

PROYECTO DEL  
GUADALQUIVIR

UNDP/FAO Gobierno Español

MODELO ANALOGICO R-C

de la

Formación acuífera de GUADIX (Granada)

— INFORME —

Sept. Dic. 1971

PROYECTO DEL  
GUADALQUIVIR

UNDP / FAO Gobierno Español

1. INTRODUCCION Y GENERALIDADES

1.1. RESUMEN

El trabajo que aquí se presenta trata de la realización de un modelo eléctrico R-C (circuito resistivo-capacitivo) para el estudio del comportamiento de una acuífera del Plioceno y Cuaternario de DE LA FORMACION ACUIFERA DE GUADIX (Granada)

Informe

Por: Manuel del Valle Cardenete <sup>x</sup>

Diego Pascual Vidal <sup>xx</sup>

y Fernando Anguita Bartolomé <sup>xx</sup>

Sept - Dic. 1971

I N D I C E

~~1. Introducción y Generalidades~~

~~1.1. Resumen~~

PREAMBULO

~~1.2. Geología~~

1.1. Hidrogeología

2. Datos de base

3. Factores de escala

4. Análisis en Régimen Permanente

5. Análisis en Régimen Transitorio

5.1. Programas impuestos al modelo R-C

5.2. Resultados

5.2.1. Respuestas de los programas I y II

5.2.2. Respuestas del programa III

5.2.3. Respuestas de los programas IV y V

6. Conclusiones

X UNIVERSIDAD DE GRANADA. PROYECTO DEL GUADALQUIVIR. INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO  
XX PROYECTO DEL GUADALQUIVIR. SERVICIO GEOLOG. DE OBRAS PUBLICAS

XX

FOREWORD. - *ABSTRACT*

This paper deals with the application of analog simulation techniques (R-C networks) to an actual aquifer system. The analysis of the system cannot be considered finished; validation will be achieved upon historical records development. For this reason, the conclusions reported here may not be regarded as strictly quantitative results. In fact, the R-C aquifer analog should be contemplated as a tool, able to provide many hints for the better understanding of the system behavior and, consequently, for increasing the probabilities of succeeding in the forecasting tasks.

The simulation conditions and procedures reported here could be qualified as "basic". More sophisticated techniques, equipment and electronic devices are applied now. The reader can find adequate information through the titles listed under "bibliography".

---

PREAMBULO. -

Este artículo trata de la técnica de simulación analógica (circuitos R-C) aplicada a un caso real. El estudio del sistema no se puede dar por terminado en lo que respecta a la confrontación del modelo con datos históricos de explotación del acuífero. Por este motivo, los resultados expuestos en las conclusiones no deben considerarse rigurosamente cuantitativos. En general, el modelo analógico R-C debe contemplarse como una herramienta capaz de proporcionar muchas pistas que ayudan al mejor entendimiento del comportamiento del sistema acuífero y que aumentarán, en consecuencia, las probabilidades de éxito en las tareas de predicción.

Los procedimientos y condiciones de simulación aquí expuestos pueden calificarse como "básicos". En la actualidad se aplican técnicas mucho más complejas en lo que respecta a equipo y elementos electrónicos. El lector encontrará la información adecuada entre los títulos de las referencias bibliográficas.

---

## 1. INTRODUCCION Y GENERALIDADES

### 1.1. RESUMEN

El trabajo que aquí se presenta trata de la realización de un modelo eléctrico R-C (circuito resistivo-capacitivo) para el estudio del comportamiento de la formación acuífera del Plioceno y Cuaternario de Guadix. Actualmente este manto funciona en régimen permanente sin que existan en él apenas explotaciones mecanizadas, ubicándose sus principales zonas de drenaje en el Cuaternario que forma el Rio Verde y consistiendo éstas en manantiales o zanjas de drenaje principalmente, a excepción de las Minas de Alquife que para la explotación del mineral de hierro contenido en las calizas de la Mischungszone (al SW de la formación) extrae un caudal continuo de unos 100-120 l/seg.

