que los excedentes se infiltran, lo hacen con pérdida de calidad hidroquímica (y contaminación por nitratos, etc.) y, muy a menudo, los volúmenes infiltrados van a parar a los mantos superiores en zonas donde ya no son utilizables por la mala calidad del agua; es, por lo tanto, agua perdida en su mayor parte. La segunda observación se refiere a las técnicas de riego. Ya la mayoría de los agrónomos opinan que el goteo, además de otras ventajas, permite ahorrar el agua. Sería deseable, pues, que las autoridades atribuyeran ayudas para fomentar la instalación del goteo. El importe de dichas ayudas es casi derisorio frente al coste de las actuaciones de salvamiento de los mantos invadidos por el agua de mar, y un ahorro de agua permitiría además frenar el incremento del coste de bombeo del agua a profundidades cada vez mayores.

### 1.2.5.- Recarga artificial

#### o Reconstitución de reservas

##### a) Acuífero inferior occidental:

En el estado actual, el desequilibrio entre la explotación y la alimentación desde la superficie supera los  $20 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Afortunadamente, el Acuífero superior central aporta unos  $5 \text{ hm}^3/\text{a}$ . El resto del déficit proviene o bien de la disminución de reservas ( $6,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ ), o bien del Acuífero inferior nord-este ( $5,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ ) que también empieza a tener problemas de intrusión, o bien de la Escama de Balsa Nueva ( $3,5 \text{ hm}^3/\text{a}$ ) que no tardará mucho en aportar agua salada en vez de agua dulce.

Si bien es verdad que la disminución de las reservas no constituye ningún hecho grave en sí (sólo incrementa la altura de bombeo), la depresión piezométrica consiguiente va incrementando la aportación del Acuífero inferior nord-este, y va vaciando las reservas de la Escama (por lo que será cada vez mayor la aportación de agua salada a través de la misma). Y ello, además, en el supuesto de que la aportación "directa" de agua de mar al Acuífero sea mínima o pueda ser impedida.

Si se recuerda que un mínimo de  $32 \text{ hm}^3$  sería necesario para reconstituir las reservas hasta la cota cero, se ve claramente que la inyección de cualquier caudal, de calidad suficiente, debe ser estudiada con interés.

El criterio de calidad, por cierto, puede ser contemplado con cierta desenvoltura, ya que la muy buena calidad de las aguas de este acuífero permite su mezcla con aguas relativamente medias.

Por otra parte, el hecho de que el techo del manto se encuentre a cotas negativas sin salidas posibles, permite no preocuparse de la rentabilidad hidrodinámica de la recarga, ya que toda el agua inyectada se quedará en el manto hasta que su nivel alcance la cota cero.

Por último, y puesto que se trata de reconstituir reservas (y no presiones locales) y en un acuífero de excelentes transmisividades, casi cualquier sector de recarga puede convenir, si es favorable a la luz de otros criterios (calidad suficiente del agua de recarga, proximidad de la misma, instalaciones disponibles o de fácil realización, etc.).

En resumen, y al margen de la propia técnica de recarga, el Acuífero inferior occidental presenta condiciones óptimas para realizar una recarga que tenga por objetivo el reconstituir reservas o, por lo menos, el evitar que éstas sigan empobreciéndose, ya que:

- todo volumen inyectado se quedará en el acuífero y contribuirá al objetivo perseguido
- casi cualquier punto de dicho acuífero es propicio a una realimentación
- casi cualquier agua de calidad no francamente mala puede utilizarse, ya que el resultado de la mezcla seguirá siendo aceptable.

Es obvio que estas afirmaciones, a pesar de su carácter aparentemente perentorio, deberán ser confirmadas: las dos primeras podrán serlo fácilmente por simulación con el modelo matemático; en cuanto a la tercera, convendrá tener en cuenta no solamente las respectivas concentraciones en sales, sino también los distintos aspectos físico-químicos (en particular la temperatura)

que pudiesen favorecer una cierta sedimentación del agua inyectada encima de la natural, en vez de la perfecta mezcla que se pretende obtener.

b) Acuífero superior central

La problemática es radicalmente diferente.

Por una parte, el acuífero está compartimentado, debido a las barreras de transmisividad relacionadas con la estructura geológica. Por otra parte, las distintas zonas no están todas igualmente explotadas (por la calidad del agua y/o del acuífero). Debe reservarse la realimentación, por lo tanto, a las zonas en las que, a la vez:

- existe una explotación fuerte (indicio de un buen aprovechamiento)
- la explotación ha producido depresiones que sería deseable invertir
- el agua inyectada tiene buenas posibilidades de quedarse (en su totalidad o en su mayor parte).

Vienen excluidas, en consecuencia, la totalidad de las zonas de Guardias Viejas y de San Agustín, zonas costeras de deficiente calidad hidroquímica en las cuales el agua inyectada se volvería inadecuada para cualquier uso y, además, acabaría por perderse al mar o evaporarse en las lagunas y marismas.

También queda excluida la parte oriental de la zona de Santa María, en la cual el manto va subiendo.

Se excluye por fin, en principio, la zona de Balerna, en la cual la solución a las cotas negativas que se encuentran en

algunos puntos no radica en la reconstitución de reservas sino de niveles, e incluso en la mayor utilización de recursos externos (canal de San Fernando).

Por último, una realimentación de la zona de Los Alacranes (sin explotar) sólo tendría sentido si con ella se pretendiese recargar al Acuífero inferior occidental.

Por lo tanto, las únicas zonas candidatas, eventualmente, a una recarga artificial serían la de Onayar y la mitad occidental de la de Santa María.

La primera es muy pequeña (unos  $9 \text{ km}^2$ ) y prácticamente rodeada de barreras de transmisividad. Muy explotada (relativamente) en el pasado, se encuentra ahora casi abandonada, y su superficie libre sube progresivamente. Una realimentación con caudales relativamente escasos haría más rápida esta evolución, pero sólo tendría sentido si el agua se volviese a utilizar.

En cuanto a la mitad occidental de la zona de Santa María, es la más explotada (en cuantía y en intensidad espacial), de todo el acuífero. En ella se ubican (sobre todo al Norte) las menos malas calidades hidroquímicas, así como las mejores transmisividades (y, por lo tanto, los mejores caudales de bombeo). Aunque las depresiones no puedan provocar situaciones alarmantes como, por ejemplo, una intrusión marina, es evidente que incrementan los costes de bombeo, tanto por la mayor elevación del agua bombeada como, a mayor plazo y localmente, por la disminución de los caudales provocada por la cada vez menor transmisividad (menor espesor saturado, y peor permeabilidad hacia la base acuífero). Por lo tanto, una realimentación artificial no es aquí indispensable, pero puede ser contemplada para utilizar un agua excedentaria si la hubiese.

La segunda componente de la particular problemática de la recarga en el Acuífero superior central es la de la calidad del agua.

Ya se sabe que el agua natural del manto no es de muy buena calidad. Aunque las técnicas de riego que aquí se utilizan permitan una mayor tolerancia, ésta tiene sus límites. Por otra parte, si se pretende incitar los regantes a utilizar más el agua de este acuífero y menos la del Acuífero inferior, es conveniente ir mejorando (dentro de lo posible) la calidad de aquel agua, por lo que es imprescindible que el agua de reinyección sea de buena calidad.

c) El Acuífero superior del Sector nord-este

En resumen, se puede subrayar los puntos siguientes:

- una realimentación con fines de reconstitución de las reservas no tiene sentido en la zona litoral (Roquetas), en la cual basta con mantener o aumentar las cargas hidráulicas,
- tampoco tiene sentido en la zona de la Gangosa, donde problemas de calidad química del manto imponen que, con anterioridad, sean aclaradas las causas de la salinidad anormal,
- sólo queda, de momento, la zona de El Viso en la cual se aprecian depresiones muy importantes. Si se llegara a demostrar que esta zona estuviese alimentada (por drenancia) por el acuífero inferior, una recarga en el Viso disminuiría la diferencia de carga entre ambos mantos y aliviaría al inferior, muy solicitado al Oeste (alimentación al Acuífero inferior occidental, y bombeos de la zona de El Aguila) y sobre todo al Este (bombeos de la zona de Aguadulce).

d) El Acuífero inferior del Sector nor -este

No conviene, de momento, contemplar una realimentación artificial en este acuífero, de cuya hidrodinámica los conocimientos presentan todavía bastantes lagunas. No sería razonable inyectar agua, de la cual una parte probablemente importante se perdería al mar, además del hecho de que las fuertes transmisividades harían difícil el restablecimiento de un gradiente suficiente como para oponerse a una intrusión marina. El problema tendría mejor solución a través de una redistribución de la explotación.

● Reconstitución de potenciales en borde del mar

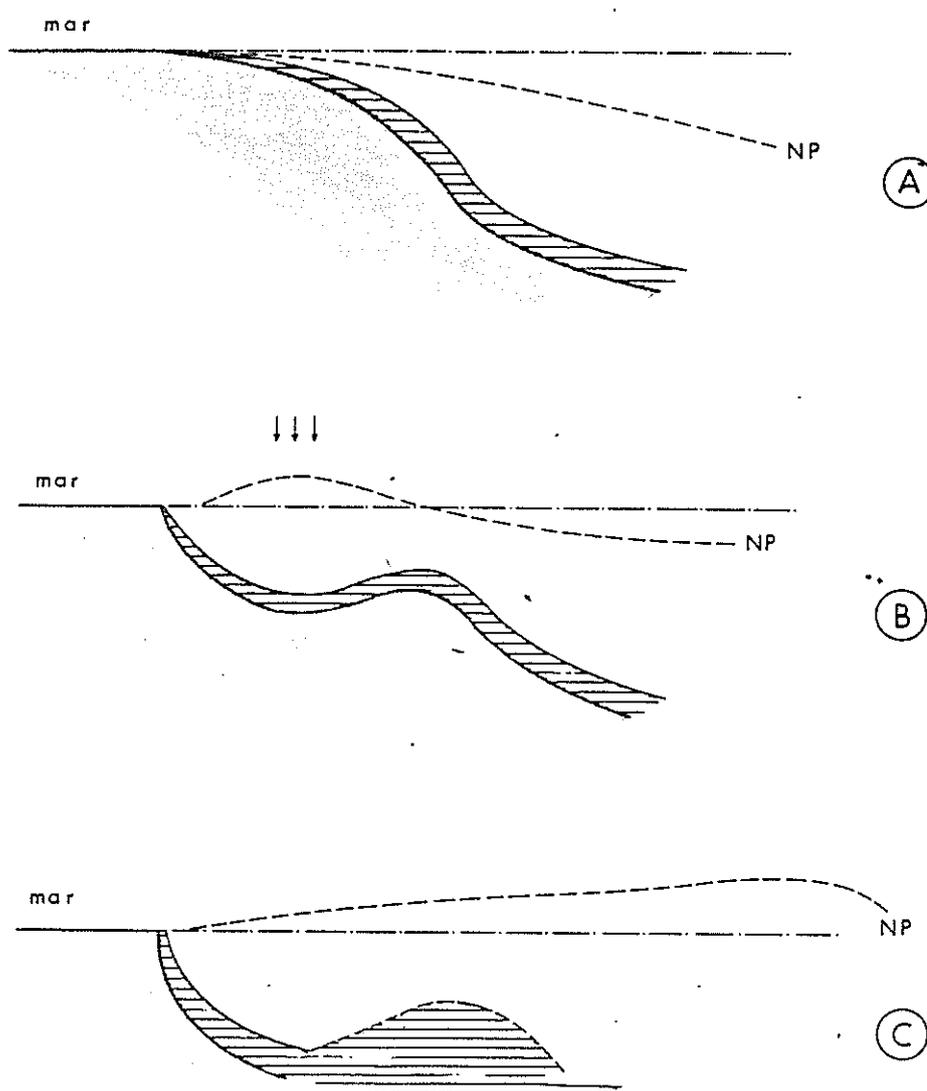
Es obvio que una reconstitución de reservas conlleva la de los potenciales. Sin embargo, este último resultado puede conseguirse de forma mucho más económica (es decir, con volúmenes de agua sensiblemente inferiores) si la recarga se limita a la parte litoral del acuífero. En este caso están la Escama de Balsa Nueva (si se la considera como parte costera del Acuífero inferior occidental), y la zona de Roquetas.

a) Escama de Balsa Nueva

Puesto que la Escama actúa como zona de paso entre el mar y el Acuífero inferior occidental, las cotas piezométricas negativas de este último hacen ineluctable su invasión por el agua de mar que ya ha invadido gran parte de la Escama. Aunque esta vía de contaminación no sea la única (pero, según el modelo, es la más importante), el hecho de volver a tener potenciales positivos en este pequeño acuífero de paso tendría el interés de disminuir sensiblemente la intrusión marina en el Acuífero inferior.

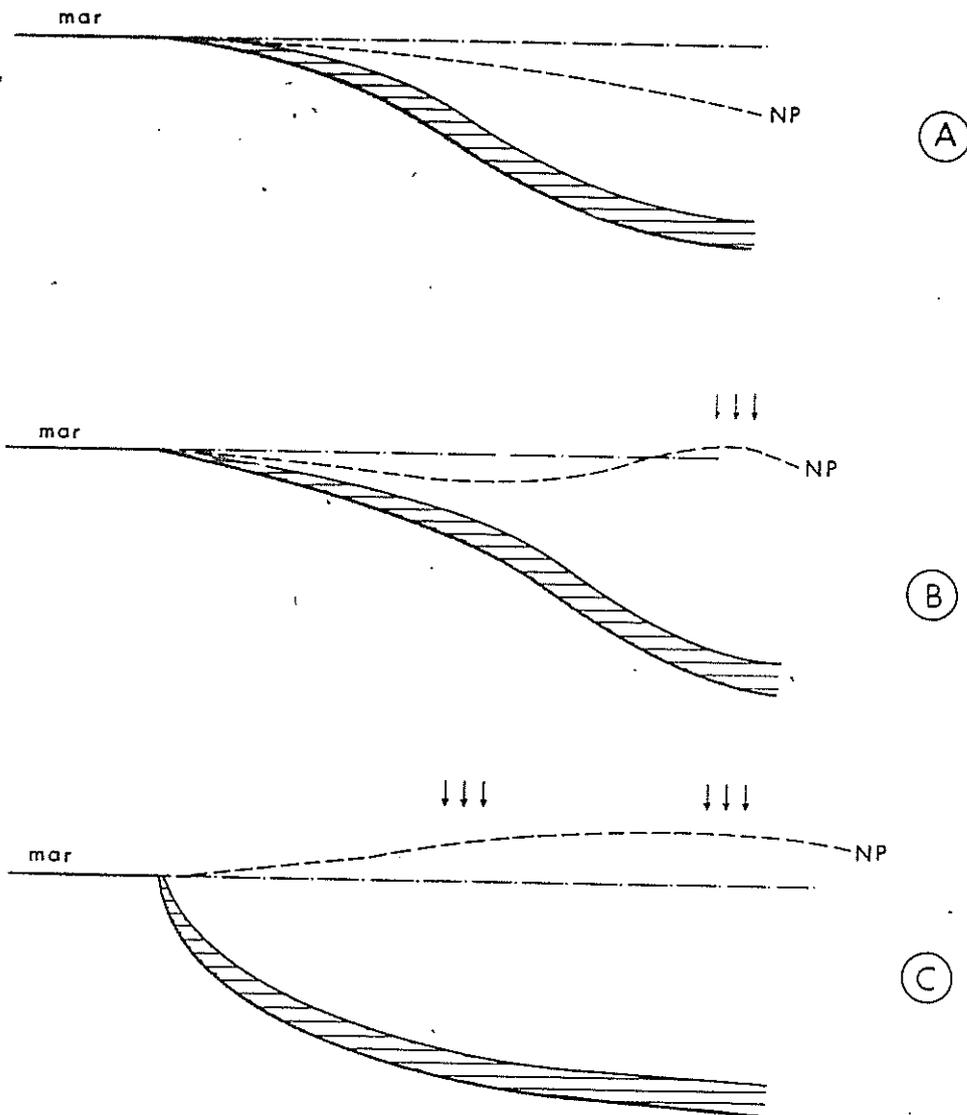
¿En que debería consistir la operación?