La primera parte de este trabajo ha consistido en el estudio del régimen permanente mediante la construcción de una red de resistencias, ajustándolas a los estudios de transmisividad llevados a cabo mediante sondeos aislados destinados a este reconocimiento (además del litológico). Se simuló entre las isopotenciales extremas (1080 m y 880 m) y se ajustó la piezometría del modelo con la imposición adicional de seis cotas de potencial en la traza del rio y el caudal de extracción en la mina.

La segunda parte ha consistido en el estudio del comportamiento de la formación ante posibles explotaciones futuras según programas preestablecidos, para lo que se completó la malla de resistencias hasta los límites deseados y se añadieron los condensadores que permiten simular el almacenamiento.

La construcción y análisis del modelo R-C se ha realizado en el Laboratorio de Modelos Analógicos del Servicio Geológico de Obras Públicas, en Madrid.

## 1. GEOLOGIA

La Formación Guadix <sup>esta integrada por</sup> ~~consiste en~~ una acumulación de depósitos detríticos de origen fluvial (Plioceno), dispuestos en alternancias de conglomerados, arenas y limos, predominando los elementos gruesos en los bordes de la formación, <sup>que pasan a</sup> ~~y los elementos más limos, arenas~~ ~~es~~ e incluso arcillas ~~es~~ en la parte central de la cuenca. La potencia es variable, desde unos 40 metros en los bordes hasta unos 300 metros en la parte central, por lo que puede suponerse que, en conjunto sobrepasa, ~~los 100 metros~~. Este Plioceno está, en su mayor parte, recubierto por un Cuaternario antiguo, detrítico, de tres o cuatro metros de espesor.

<sup>El Mioceno</sup> ~~Y~~ aflora en pequeña <sup>extensión</sup> ~~proporción~~ (borde norte), ~~el Mioceno~~ <sup>y esta</sup> constituido por limos y margas azules (Tortonense), pudiendo constituir éste, localmente, el substratum impermeable de la <sup>Formación</sup> ~~Formación~~ Guadix.

Al Sur y ~~(parte en el)~~ NE de la formación, aflora el complejo de Sierra Nevada, <sup>formado</sup> ~~constituido~~ por una potente serie Paleozoica impermeable que <sup>constituye</sup> ~~constituye~~, en su mayor parte, el substratum general de la cuenca. Superpuesta a ésta, aparece la Mischungszone, que aflora principalmente en el borde NE y sobre la que descansa el Trías Alpujárride, compuesto por filitas y calizas <sup>y</sup> dolomías, constituyendo estas últimas una unidad transmisora que alimenta la <sup>Formación</sup> ~~Formación~~ Guadix en su borde NE. La importancia de esta aportación es pequeña, dada la baja transmisividad del Plioceno en su zona de contacto o próxima.

A lo largo del Río Verde se extiende el Cuaternario reciente con unos 20 metros de espesor medio y de 300 a 1300 metros de anchura, que constituye actualmente la zona de captación para los regadíos existentes.

## 1.1. HIDROGEOLOGIA

La Formación ~~Picozina~~ de Guadix, junto con el Cuaternario, forman el principal acuífero, constituyendo este último la unidad de drenaje actual del manto.

La alimentación del manto, aparte de la infiltración directa producida por la pluviometría (20 %), proviene principalmente del borde Sur, es decir, de Sierra Nevada en forma de aguas superficiales de deshielo, que al llegar a la formación se infiltran en ella.

El gradiente hidráulico sigue la dirección SE-NW siendo del orden del 2% al 4%, actuando el cauce del Río Verde como zona de drenaje.

La distribución zonal de la transmisividad (T) y del coeficiente de almacenamiento (S), obtenidas tras ensayos puntuales vienen reflejadas ~~en el presente informe~~ en las figuras 2 y 3 respectivamente.

Se adjunta un mapa que resume tanto las características geológicas como hidrogeológicas. (Fig. )

Para un conocimiento más detallado de la zona puede consultarse el Informe: "Proyecto Piloto de utilización de Aguas Subterráneas para el desarrollo agrícola de la Cuenca del Guadalquivir" UNDP/FAO-GOBIERNO ESPAÑOL.

NO Las referencias bibliográficas 6-20 contienen la descripción detallada de los estudios realizados en esta zona.