Clásicamente, podría tratarse de inyectar agua según una línea paralela a la orilla del mar, para crear una carga positiva a lo largo de dicha línea. El umbral piezométrico así formado invertiría el gradiente, es decir originaría un flujo de agua dulce hacia el mar (esquemas B y C de la figura siguiente) mientras que, hoy en día, existe un flujo de agua salada hacia tierra adentro (esquema A).



No obstante, esta forma de proceder dejaría probablemente una bolsa de agua salada residual, que iría a parar al Acuífero inferior.

Para evitarlo, sería más conveniente empezar la inyección encima de la zona más deprimida (es decir, hacia el límite oriental de la Escama) y, de esta forma, empujar paulatinamente el agua salada hacia el mar (esquema B). Evidentemente, gran parte del agua de recarga iría al Acuífero inferior, pero ello no tendría mayor inconveniente que el de retrasar la obtención del objetivo perseguido (crear cargas positivas en la Escama), a la vez que recargaría el Acuífero inferior (lo que también constituye un objetivo).

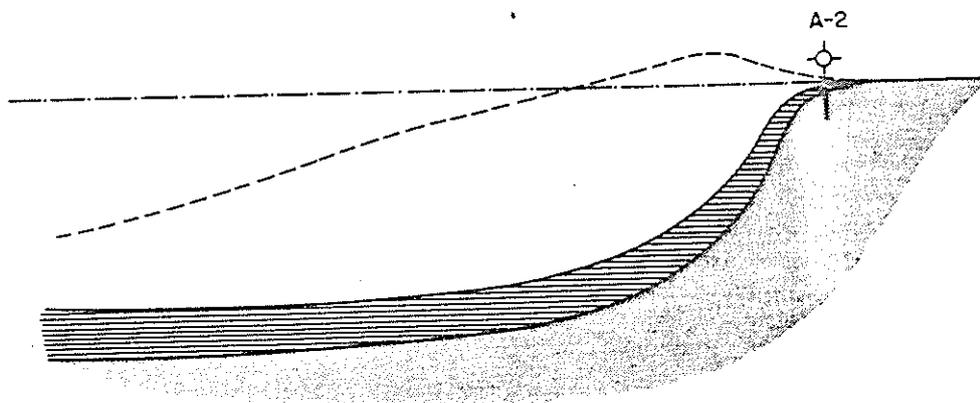


Ulteriormente, se podría duplicar las instalaciones de re carga, colocando otra más próxima a la orilla, para empujar más rápidamente la cuña salada.

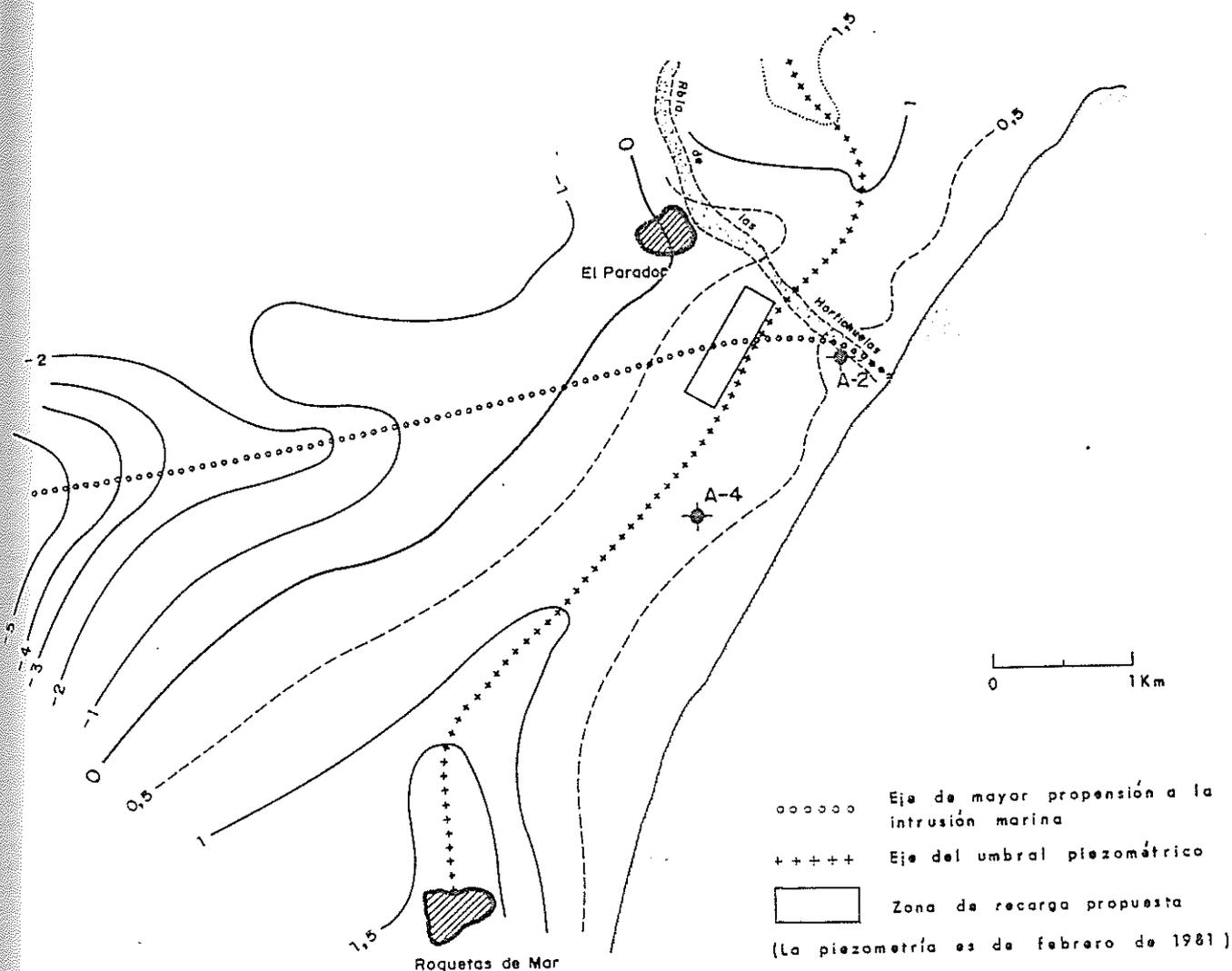
Una de las pocas dificultades que se encuentre para llevar a cabo esta actuación debería radicar en los valores relativamente buenos de las transmisividades, que dificultaría la obtención de una inversión de gradientes, a no ser que se utilicen volúmenes de agua de cierta importancia.

#### b) La zona de Roquetas

Aquí se trata de fortificar un umbral piezométrico ya existente, pero en curso de deterioro (por descenso de sus cotas y aproximación a la orilla), de tal manera que la cuña salada observada en algunos sondeos (por ejemplo el piezómetro A2) no pueda extenderse hacia zonas productoras situadas más tierra adentro y con cotas piezométricas ya ampliamente negativas.



Al observar el mapa piezométrico de febrero 1981 (el más reciente disponible en esta parte del Campo), se vislumbra la existencia de un eje de mayor propensión a la intrusión marina, que coincidiría, al Oeste, con el dedo de guante marcado por las isopiezas negativas y, al Este, por la desembocadura de la Rambla de las Hortichuelas (piezómetro A2).



Es posible que este eje aparezca algo teórico, ya que supone una formación homogénea (caso que, a primera vista, no se da). Sin embargo, y en ausencia de otros elementos que induzcan a modificar su trazado, es por este eje por donde deberán iniciarse las actuaciones. Además, convendría situarse inmediatamente al Oeste de dicho umbral piezométrico, es decir en la ladera interior del mismo, lo que tendría por efectos de alejarlo progresivamente de la orilla y de utilizar la totalidad del agua de recarga para la realimentación de las zonas interiores en vez de dejar que se pierda al mar una parte de ella.

Al contrario de lo que ocurriría en la Escama de Balsa Nueva, las medianas transmisividades y porosidades que se pueden esperar deberían favorecer el establecimiento del umbral con un gasto poco importante de agua.

Consideremos, en efecto, tres mallas cuadradas en serie, de 250 m de lado, entre cada una de las cuales exista un gradiente de  $10^{-3}$  (es decir, con una diferencia de carga de 25 cm entre centros de mallas). Admitamos que el acuífero tenga una transmisividad de  $5 \text{ m}^2/\text{h}$  y una porosidad del 5%.

El caudal de paso, en régimen permanente, entre una malla y la siguiente viene dado por la Ley de Darcy.

$$\begin{aligned} Q &= T i l \\ &= (5 \times 24) \cdot 10^{-3} \cdot 250 \\ &= 30 \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

Si se inyecta un caudal igual en la malla alta, el ascenso piezométrico es (suponiendo cerrada la malla):

$$h = \frac{30}{(250)^2 \times 0,05} \approx 0,01 \text{ m/día}$$

Si se discretiza el tiempo en fases de 25 días, se consigue un ascenso piezométrico de 25 cm al cabo de la primera fase; por lo tanto se duplica el gradiente entre las mallas alta e intermedia, y por lo tanto el caudal de paso. En consecuencia, la malla alta pierde todo el caudal inyectado, que llega a la malla intermedia y produce en ello una subida del nivel; ésta provoca un incremento del caudal hacia la malla baja, así como una disminución del flujo procedente de la malla alta, y así sucesivamente.

Este cálculo muy grosero, hecho sólo para dar un orden de magnitud, permite ver que una inyección del orden del litro/segundo por malla de 250 m de lado produciría, al cabo de algunos meses, una subida de la superficie libre de algunos decímetros.

La poca magnitud del caudal necesario permitiría sacarlo del Acuífero inferior nord-este (lo que representaría un incremento del 1% de la explotación), y tanto más cuanto que el Canal del Sector I pasa exactamente por el sector propuesto para recarga.

Cabe señalar, no obstante, un factor negativo en esta posibilidad de recarga: la heterogeneidad litológica. En la capa no saturada, ello dificultaría o impediría que un agua simplemente infiltrada en superficie llegase hasta el manto; en el mismo acuífero, la posible existencia de alternancias margosas y detríticas pone en entredicho la unicidad del manto. En cualquier caso, con vendría profundizar los conocimientos sobre la litología y las cargas hidráulicas existentes, antes de llevar a cabo una actuación de recarga que muy bien podría no tener ningún efecto benéfico.

• Actuación directa y puntual sobre la intrusión del Acuífero inferior occidental

Dicho acuífero, en su parte costera, consiste en un paquete de dolomías confinadas de 200 o más metros de espesor, comprendido entre un substrato de filitas de la Unidad de Gádor y un muro de filitas de la Escama de Balsa Nueva. Se supone que el agua de mar sólo puede entrar por drenancia a través de las filitas superiores (debajo del mar), y que el caudal correspondiente no es muy importante. No obstante, queda por demostrar esta última hipótesis.

Reconstituir presiones altas en este sector (mediante inyección de agua) plantea varios problemas, de los cuales los más importantes son:

- necesidad de caudales muy importantes, debido a las altas transmisividades de las dolomías, y pérdida de gran parte de dichos caudales
- necesidad de que el agua de recarga sea perfectamente limpia, ya que la inyección habría de hacerse mediante sondeos, de fácil colmatación.

No obstante, existe una nueva técnica que probablemente permitiría conseguir el objetivo perseguido (que es impedir el paso del agua de mar hacia tierra adentro) y que, a priori, en contraría condiciones estructurales óptimas en la zona considerada. Dicha técnica, por cierto, es tan nueva que nunca ha sido puesta en práctica todavía, aunque sí ha sido estudiada en el plan teórico.

Se trataría simplemente de crear, y mantener, una gigantesca burbuja de aire, cuya presión sería suficiente para aislar, en el sector más peligroso, el mar del acuífero inferior (de una forma parecida al efecto de una burbuja de aire en un radiador de calefacción central, que se opone al paso del agua caliente). Uno o dos sondeos profundos de pequeño diámetro (con perfecto aislamiento de las capas suprayacentes), y un compresor de capacidad corriente, podrían ser suficientes. Evidentemente, las instalaciones tendrían que ser diseñadas con sumo cuidado, y en ello podría intervenir el Centro de Informática Geológica de la Escuela de Minas de París.

● Propuestas de anteproyectos de recarga

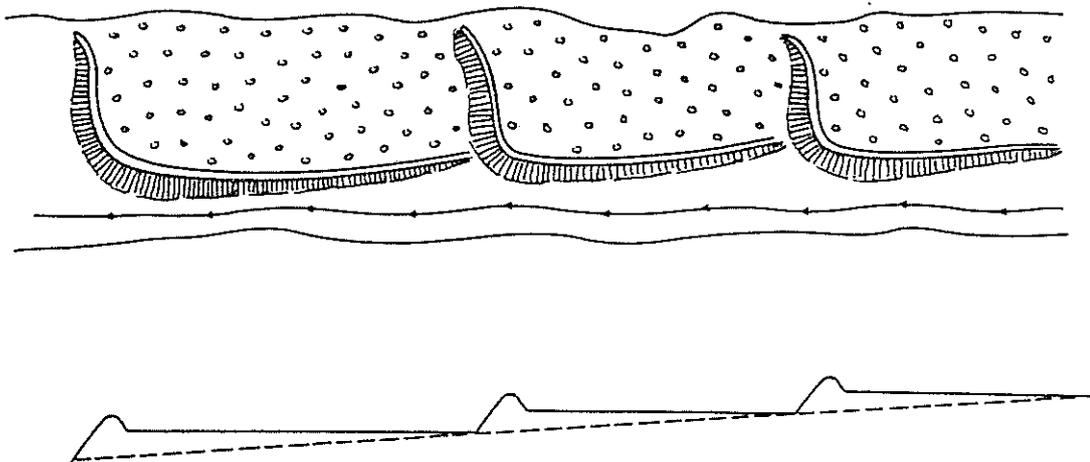
a) Acuífero inferior occidental

Debido al espesor de la capa no saturada (unos 200 m en

la traza del Canal de Beninar), parecería lógico recargar por inyección en sondeos, directamente en las dolomías o en las calcare<sup>n</sup>itas miocenas. Sin embargo, la turbidez del agua de recarga no permitiría, probablemente, que se utilizase esta técnica, a no ser que se multipliquen los estanques de decantación (con lo que esto conlleva en costos y en ocupación de suelo) y se admita un coste importante en el tratamiento del agua.

No queda más remedio, por lo tanto, que utilizar la técnica de la infiltración provocada en medio no saturado.

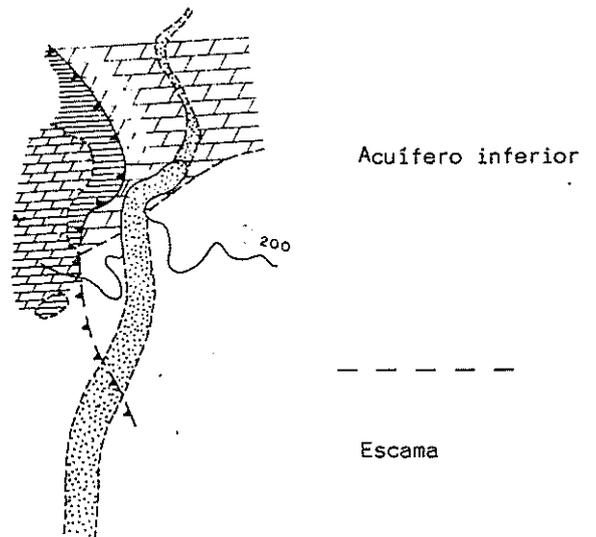
En lugar de edificar estanques de infiltración propriamente dichos, sería más conveniente utilizar algunas de las ramblas existentes. En ellas, podrían realizarse varios estanques en serie (sirviendo los primeros para la decantación), limitados por diques de terreno natural levantados con palas mecánicas. Dichos estanques, a ser posible, deberían ocupar sólo una parte de la anchura de la rambla, dejando paso así a los caudales naturales de la misma que no pudiesen infiltrarse. En los casos de riadas relativamente importantes, es probable que se destruya el dispositivo pero su bajísimo coste permitiría reconstruirlo cuantas veces sea necesario.



No faltan las ramblas que puedan prestarse a este tipo de acondicionamiento (o de cualquier otro de parecido objetivo). El único punto que debe tenerse en cuenta es que, en el piedemonte, pueden existir pasadas margosas que hagan que el agua infiltrada, en lugar de continuar su camino vertical hasta el Acuífero inferior, se traslade al Acuífero superior. Como ya se ha dicho, la zona de Los Alacranes de este último acuífero se descarga en el inferior, razón por la cual el agua que, en su caso, llegase a dicha zona acabaría por recargar al Acuífero inferior. Es conveniente, por lo tanto, ubicar las instalaciones de infiltración provocada en las ramblas del NW del Campo, es decir al Oeste de la carretera El Ejido-Dalías. Una de estas ramblas podría ser, precisamente, la que baja de Dalías.

b) Acuífero inferior occidental y Escama de Balsa Nueva

El Barranco de los Infantes (a unos 2 km al Norte del pueblo de Balanegra) presenta condiciones muy peculiares, debido a la estructura geológica de la zona: en efecto, dicha rambla discurre sucesivamente sobre el Acuífero inferior y sobre la Escama. Además, el Canal de Beninar cruzará la misma rambla, de suficiente anchura por lo demás, se conseguiría recargar ambos acuíferos a la vez, es decir contribuir de forma inmejorable a la recuperación del Acuífero inferior occidental. Incluso se puede contemplar la posibilidad de realizar aquí unas instalaciones de recarga más sofisticadas (que habría que diseñar) que permitiesen la infiltración de varias decenas de litros/segundo).



Además del dispositivo precedente, sería oportuno utilizar los escasos excedentes del Canal de San Fernando. Se trata de aguas subterráneas (por lo tanto, sin materias en suspensión) pero cuyo recorrido, largo y lento, favorece la proliferación de algas.

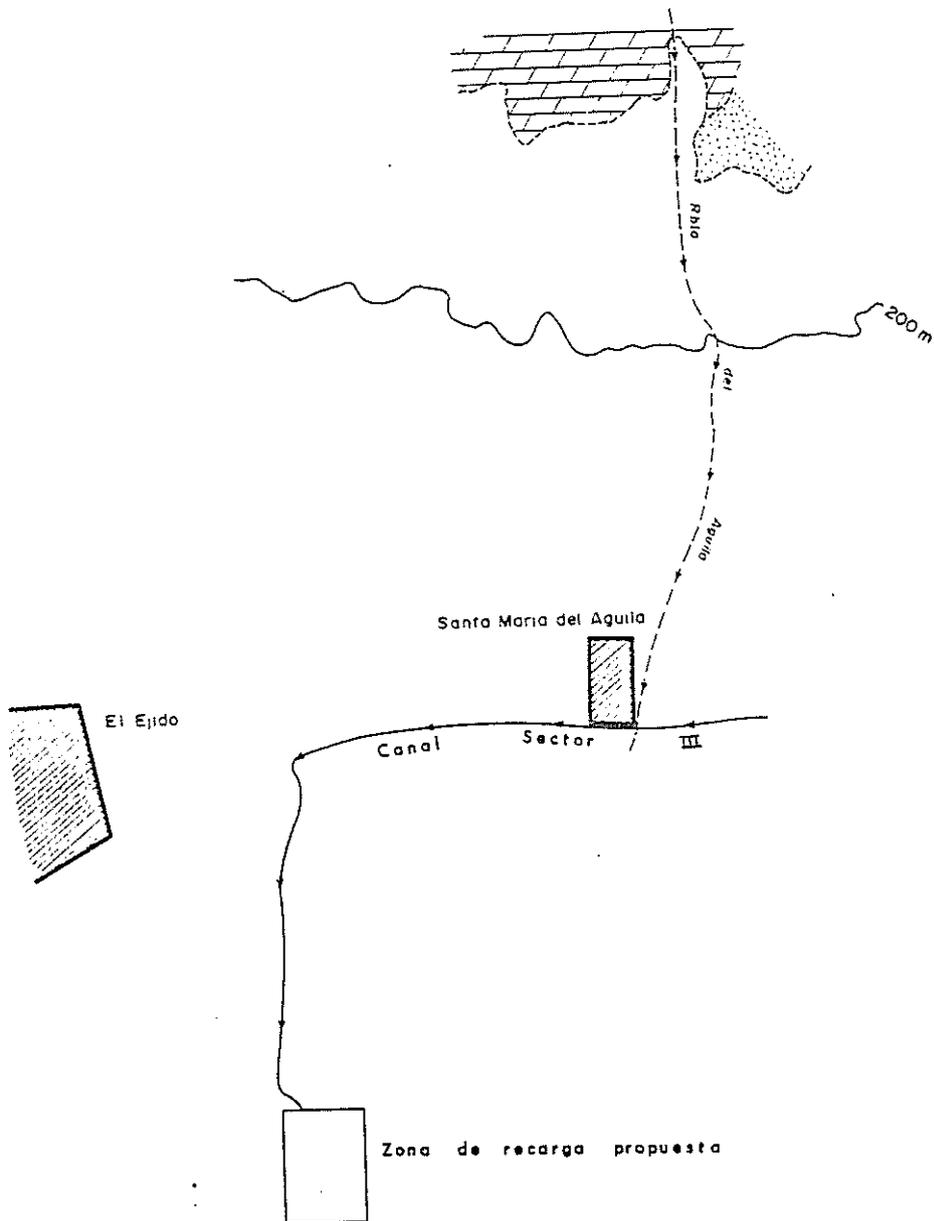
Es posible que los escasos volúmenes disponibles justifiquen un tratamiento anti-algas, gracias a lo cual podrían inyectarse directamente por sondeo. Se podría utilizar, a tal efecto, el sondeo 455-Bj, que presenta la ventaja de permitir diariamente una inversión del flujo (ya que, en este sondeo, se bombea para el regadío), la cual reduciría los riesgos de colmatación.

De todas formas, la escasa profundidad del agua (una veintena de metros) y la relativa homogeneidad de la capa no saturada (calcarenitas) también dan cabida al método de infiltración en estanques.

#### c) Zona de Santa María (Acuífero superior central)

En término general, las ramblas que proceden de la Sierra de Gádor mueren en el piedemonte, y es difícil saber si el agua infiltrada en el mismo van a llegar hasta el Acuífero superior (mediante pasadas margosas en los conos de deyección o en el mismo Plioceno), o van a infiltrarse en el Acuífero inferior occidental (ramblas al Oeste de Santa María) o en el del Sector nor-este (ramblas al Este de Santa María).

La rambla del Aguila, que pasa por la misma población de Santa María, entra un poco más en la llanura y, además, se termina en la cola del Canal del Sector III que, mediante algunos arreglos, permitiría llevar el agua algunos kilómetros más hacia el SW, y colocar en mejores condiciones los estanques de decantación (en su caso) y de infiltración.

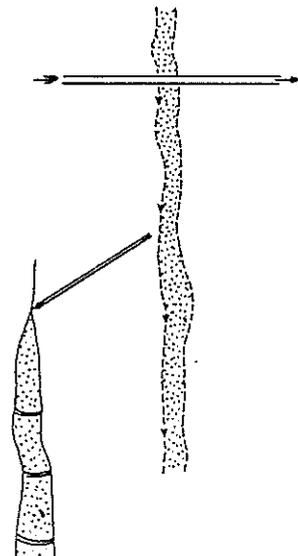


d) Zona de El Viso (Acuífero superior nor -este)

En teoría no sería difícil proceder a una recarga mediante estanques de infiltración en serie, acondicionados en ramblas como la de Carcáuz o la del Cañuelo. Una experiencia de infiltración de 6 horas, realizada por el IGME en octubre 1978 en la Rambla del Cañuelo, puso de manifiesto una "velocidad de infiltración" de 2,46 m/día (es decir  $2,46 \text{ m}^3/\text{día}$  por metro cuadrado) valor que, sin ser excepcionalmente bueno, se sitúa en muy buena posición en la gama de valores de suelos sin acondicionar.

No obstante, el gran problema de ambas ramblas es la importancia y la litología de su cuenca vertiente, cuyas crecidas pueden ser importantes (a pesar de las obras de corrección del ICONA) y barrer con cierta frecuencia las instalaciones de recarga.

Una solución menos aleatoria podría consistir en acondicionar con estanques algunas ramblas pequeñas, de reducida cuenca vertiente, parecida a aquella en la que también se realizó una experiencia de recarga en octubre 1978; ahí, la velocidad de infiltración alcanzó  $17,3 \text{ m/día}$  ( $17,3 \text{ m}^3/\text{día} \cdot \text{m}^2$ ), es decir 32 l/s para una pequeña superficie de 160 m<sup>2</sup>. Bastaría con encontrar un barranco (o varios) de 2 ó 3 m de profundidad y de una decena de metros de anchura, susceptible de ser acondicionado en fosas en serie, y situado a una distancia corta de una rambla que permitiese transportar el agua a partir del Canal de Beninar.



## 2.- SIMULACIONES A CINCO AÑOS VISTA

### 2.1.- GENERALIDADES

Existe un número infinito de actuaciones posibles con vistas a mejorar la gestión de los recursos hídricos globales de la región, parte de las cuales pueden ser simuladas mediante el modelo matemático aquí presentado. Sin embargo, al no estar modelizada la mitad nord-oriental del Sistema del Campo de Dalías / Sierra de Gádor, no se puede contemplar el conjunto de los recursos. Por otra parte, la presa de Benínar está aún sin acabar, y seguramente no lo estará antes de 1988 (aunque esté terminado el canal con anterioridad). Por último, es preocupante la situación del Acuífero inferior occidental, y lo será más aún en 1988.

Por lo tanto, sólo se han realizado unas cuantas simulaciones, sólo con el fin de demostrar que el modelo es funcional, y de dar algunas orientaciones. Todas abarcan un plazo de cinco años (desde octubre 1984, fin del calado del modelo, hasta septiembre 1989). Dicho plazo es suficiente para que el Sector nor-este esté modelizado y que el embalse de Benínar esté en servicio, ya que estos dos hechos tienen que modificar sensiblemente las perspectivas actuales de reordenación de la utilización de los recursos hídricos de la región.

Han sido tres las opciones simuladas y, para cada una, se han contemplado dos hipótesis relativamente extremas en cuanto a pluviosidad se refiere: en una, llamada "húmeda", se utilizan los datos de los cinco años más húmedos de la serie ya estudiada (es decir, 1974-75, 1975-76, 1976-77, 1978-79 y 1983-84), de los cuales tres han sido realmente muy húmedos; en la hipótesis "seca", se utilizan los cinco años más secos de la serie (es decir, 1977-78, 1979-80, 1980-81, 1981-82 y 1982-83), de los cuales cuatro han sido realmente muy secos.

Las tres opciones simuladas son las siguientes:

- 1 - Mantenimiento del estado actual, es decir con los bombeos (y las consiguientes reinfiltraciones) del año 1983-84 congelados, sin ninguna actuación suplementaria.
- 2 - En las mismas condiciones de explotación, se añade una recarga artificial a razón de:
  - . 50 l/s en el Barranco de los Infantes, de los cuales la mitad iría a la Escama de Balsa Nueva y el resto al Acuífero inferior occidental.
  - . 150 l/s en la Rambla de Dalías, suponiendo que este caudal llegue íntegramente al Acuífero inferior occidental.
- 3 - Manteniendo la recarga anterior, se añade un bombeo suplementario de 100 l/s en la zona de Santa María (Acuífero superior central).

En cada una de las dos hipótesis (húmeda y seca) de las dos primeras opciones, se han realizado las simulaciones tanto

en flujos como en concentraciones. Puesto que la intrusión marina se inició aproximadamente en octubre 1980, hubo que inicializar el estado de las concentraciones salinas al 1-10-84, gracias a una simulación suplementaria que cubriese los años 1980-81 a 1983-84.

Con vistas a una mejor homogeneidad en las descripciones, se tratará primeramente las simulaciones de flujo, y luego las de salinidades.

## 2.2.- SIMULACIONES DE FLUJO: SITUACION EN OCTUBRE 1989

### 2.2.1.- Acuífero superior central

- Mantenimiento de las condiciones actuales

En hipótesis húmeda, prosigue la tendencia anteriormente observada: según el sitio considerado, se nota una relativa inmovilidad de la superficie libre, o un ascenso del orden de 1 a 2 m. En hipótesis seca, el manto baja ligeramente (del orden de 1 m) en la zona de Santa María.

La Escama de Balsa Nueva experimenta descensos acusados: el nivel piezométrico mínimo pasa de los -2 m de octubre 1984, a menos de -3 m en hipótesis húmeda, y -6 m en hipótesis seca.

- Adición de recarga artificial

En la Escama, la superficie libre sube 3 ó 4 m en la parte más interior en hipótesis húmeda, pero se queda alrededor de la cota -3 m en hipótesis seca.

- Adición de bombeos complementarios

Aparece un gran embudo de depresión alrededor de la zona de bombeo, en la cual la superficie libre pierde del orden de 10 m en hipótesis húmeda, y de 13 m en hipótesis seca. Como previsto, la influencia del bombeo se extiende a la mayor parte de la zona de Santa María, decreciendo y anulándose en los sectores menos transmisivos.

### 2.2.2.- Acuífero inferior occidental

- Mantenimiento de las condiciones actuales: Los niveles piezométricos pierden solamente del orden de 1,5 m en la hipótesis húmeda, pero bajan aproximadamente 5,5 m en caso de pluviosidad seca. En este último caso, las cotas piezométricas varían entre -11 y -13 m según el sitio considerado.
- Adición de recarga artificial: El caudal inyectado reduce en unos 3 m las depresiones alcanzadas en el caso anterior.