## 2. DATOS DE BASE

La investigación de la Formación GUADIX, realizada por el "Proyecto Guadalquivir", —estudio geológico apoyado en datos — de sondeos mecánicos, geofísica y ensayos de laboratorio; defini— ción de los límites hidrológicos, sus características y el régimen del manto—, sirvió de base para la construcción de un modelo mate— mático en régimen permanente. El calibrado de este modelo consis— tió, como es usual, en lograr una buena correlación entre la res— puesta ofrecida por el mismo y los potenciales hidráulicos medidos en el manto acuífero real. Esta correlación condujo, en definitiva, a definir con mejor aproximación los distintos valores de transmi— sividad y su distribución.

En ausencia de suficientes ensayos de bombeo, los valo— res del coeficiente de almacenamiento se han estimado en función — de la resistividad (parámetro medido en la exploración geofísica) y conductividad eléctrica del agua almacenada en el acuífero, y en las experiencias acumuladas como fruto de los trabajos realizados en esta zona. De estos trabajos se encuentra información completa, hasta fecha muy reciente, en las referencias bibliográficas nos. 6 y 10, de donde se han obtenido también los datos de base para la — construcción del modelo eléctrico analógico que ahora nos ocupa. — Estos datos se resumen en:

a) Límites geométricos y características de los mismos;

Las condiciones de borde se ilustran en la FIGURA -1- superpues— tos a la cuadrícula que define la malla y en la FIGURA -5- las — equipotenciales del manto acuífero prototipo en régimen permanente.

b) Valores de la transmisividad.- Para la denominada "Formación Guadix" oscilan entre 20 y 2500 m<sup>2</sup>/dia. Sin embargo se alcanza un valor superior a 5000 en la discontinuidad que representa <sup>su contacto con el</sup> ~~dentro del~~ Plioceno la existencia de un <sup>nivel de</sup> ~~afloramiento~~ calizos (Mischungszone), explotado actualmente por las minas de Alquife. - Esta discontinuidad geológica, aunque supone un porcentaje muy bajo si se compara con el área total del Plioceno, tiene importancia a causa de los bombeos que aprovecha la explotación minera (vid. rfa. nº 7, tomo II, Aprovechamiento de los recursos, pág. 23). En la FIGURA -2- se ilustra la distribución de transmisividades adoptada en el modelo eléctrico.

c) Valores del coeficiente de almacenamiento.- En las zonas más detríticas y con menos proporción limo-arcillosa se estima el valor de este parámetro en 0.1 que puede disminuir hasta 0.005 para las zonas en que los limos arcillosos predominan sobre <sup>los tramos detríticos de la formación</sup> ~~el débil espesor de la formación detrítica.~~ En la FIGURA -3- se presenta la distribución adoptada en el modelo para el coeficiente de almacenamiento.

Las condiciones de partida para el análisis del modelo en régimen permanente se fundamentan en que la unidad hidrogeológica de Guadix funciona, en la actualidad, prácticamente de modo natural. Esta afirmación se entiende en sentido lato ya que incluye la explotación, "artificial" pero ininterrumpida, debida a los bombeos de Alquife. Los niveles freáticos, observados durante los dos últimos años, apenas han sufrido variación, en especial los "niveles altos". Puede considerarse la equipotencial 1080 m. prácticamente constante en su proyección en planta y, del mismo modo, ignorar los pequeños desplazamientos de la equipotencial 880 m. por lo



que, a efectos del tratamiento en régimen permanente, estas dos líneas serán los límites extremos a los que se aplicará la diferencia de potencial eléctrico suministrada por una fuente de corriente continua.

Para el análisis en régimen transitorio se han previsto los programas de explotación del acuífero que se razonan en el informe citado en la rfa. nº 2. Se resumen en dos alternativas: —  
 1ª.- bombeo neto de 18 Hm<sup>3</sup>/año en la zona central del llano; —  
 2ª.- id de 9 Hm<sup>3</sup>/año e incremento hasta alcanzar los 16 Hm<sup>3</sup>/año — en la zona de las calizas explotadas por la mina.