En definitiva, y partiendo del estado en septiembre 1984:

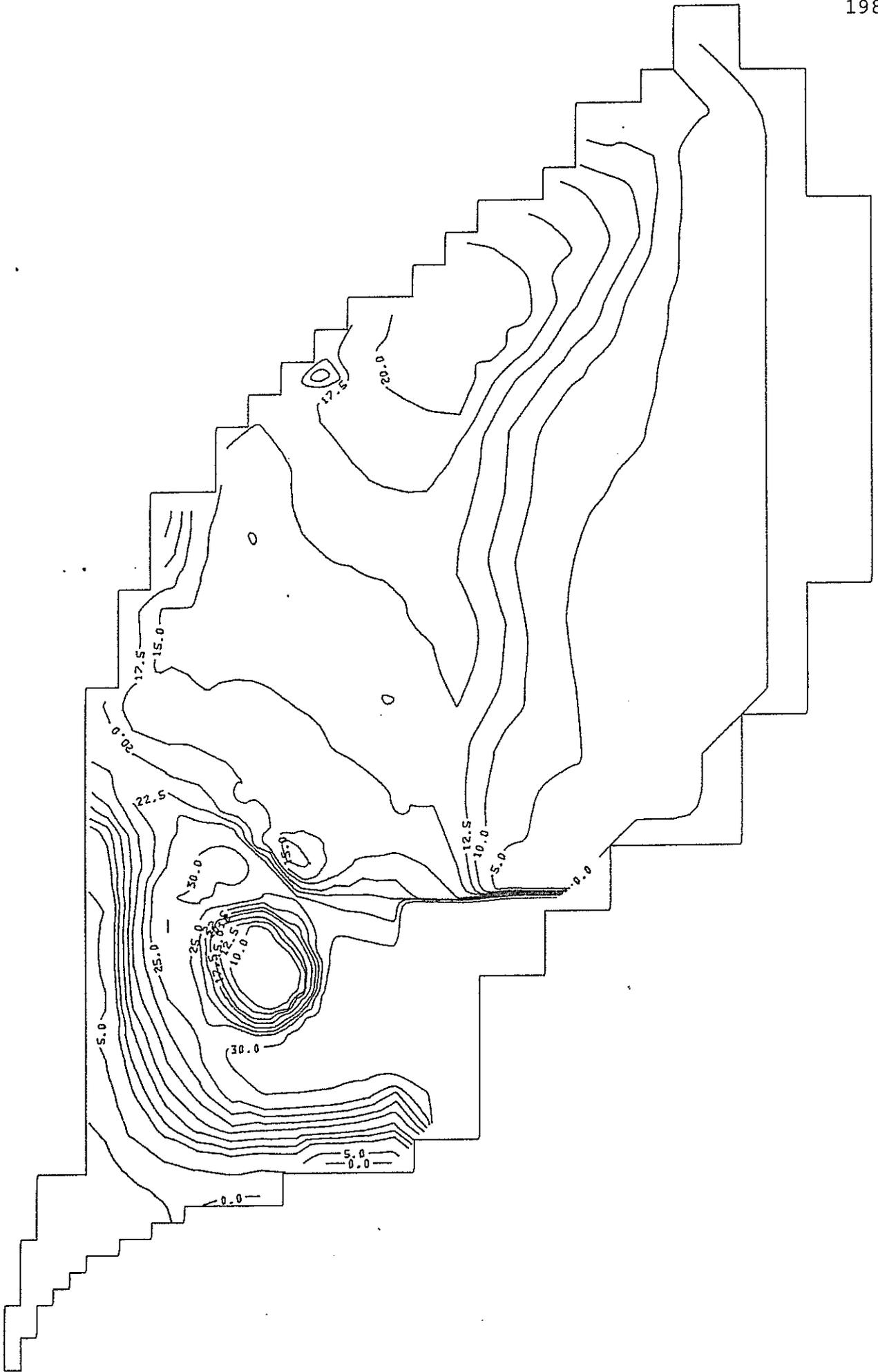
- . el manto recupera 2 m si la pluviosidad es húmeda y si, además, se procede a una recarga artificial.
- . al contrario, si la pluviosidad es seca y si no se procede a ninguna recarga, pierde 5,5 m.

### 2.3.- SIMULACIONES DE SALINIDAD: SITUACION EN OCTUBRE 1989

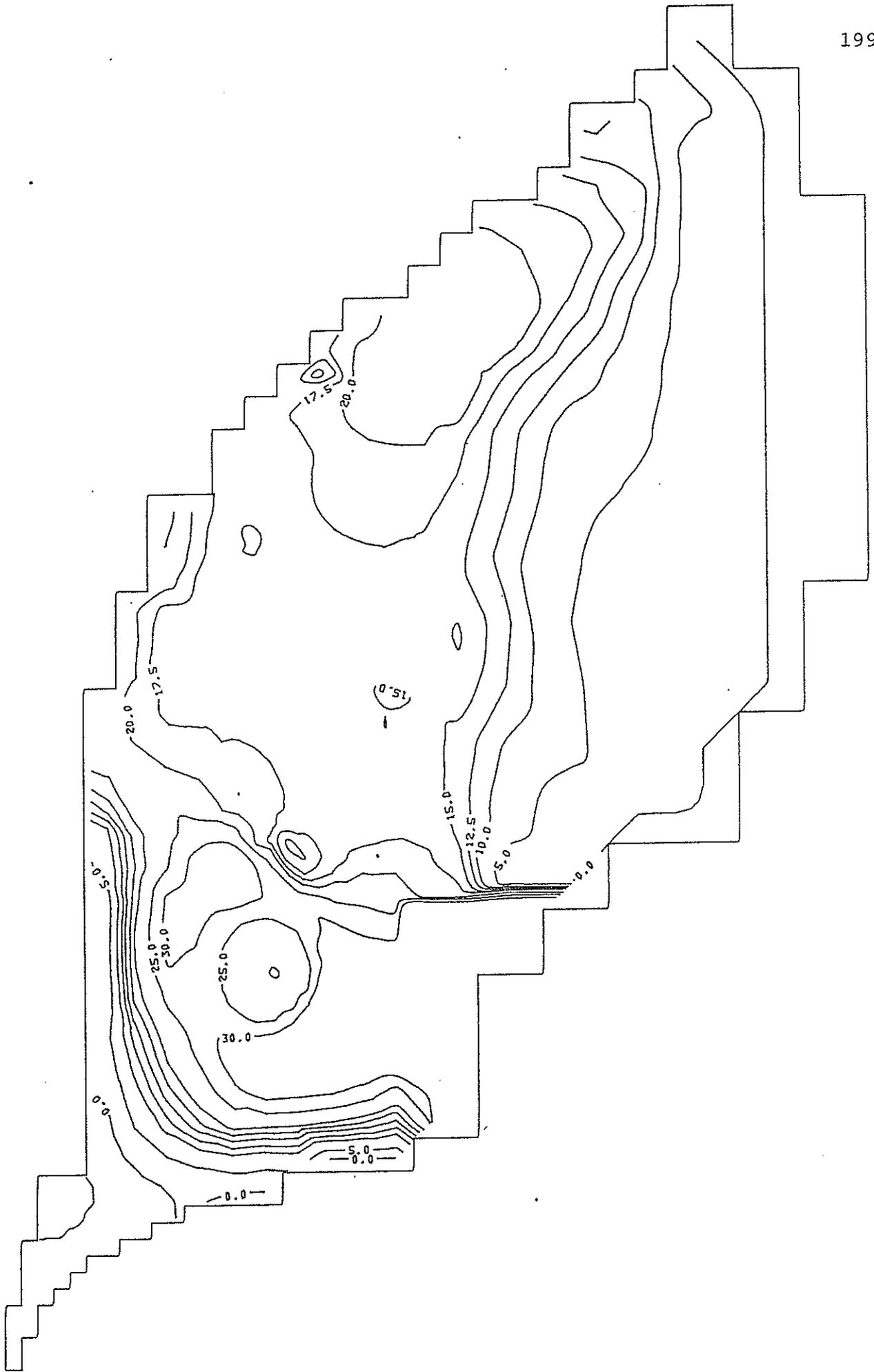
Aún en el caso más desfavorable (hipótesis seca, y ausencia de recarga artificial), la intrusión no progresa de forma alarmante hacia el interior, tanto en la Escama de Balsa Nueva

como en el Acuífero inferior occidental. En este último, el más importante, la curva 1 (= 1‰ de agua de mar) avanza unos 300 m en hipótesis húmeda, y unos 600 m en hipótesis seca. Con recarga artificial, dicha curva 1 retrocede unos 500 m con pluviosidad húmeda, y se mantiene aproximadamente inmovil con pluviosidad seca.

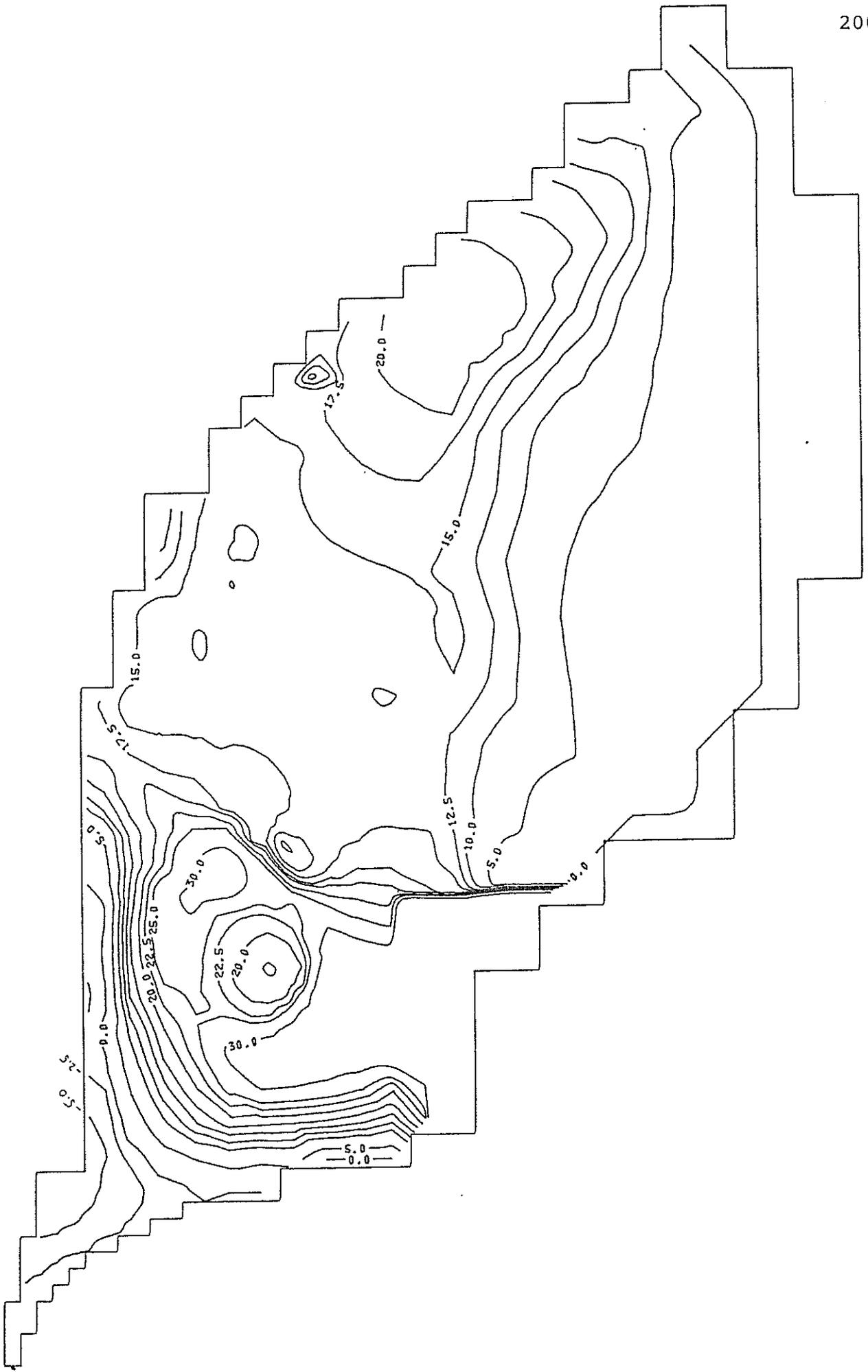
PIEZOMETRIE SEPT. 1984 (RESUCON/95)



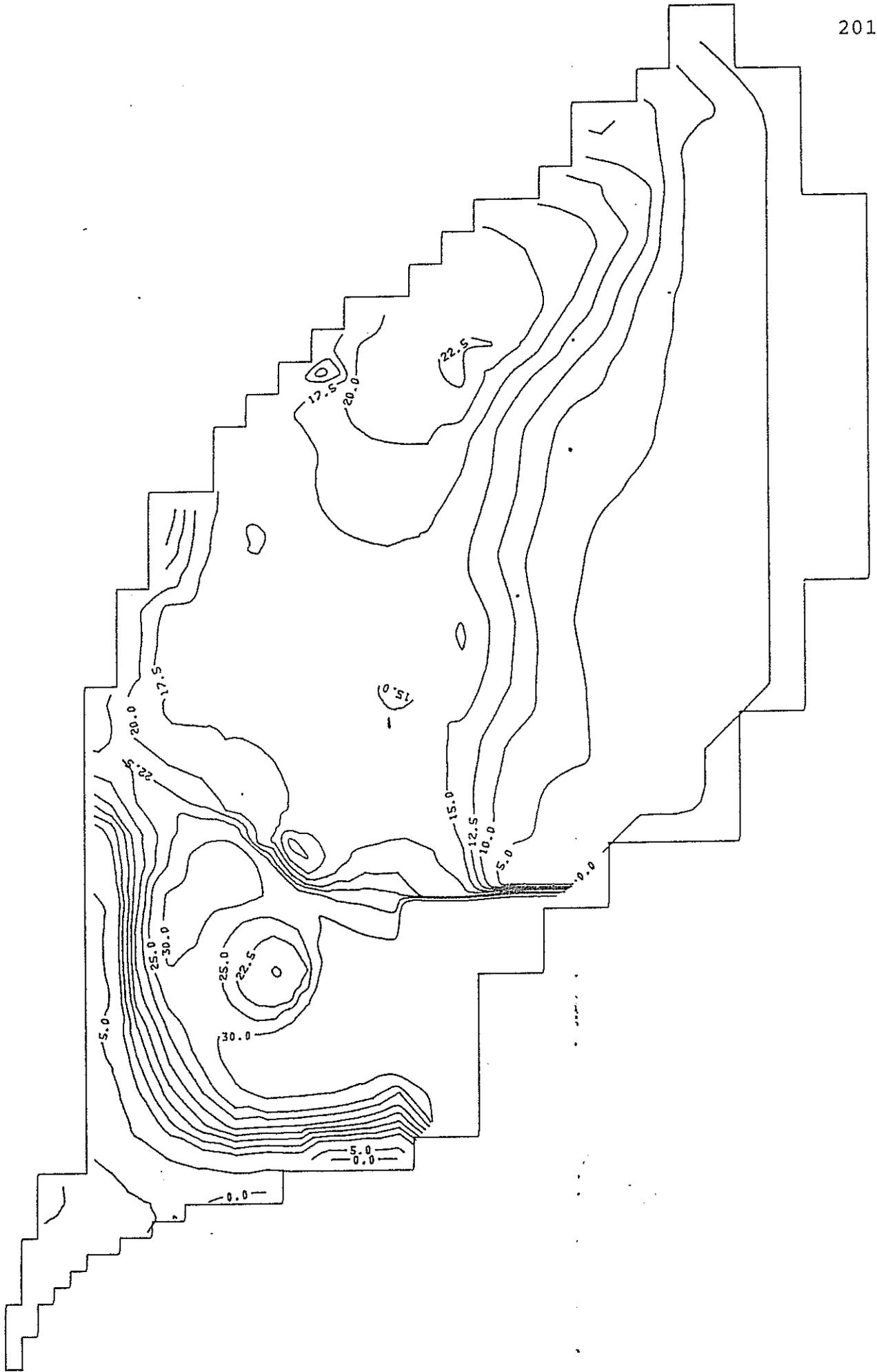
PIEZOMETRIE SEPT. 1989/SIMUL.HUMIDE (RESUCONH/119)