Para la elección satisfactoria de los factores de escala, que determinarán las magnitudes de los elementos físicos del modelo eléctrico, es necesario conocer, siquiera aproximadamente, el valor que pueden alcanzar los descensos ante estos programas de extracciones. A tal efecto se toma como base el máximo de 70 m. — que se debe producir en el extremo oriental ante la alternativa 2ª. Los restantes serán presumiblemente inferiores. Esta estimación es tá basada en la extensión de cálculo que se ha hecho, por medio — del modelo digital, supuesto alcanzado el régimen permanente en ca da una de las alternativas de explotación.

### 3. FACTORES DE ESCALA. CALCULO DE LA MALLA

En la selección de los factores de escala que determinan los valores de los elementos de la malla R-C en función de los parámetros hidrogeológicos, se ha seguido el criterio ordinario que conjuga los valores extremos de los datos de base con los correspondientes del material eléctrico disponible comercialmente. El cálculo que genera el primer valor numérico, parte de acotar la excitación máxima a que será sometido el modelo (en los análisis de régimen transitorio) para que la carga resultante de las combinaciones de resistencias representativas de "pozos" con la malla, no sea inferior a la impedancia de salida de los generadores de impulsos que se vayan a utilizar. Las notaciones, definición y unidades de los factores empleados <sup>son</sup> es:

Factor de escala	relación expresada	unidades	notación simbólica
$a_2$	Potencial hidrául./id. eléct.	m./voltios	$dh = a_2 \cdot dv$
$a_3$	caudal/intensidad	$m^3/\text{dia. amp.}$	$Q = a_3 \cdot J$
$a_4$	tiemp.hidrául./id. eléct.	dias/seg.	$dt_p = a_4 \cdot dt_m$

De acuerdo con ~~Apoyado~~ en estos factores y en la distancia  $a_0$  (m.) del prototipo, ~~que correspondiente~~ <sup>correspondiente</sup> a la separación entre dos nudos contiguos de la malla cuadrada del modelo, la analogía establecida concluye en la definición de los valores de las resistencias -R- y condensadores -C- según:

$$R \text{ (ohms.)} = a_3 / a_2 \cdot T \quad :: \quad C \text{ (farad.)} = \frac{a_2 \cdot (a_0)^2}{a_3 \cdot a_4} \cdot S \quad \dots \text{ (I)}$$

en donde,  $T$  es el valor de la transmisividad ( $m^2/\text{dia}$ ) asignado al ramal de los nudos que conecta  $R$ ; y  $S$  es el coeficiente de almacenamiento para el área  $(a_0)^2$  cuyo centro es el nudo en consideración al que queda conectado el condensador  $C$ . La deducción de estas expresiones ha sido tratada profusamente en la bibliografía técnica existente (vid refs. nos. 5 y 13, por ejemplo).

La asignación de los valores numéricos apropiados a los factores de escala correspondientes a este modelo se hizo conforme a los criterios siguientes:

factor  $a_3$  ; se tomó en consideración la posibilidad de estudiar los efectos de un programa de bombeo estacional intermitente hasta alcanzar la duración de tres años. Esto implica la utilización de tres generadores de impulsos por nudo o grupo de nudos a los que sea aplicable la extracción. Con el criterio de no rebasar la intensidad de 2 m.amp. por generador y de aplicar la extracción máxima de  $18 \text{ Hm}^3/\text{año}$  repartida entre los tres generadores disponibles, el factor  $a_3$  está determinado por el cociente  $18/2 \times 3$ , i.e. =  $3 \text{ Hm}^3/\text{año.mamp}$  que resulta en:

$$\underline{a_3 = 10^8/12 \text{ m}^3/\text{dia.amp.}}$$

factor  $a_2$  ; para no utilizar en la malla resistencias inferiores a 100 ohms. y, en consecuencia, al hacer corresponder a éstas el máximo valor de  $T$  ( $5.550 \text{ m}^2/\text{dia}$ ) se obtiene:

$a_2 = a_3/100 \times 5.550$ , en donde sustituyendo el factor  $a_3$  anterior, resulta:

$$\underline{a_2 = 15 \text{ m./volt.}}$$

Este factor implica que los descensos máximos previsibles ante las excitaciones programadas serán del orden de 4,5 voltios en el modelo. Por tanto, el error que por este concepto se introduzca en el balance de extracciones por bombeos (error inherente a la disminución progresiva de la amplitud inicial de 50 voltios - suministrados por los generadores de impulsos) no debe ser superior al 9%.

factor  $a_4$ ; se conservó la separación de malla impuesta en la "cuadrícula" del modelo matemático, tal que  $a_0 = 1000$  m. El mayor valor de  $S = 0,1$  se hace corresponder al máximo comercial de  $C = 0,1$  microfarads. Según esto el factor de tiempos, despejado de (I), resulta en:

$$a_4 = 1,8 \times 10^6 \text{ dias/seg.}$$

Este valor equivale a 5 años/miliseg. lo que permite la representación de programas de explotación sobradamente largos y tolera además programas con fraccionamiento estacional.

La sustitución en (I) de los valores numéricos prece- dentes proporciona, en función de los parámetros hidrológicos  $T$  y  $S$ , los correspondientes a las resistencias y condensadores que con- figuran el modelo según:

$$\frac{R = 10^7 / 13.T}{(\text{ohm})} :: \frac{C = 10^{-6}.S}{(\text{farad})}$$

#### 4. ANALISIS EN REGIMEN PERMANENTE

Este análisis se ha efectuado excitando la fracción de la malla de resistencias comprendida entre las cotas de potencial análogas a las de 1080 m. y 880 m. del prototipo por medio de la fuente de suministro de c.c. que se utiliza en los modelos de papel conductor. Esta fuente está dotada de un divisor de potencial que permite obtener el correspondiente a cada nudo.

El cambio de factores de escala sobre los establecidos viene dado por la nueva relación entre potencial hidráulico y eléctrico. La diferencia de potencial suministrada por la fuente, 12,9 volts., corresponde a <sup>una diferencia de potencial hidráulico de</sup> 200 m. en el prototipo hidráulico, con lo que se tiene:  $a_2' = 15,5 \text{ m/volt.}$  El producto  $R \times T = a_3/a_2$  se conserva y define, por tanto,  $a_3'/a_2'$ , lo que determina el nuevo factor de "caudales" que expresado en las unidades más cómodas para el análisis que sigue es:  $a_3' = 3,1 \text{ Hm}^3/\text{año.mamp.}$

De la misma fuente de suministro se derivaron en paralelo dos circuitos de resistencias que se aplicaron al modelo como indica el croquis del ESQUEMA 1. La calibración del circuito "rio" se consiguió después de seis tanteos y la del circuito mina valiéndose de una resistencia variable para fijar la salida de corriente del modelo (en el nudo de la mina) en 1 m.amp., esto es  $3,1 \text{ Hm}^3/\text{año.}$  Resistencias fijas sustituyeron finalmente a la variable.

Con este esquema de excitación, los resultados de la medición eléctrica interpretados como isopotenciales hidráulicas configuran el mapa de la FIGURA -4-. Comparado éste con la distribución "real" en el prototipo (FIGURA -5-), las desviaciones que -

se observan se estimaron que pueden quedar incluidas en el margen - de error producido por insuficiencia de datos (observaciones en pozos de control), por lo que no se procedió a posteriores ajustes en la estructura de la malla. Por otra parte, la medición de intensidades circulantes permitió establecer el balance eléctrico en régimen permanente y, naturalmente, deducir del mismo el balance hidráulico. La concordancia con los supuestos de partida (balance del modelo matemático) es lo bastante precisa para no aconsejar modificaciones - en la malla de resistencias. Nótese, sin embargo, que esta coincidencia añade poco a la garantía de fidelidad en la analogía modelo-prototipo, que se conserva prácticamente igual a la que se haya con seguido con el modelo matemático.