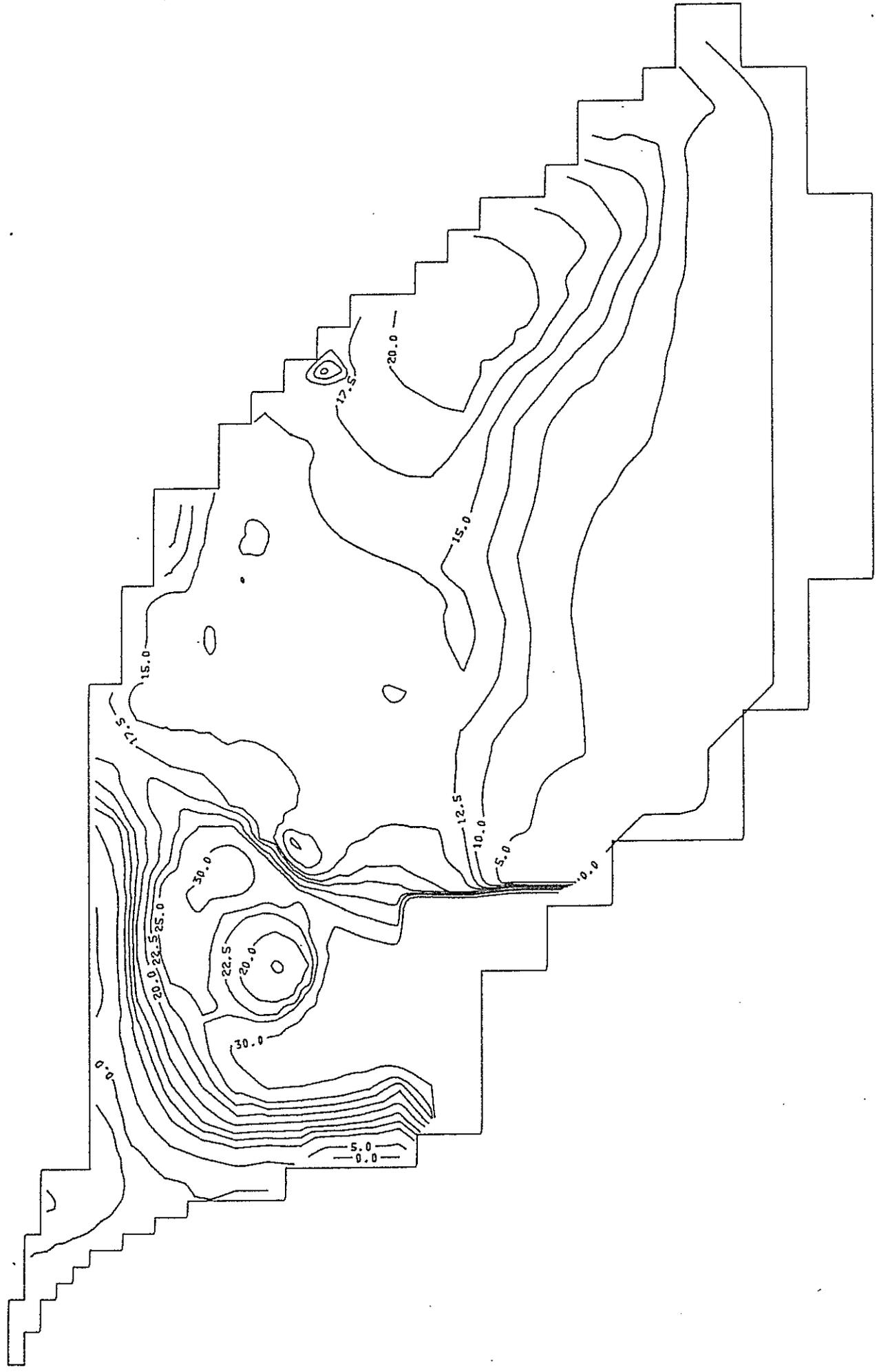
.PIEZOMETRIE SEPT.1989/SIMUL.SECHE (RESUCONS/119)

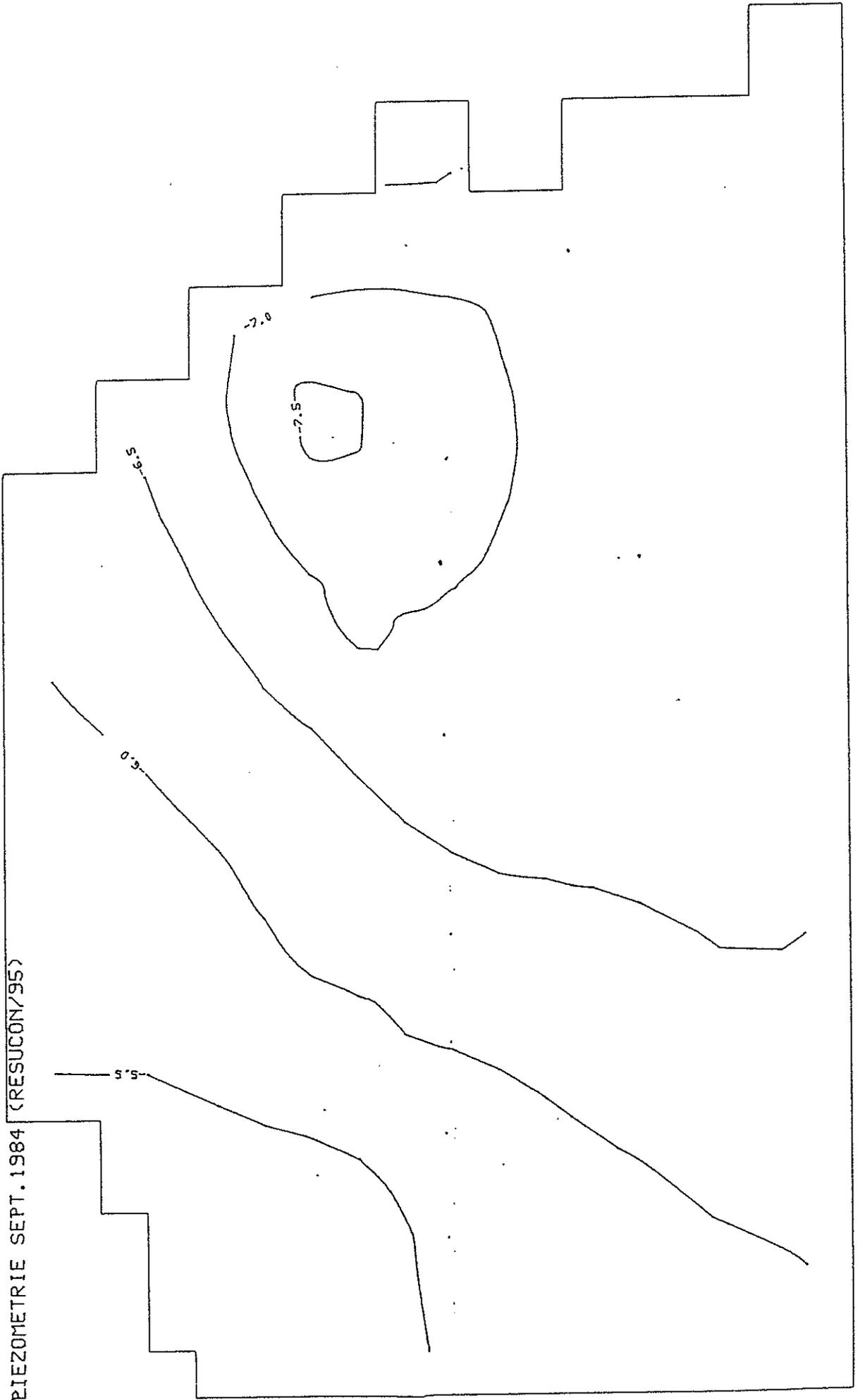


PIEZOMETRIE SEPT. 1989/SIMUL.HUMIDE/RECHARGE (RESURECH/119)

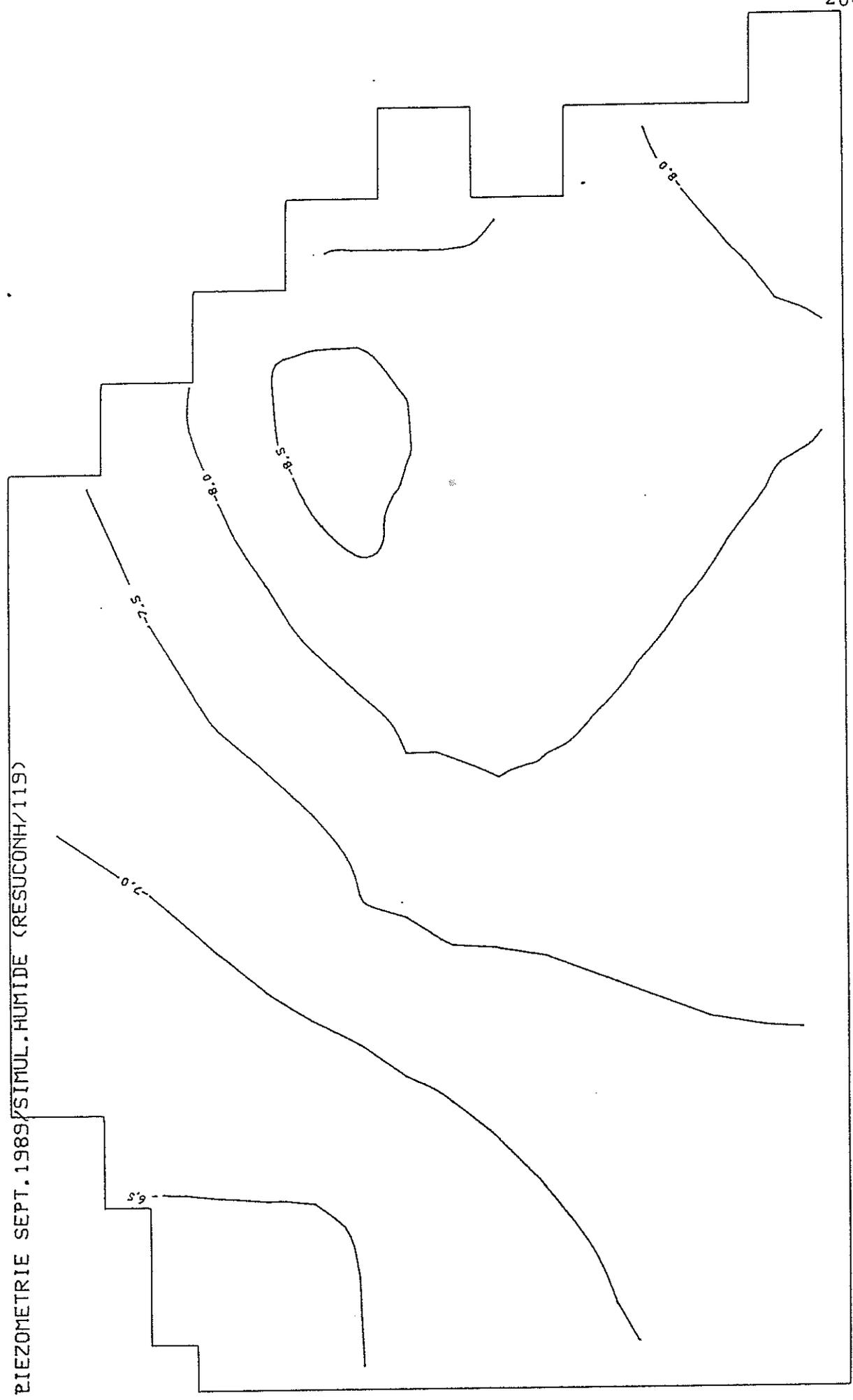


PIEZOMETRIE SEPT. 1989/SIMUL. SECHE/RECHARGE (RESURECS/119)