El resultado del balance ha sido:

	miliamperios	Hm <sup>3</sup> /año
ENTRADAS	14,9	46,2
<hr/>		
SALIDAS: Mina	0,94	2,92
Drenaje, nudo 11-9	6,30	} ..... 41,38
" " 10-10	4,40	
" " 8-11	1,08	
" " 6-11	1,22	
" " 4-11	0,35	
"Underflow"	0,70	2,17
<hr/>		
Sumas	14,99	46,47

*Las coordenadas de los nudos (i,j), están representadas en la secuencia: ordenada, abscisa*

El error, inherente a la medición eléctrica, expresado como: (salidas - entradas)/entradas resulta en  $\pm 0,6 \%$ .

## 3. ANALISIS EN REGIMEN TRANSITORIO

Las entradas representan el caudal de circulación a través de la sección vertical definida por la isopotencial 1080 m. De modo análogo, las salidas "underflow" totalizan la circulación por la sección vertical de la isopotencial 880 m.

Las salidas por drenaje en los nudos suman en cada caso los caudales de manantiales, tomas de acequias de riego y extracciones de cualquier índole próximas al cauce de drenaje natural del — manto. En el modelo matemático <sup>(vid. ref. 2)</sup> comprenden todos los nudos del cauce del río: un total de diez, aguas abajo del nudo 11-9. En el modelo eléctrico ha sido suficiente la simulación del circuito "río" conectado a la mitad del número de nudos del cauce.

La coincidencia, a que nos hemos referido, entre este balance y el "matemático" está dada por la de estas dos últimas partidas, i.e.:  $41,38 \text{ Hm}^3/\text{año}$ , vs.  $41,21 \text{ Hm}^3/\text{año}$ .

---

que para el modelo fuera del orden de 2 kms.

La excitación del modelo B-C se efectuó de acuerdo con los programas de explotación establecidos en el análisis del modelo matemático en régimen permanente (vid. ref. n° 7, tomo II, págs. 40 y siguientes). Dentro del modelo eléctrico el programa de bombeo que se sugiere para el modelo matemático cumple dos funciones:

1°. Disponer de resultados comparativos siempre que se recurra a que al estudiar el modelo digital en régimen permanente el equilibrio se alcance a largo plazo (40-50 años) mientras que el modelo B-C el tiempo de bombeo se reduce a 20 años.

2°. Aplicar al modelo eléctrico sus programas de bombeo con las probables extracciones reales futuras en el caso de que la respuesta del mismo dará un orden de ideas sobre el comportamiento de la formación.

## 5. ANALISIS EN REGIMEN TRANSITORIO

En el análisis en régimen permanente se excitó la fracción de malla de resistencias comprendida entre las cotas piezométricas 1080 y 880 m. correspondientes a la piezometría histórica. - Para el análisis en régimen transitorio se procedió a completar la red de resistencias, así como a la construcción de la red de condensadores de acuerdo con los valores del coeficiente de almacenamiento estimado (figura 3). Aguas arriba de la isopotencial 1080 m se completó la red de resistencias conforme a la distribución zonal de transmisividades entre esta cota y los límites previstos para el modelo. Aguas abajo de la isopotencial 880 m se extendió una faja de ampliación equivalente a 6 Kms, según la técnica preconizada por Karplus (vid rfa <sup>4</sup>5). La condición límite en el borde SE fue establecida considerando despreciables las variaciones de potencial que pudieran producirse más allá de 5 Kms (en dirección normal al borde); de modo análogo en el borde de contacto con las calizas se supuso que esta distancia fuera del orden de 2 Kms.

La excitación del modelo R-C se efectuó de acuerdo con los programas de explotación establecidos en el análisis del modelo matemático en régimen permanente (vid rfa n° 6, tomo II, pags 46 y siguientes). Someter el modelo eléctrico a los mismos programas de bombeo que el supuesto para el modelo matemático cumple dos funciones:

*Confrontación de las respuestas de ambas simulaciones como*  
 1º. ~~Disponer de resultados comparativos siempre útiles,~~  
*un método de validación viable, al no disponer de datos históricos*  
~~a pesar de que al estudiar el modelo digital en régimen permanente,~~  
*que cumplieren esta función*  
~~el equilibrio se alcance a largo plazo -40-50 años- mientras que en~~  
~~el modelo R-C el tiempo de bombeo se reduzca -20 años-.~~

2º. Aplicar al modelo eléctrico sus programas de acuerdo con las probables extracciones reales futuras en el acuífero, — con lo que la respuesta del mismo dará un orden de ideas acerca del comportamiento del ~~la formación.~~ *sistema acuífero.*



## 5.1. PROGRAMAS IMPUESTOS AL MODELO R-C

Los programas de explotación impuestos ~~al modelo~~ han sido:

Programa I:

Bombeo teórico <sup>continuo</sup> de  $18 \text{ Hm}^3/\text{año}$  ~~continuo~~ en el Llano.