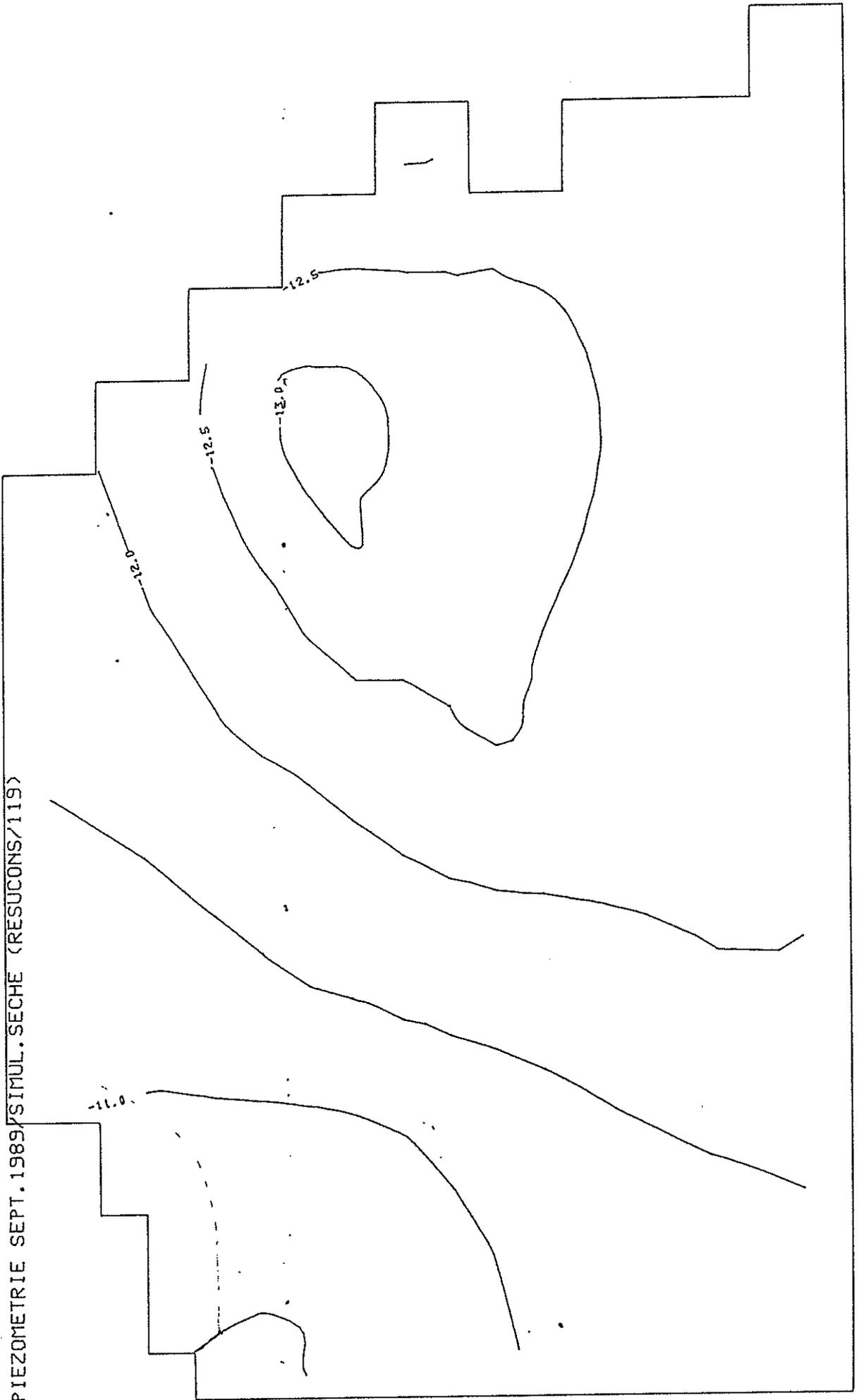




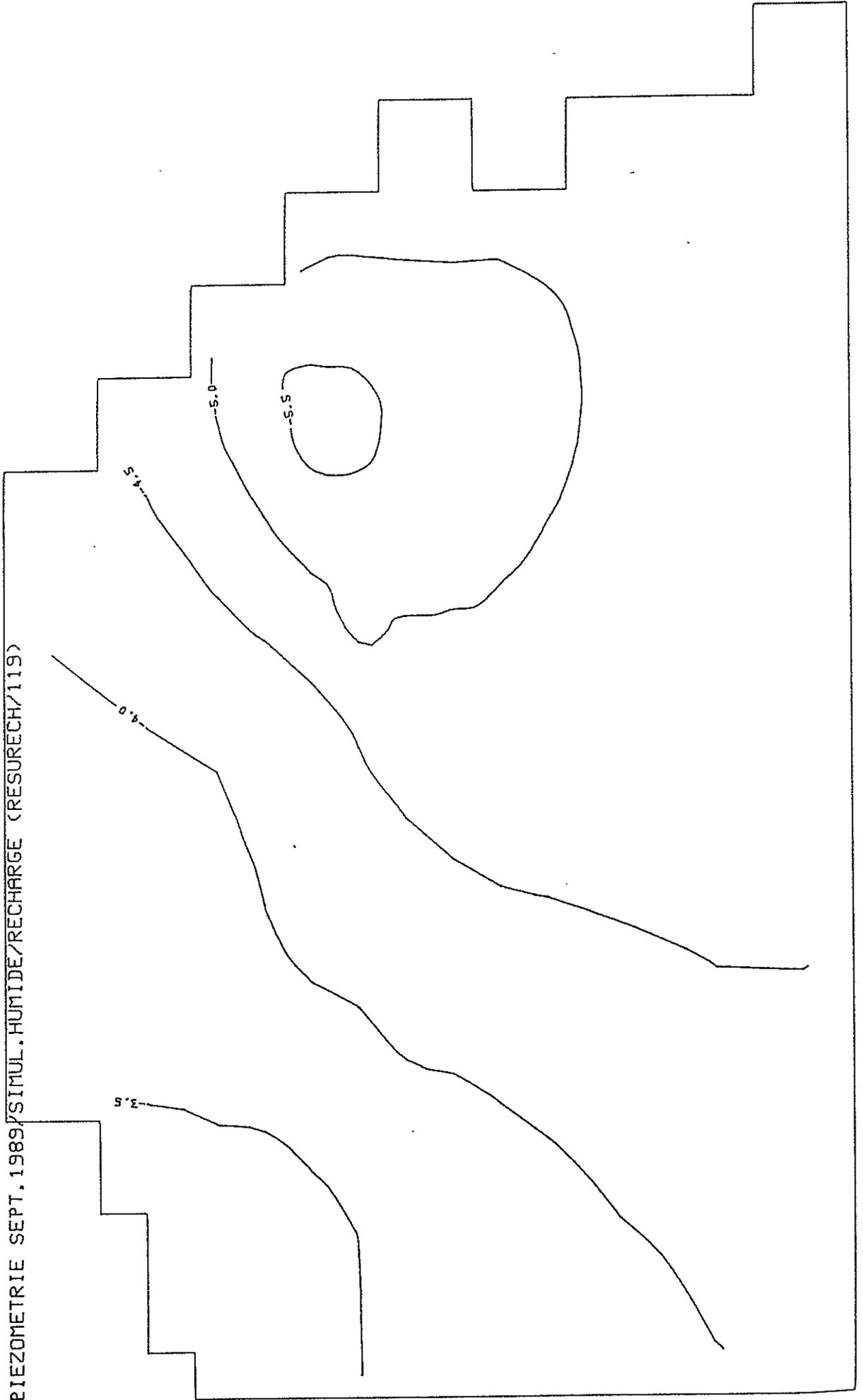
PIEZOMETRIE SEPT. 1989 / SIMUL. HUMIDE (RESUCONH/119)



PIEZOMETRIE SEPT. 1989/SIMUL. SECHE (RESUCONS/119)

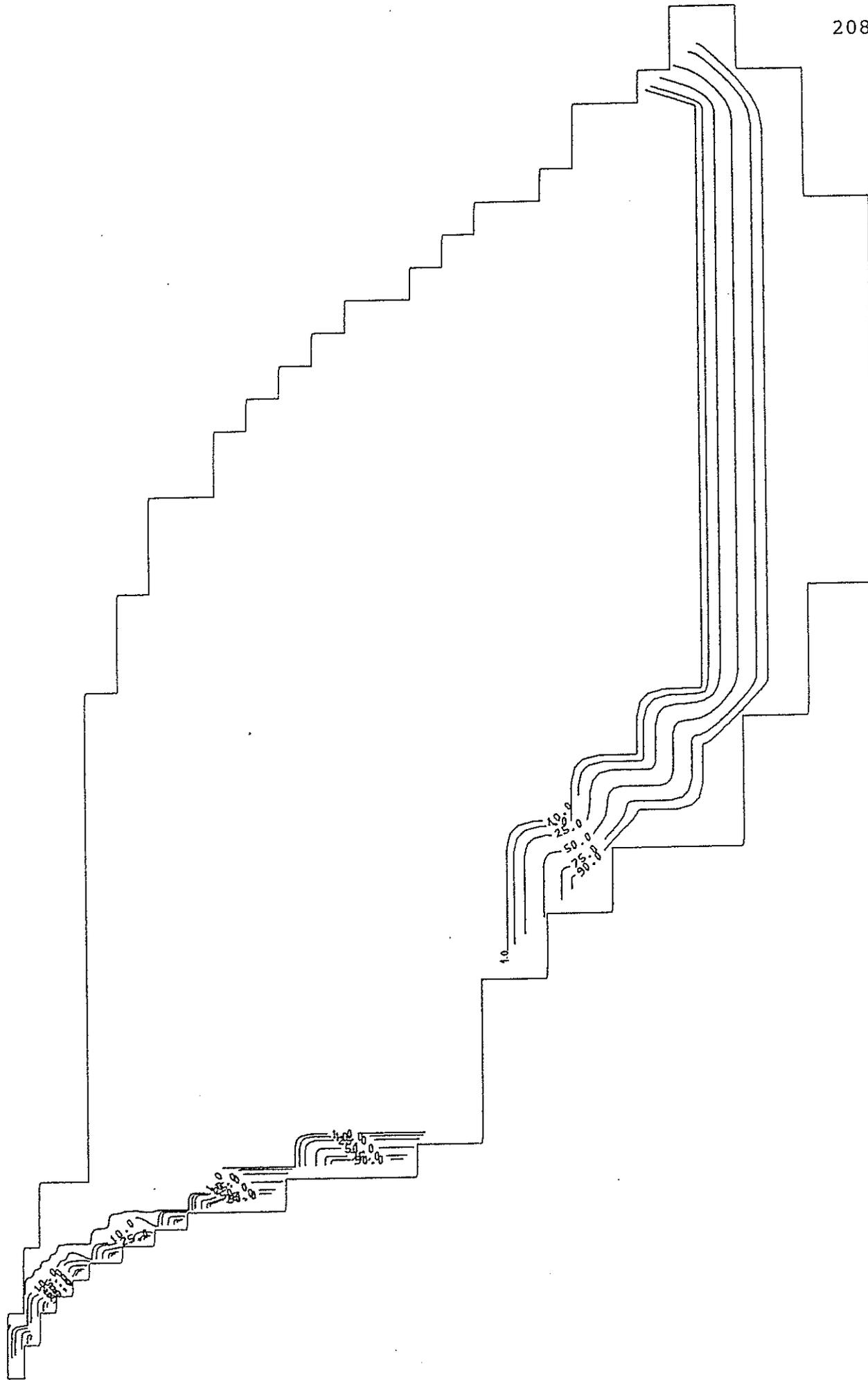


PIEZOMETRIE SEPT. 1989/SIMUL.HUMIDE/RECHARGE (RESURECH/119)

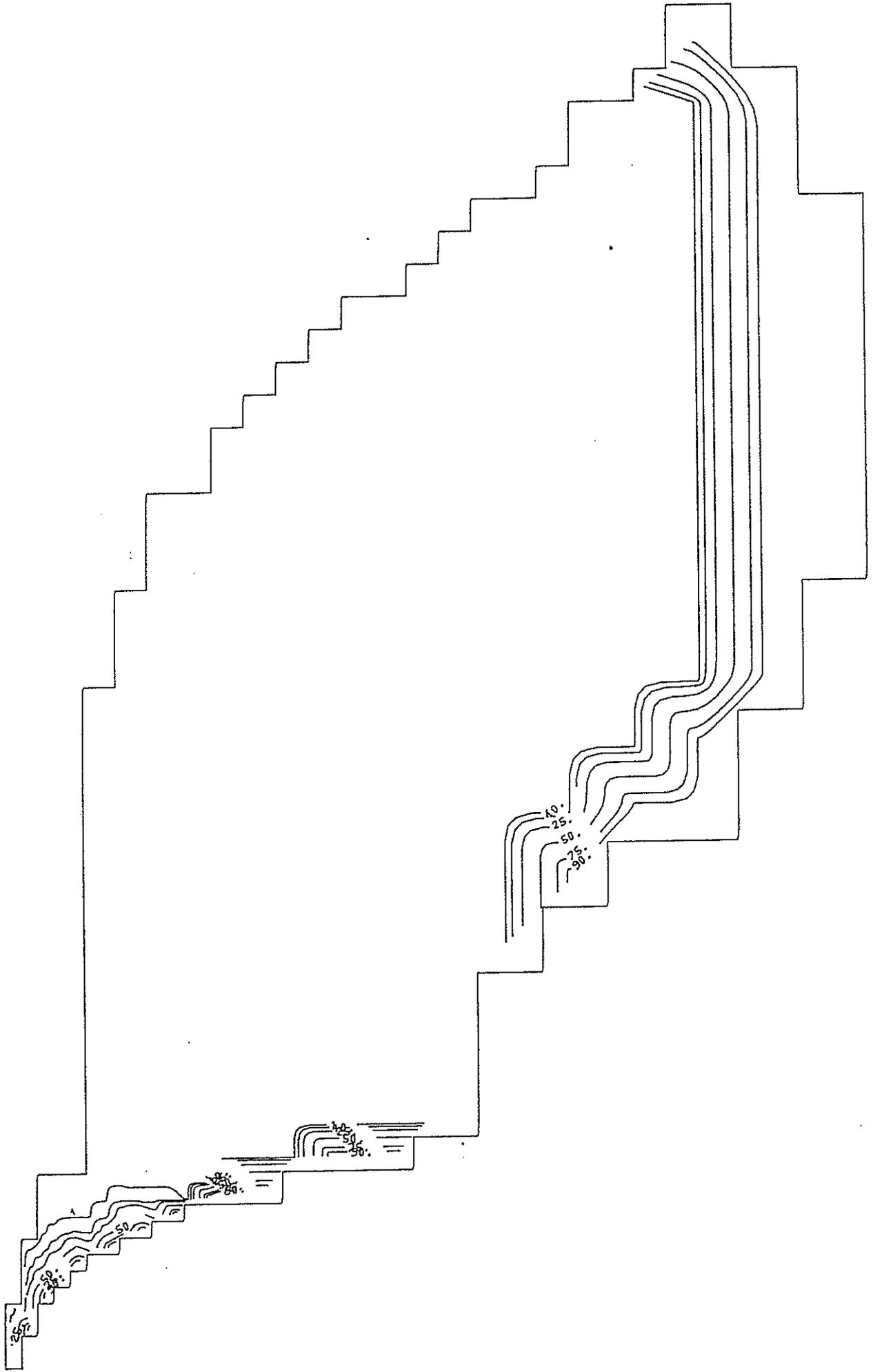




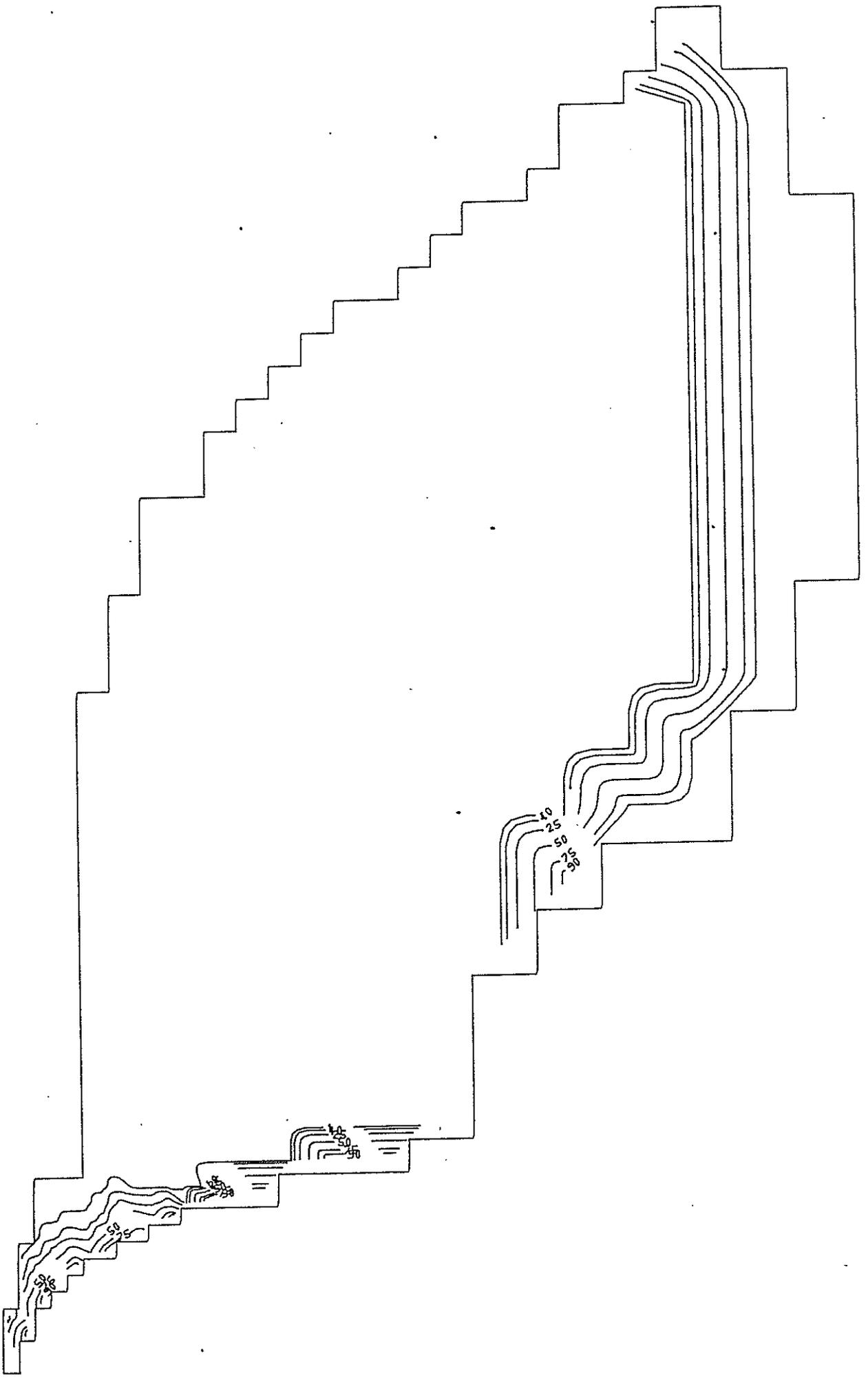
CONCENTRATIONS SEPT. 1984 (RESUCON/96)



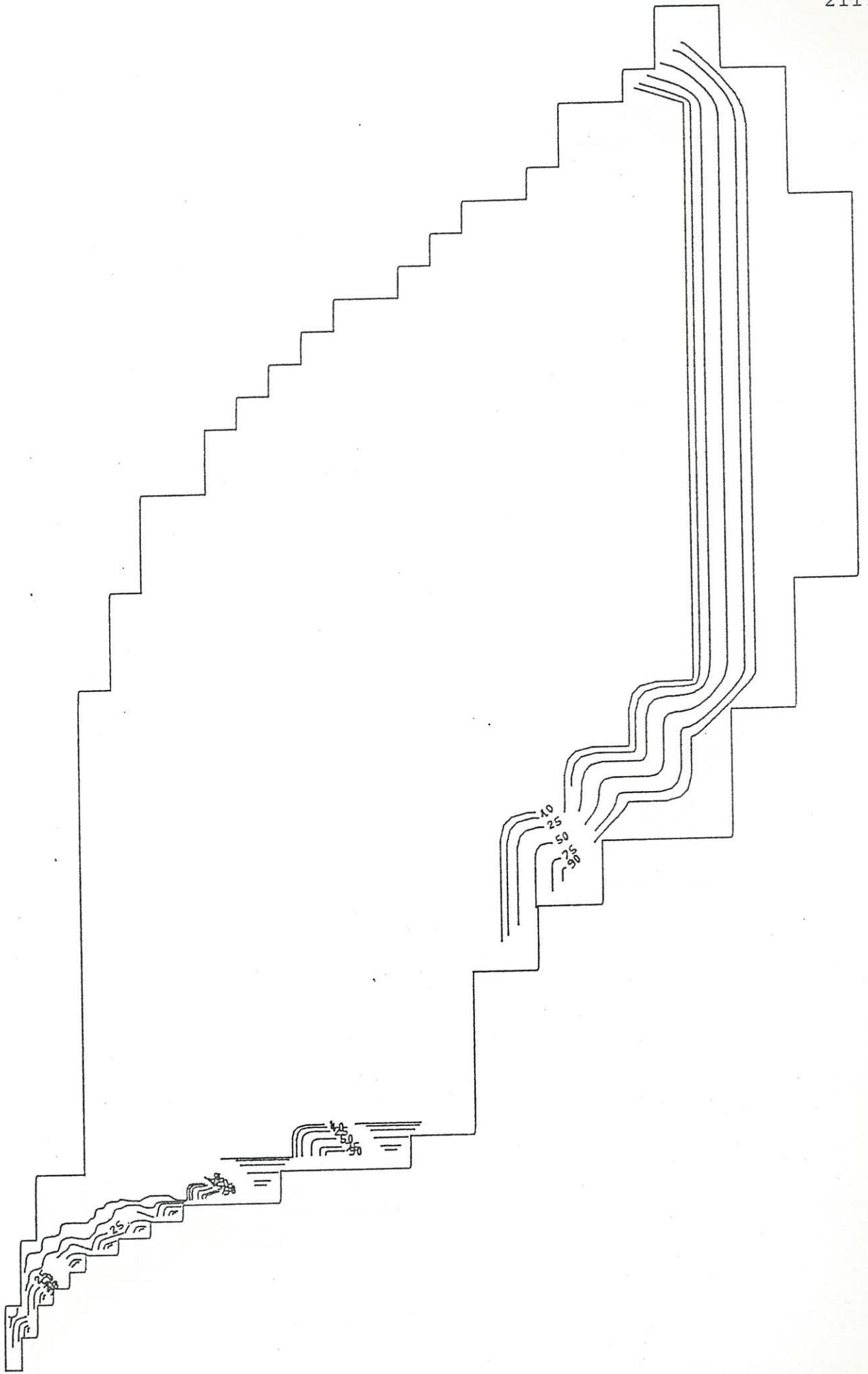
CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL/HUMIDE <RESUCONH/120 >



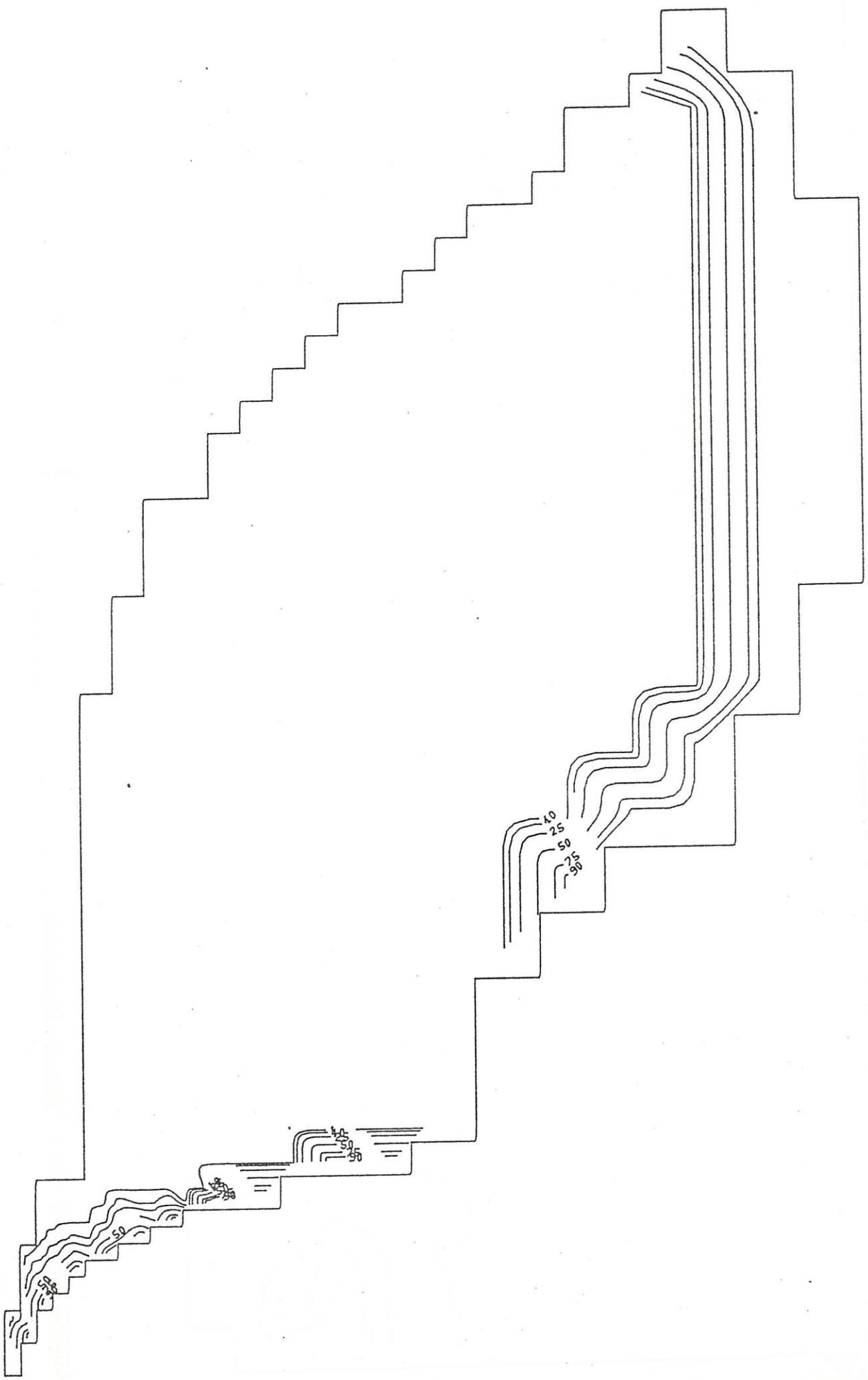
CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL./SIMUL. SECHE (RESUCONS/120)



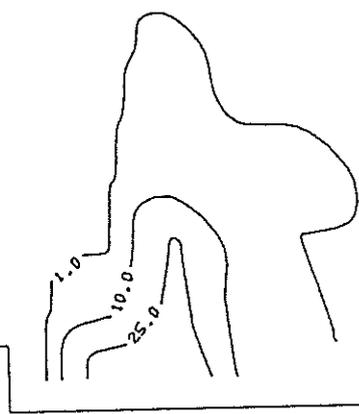
CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL.HUMIDE/RECHARGE (RESURECH/120)



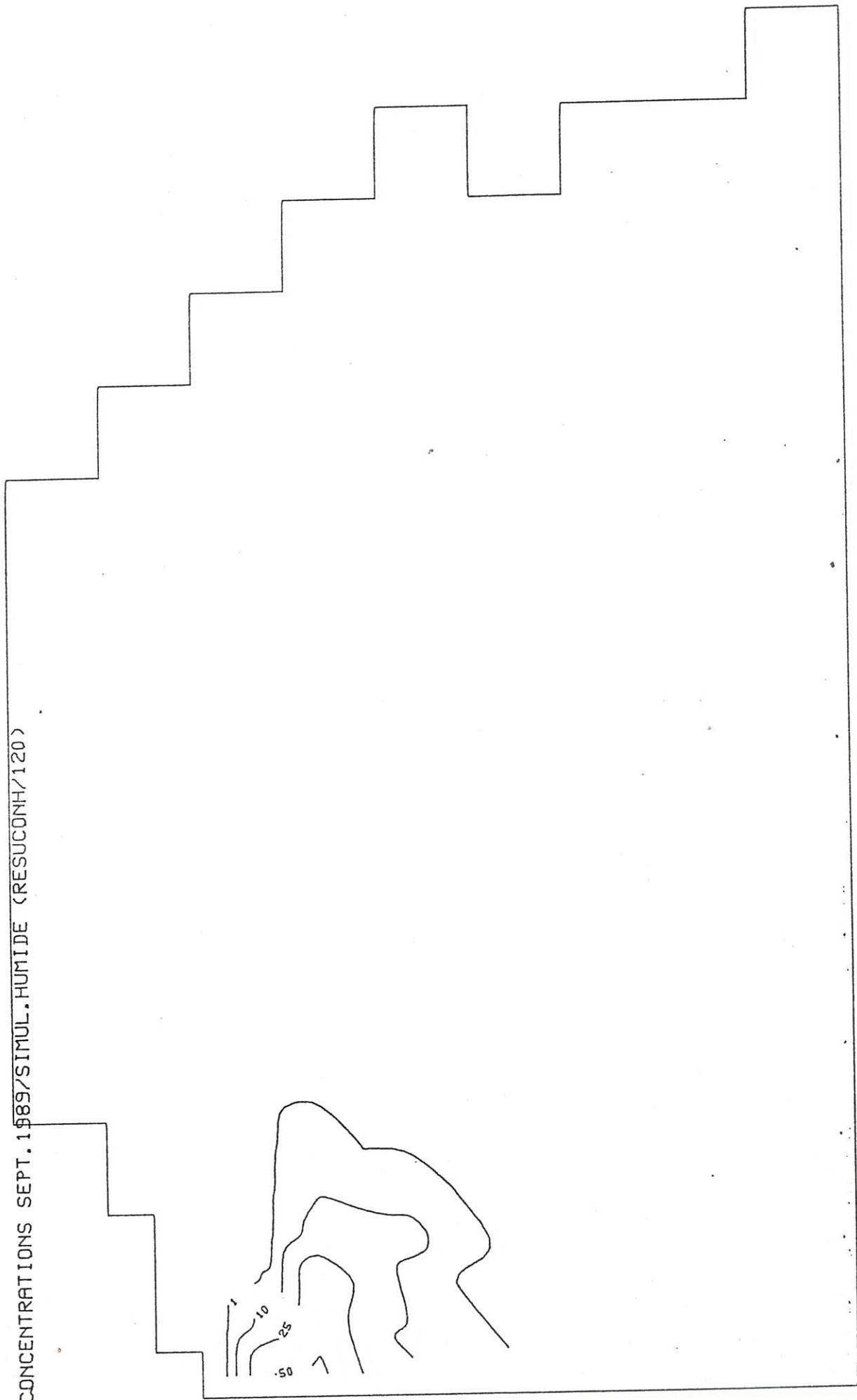
CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL. SECHE/RECHARGE (RESURECS/120)



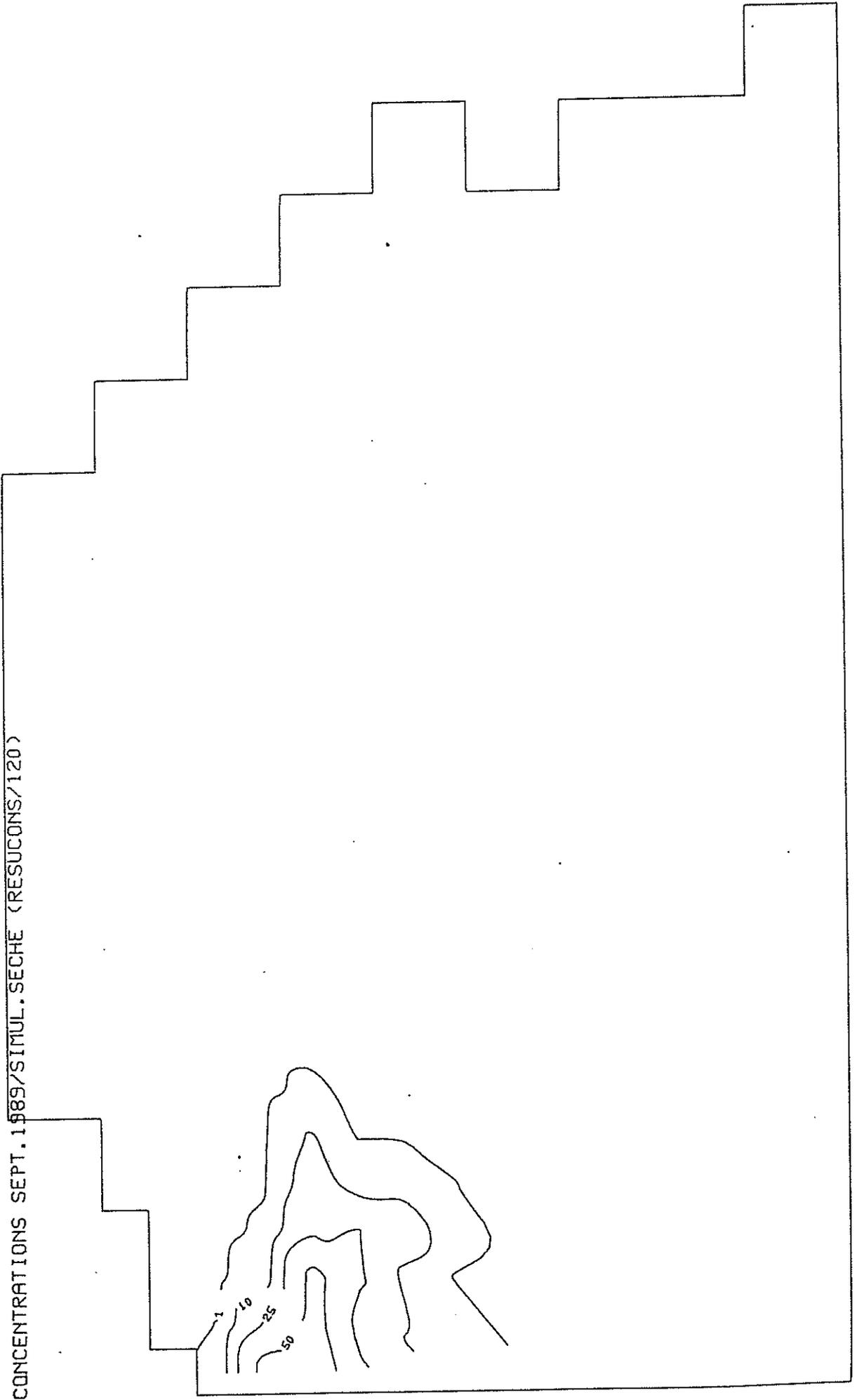
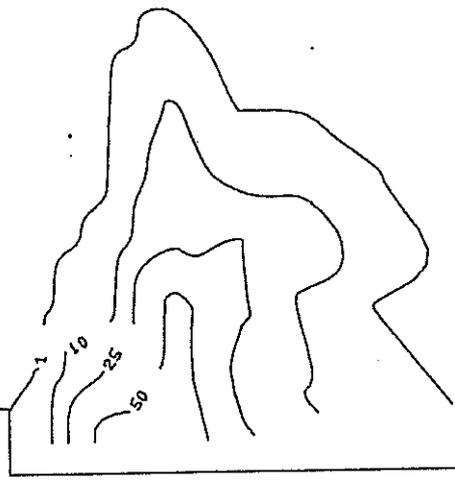
CONCENTRATIONS SEPT. 1984 (RESUCON/96)



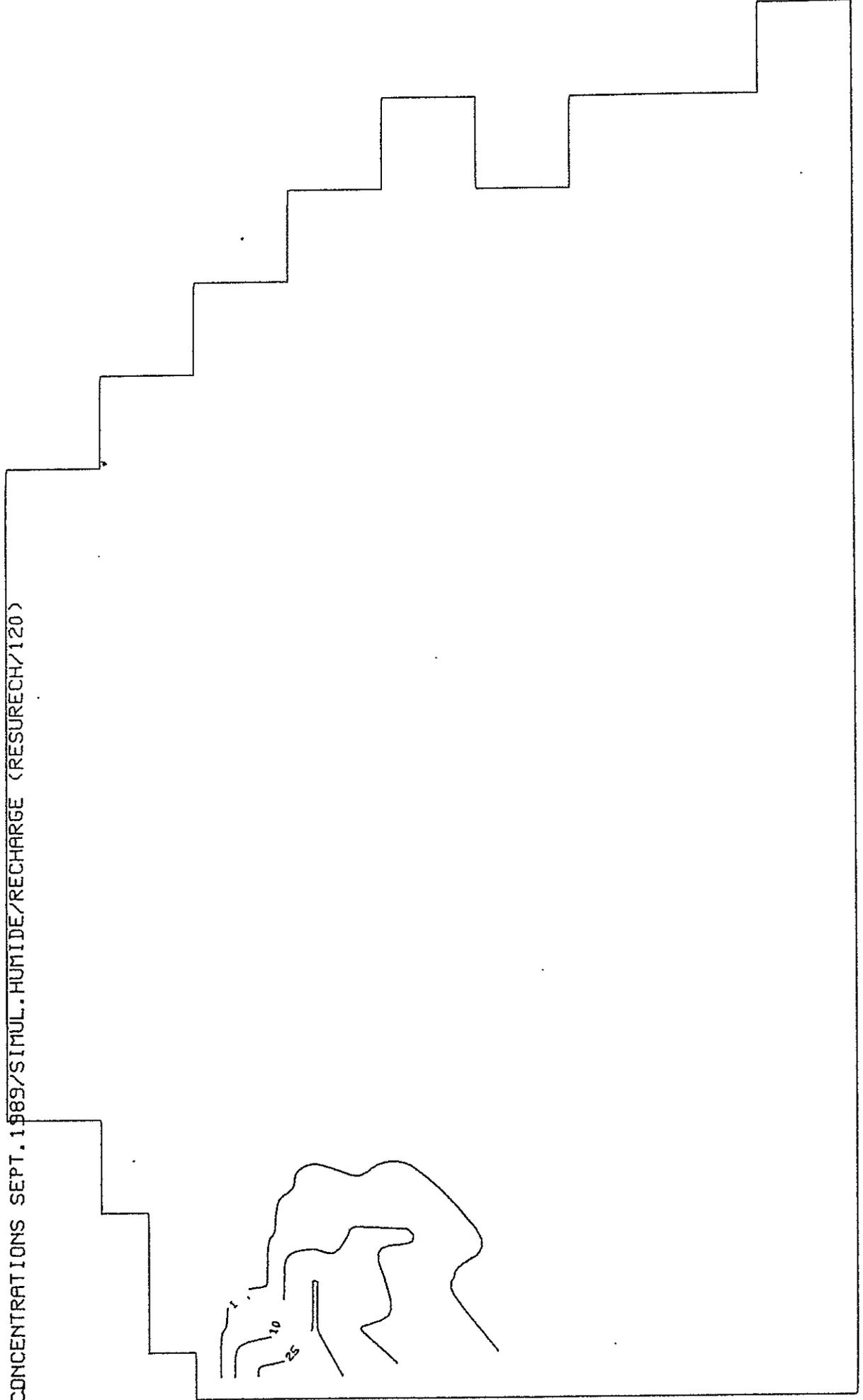
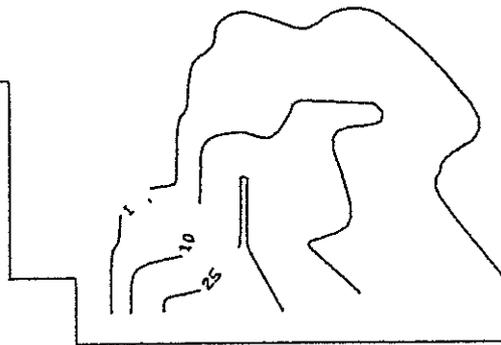
CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL.HUMIDE (RESUCONH/120)



CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL. SECHE (RESUCONS/120)



CONCENTRATIONS SEPT. 1989/SIMUL.HUMIDE/RECHARGE (RESURECH/120)





### 3.- CONCLUSIONES

La primera conclusión es que el modelo de flujo es ya funcional, como lo demuestran las simulaciones realizadas que, al cabo de cinco años, no presentan anomalías aparentes. Si se exceptúa la ya citada zona de Onayar (en la cual sólo cabe calar un campo de transmisividades variables en función del espesor y de la litología del acuífero saturado, es decir, variable con el tiempo), se puede considerar que el conjunto del modelo representa de forma fidedigna lo que ocurre, y va a ocurrir, en el Campo de Dalías. No obstante, y como todos los modelos recién realizados, puede ser mejorado.

En cuanto al modelo de concentraciones, los resultados de las simulaciones son más bien halagüeños, aún a sabiendas de que es un modelo bastante aproximado (interfase vertical). Además, el utilizar la porosidad total en lugar de la porosidad cinemática, da un resultado más bien pesimista, en el sentido de que se admite que una mayor intrusión es simultánea a un menor potencial. Sin embargo, conviene no olvidar que las hipótesis estructurales de partida no son más que hipótesis, que exigen una confirmación antes de que se pueda dar fe a los resultados de las simulaciones.

En el aspecto de los resultados de las simulaciones, no hay mucho que decir puesto que, como ya se ha dicho anteriormente, estas últimas pretendían esencialmente confirmar la bondad

del modelo, y dar algunas orientaciones. De momento, solamente cabe subrayar el interés de la recarga artificial. Otras simulaciones deberán enseñar los efectos de una recarga con caudales inferiores y/o repartidos de otra forma. Es realmente ahora cuando se va a poder empezar "en serio" a simular las distintas opciones posibles.

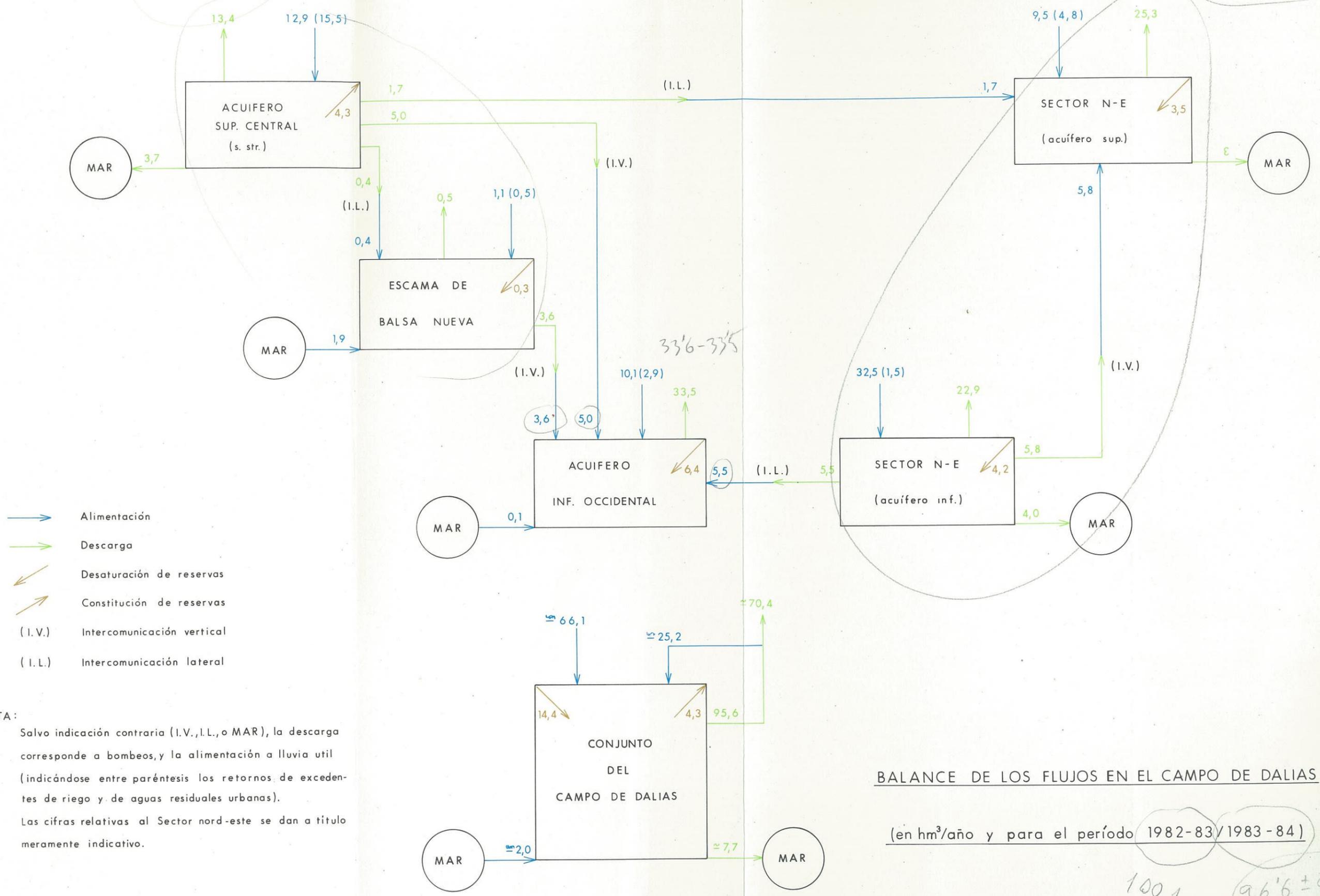
Cabe aquí lamentar que el Sector nor-este no haya sido todavía modelizado, pero se puede esperar que, en breves plazos, se pueda proceder al complemento de estudios necesarios y, de ahí, a la modelización del resto del sistema.

A pesar de que la coherencia de los datos no haya podido ser contrastada, gracias a un modelo, para dicho Sector nor-este, ha parecido interesante representar, en la figura adjunta, los balances de flujo de cada uno de los acuíferos y del conjunto del sistema constituido por el Campo de Dalías y la vertiente meridional de la Sierra de Gádor. Dicha figura ilustra perfectamente, en el aspecto cuantitativo, el estado actual de las aguas subterráneas en esta parte de la provincia, y sugiere que ya es hora de que se empiece a pensar en el futuro.

No cabe duda de que ha llegado el momento de que la autoridad política competente defina claramente una política del agua, es decir la forma de utilizar los recursos hídricos globales de la comarca que sea acorde con una política de producción agrícola de la misma a 15 ó 20 años vista. Entonces se podrá "devolver la pelota" a los técnicos para que encuentren la mejor solución (es decir, la más económica) para que se pueda cumplir el objetivo de producción asignado a las aguas de la comarca o, si resulta imposible dicho objetivo (por su coste), que faciliten los elementos que permitan fijar otro menos ambicioso.

82-83/83-84  
16'5 - 13'3

50 = 49'8 ± 2



- Alimentación
- Descarga
- ↘ Desaturación de reservas
- ↗ Constitución de reservas
- (I.V.) Intercomunicación vertical
- (I.L.) Intercomunicación lateral

NOTA:  
Salvo indicación contraria (I.V., I.L., o MAR), la descarga corresponde a bombeos, y la alimentación a lluvia útil (indicándose entre paréntesis los retornos de excedentes de riego y de aguas residuales urbanas).  
Las cifras relativas al Sector nord-este se dan a título meramente indicativo.

BALANCE DE LOS FLUJOS EN EL CAMPO DE DALIAS

(en hm<sup>3</sup>/año y para el período 1982-83/1983-84)

100.1

96'6 ± 2