Duración del bombeo: 20 años.

Condición de borde del río: ~~Potencial libre~~ <sup>Potencial libre</sup> ~~convección hidráulica río acuífero~~

~~En este ensayo se limitó la infiltración del río en el drenaje limitado por adición,~~  
 modelo mediante el uso de resistencias (de  $1000 \Omega$ ) conectadas entre el potencial de referencia (tierra) y los nudos correspondientes al río.

Programa II:

Bombeo teórico <sup>continuo</sup> de  $18 \text{ Hm}^3/\text{año}$  ~~continuo~~ en el Llano.

Duración de bombeo: 20 años.

Condición de borde del río: <sup>Potencial constante</sup>

Es decir, el mismo bombeo que en el Programa I, pero sin resistencias en el río. Se supuso para este ensayo (y para los siguientes programas) que el potencial en los nudos del río permanece constante, por tanto en la piezometría resultante (por adición algebraica de los descensos provocados por el bombeo y las cotas del estado inicial) no se habrán alterado los potenciales en los nudos del río. Teniendo en cuenta que el río es efluente, esta analogía puede servir hasta que las medidas eléctricas que cuantifican la disminución del caudal que drena por el cauce (fuentes, atarjeas, etc) indiquen que se ha podido sobrepasar la escorrentía subterránea media.



En ambos programas la excitación se logra mediante 3 generadores de impulsos conectados a los nudos tal como indica el esquema 2. Las resistencias de "pozo",  $R_w$ , son todas del mismo

valor y se obtienen de:  $R_W = \frac{a_3 V}{Q_W/n}$  en donde:

$$a_3 = 3 \text{ Hm}^3/\text{año.mamp.}$$

$$V = 50 \text{ v.}$$

$$Q_W = 18 \text{ Hm}^3/\text{año.}$$

$$n = 20 \text{ (número de nudos en que se distribuye } Q_W),$$

por lo tanto el valor nominal de cada resistencia es:  $R_W = 167 \text{ K}\Omega$ .

La amplitud del impulso aplicado resultó de 47,5 volt (en lugar de los 50 v del cálculo), y el valor medido en cada  $R_W$  fue de  $178 \text{ K}\Omega$ ; el caudal total de extracción impuesto resultó en:  $16 \text{ Hm}^3/\text{año}$ .

### Programa III:

Bombeo teórico neto de  $9 \text{ Hm}^3/\text{año}$  continuos en el Llano.

Sobrebombeo teórico de  $13 \text{ Hm}^3/\text{año}$  continuos en la Mina.

Duración del bombeo: 20 años.

En este programa la excitación se logra mediante 4 generadores de impulsos conectados a los nudos del Llano y de la Mina tal como indica el Esquema 3.

El valor de las resistencia  $R_W$  se obtiene como anteriormente:

$$R_W (\text{llano}) = \frac{a_3 V}{Q_W/n} \text{ en donde: } Q_W = 9 \text{ Hm}^3/\text{año}; n = 10,$$

y por tanto el valor nominal de cada resistencia es:

$$R_W (\text{llano}) = 167 \text{ K}\Omega$$

$$R_W (\text{mina}) = \frac{a_3 V}{Q_W/n} \text{ para } Q_W = 13 \text{ Hm}^3/\text{año}; n = 2,$$

implica:

$$R_W (\text{mina}) = 23.1 \text{ K}\Omega$$

Las amplitudes de impulsos obtenidas y los valores medidos sobre el nominal de las resistencias, tal como se anota en el esquema 3, definieron los caudales de extracción realmente impuestos:  $8 \text{ Hm}^3/\text{año}$  en el llano y  $13.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$  en la mina.

Programa IV: (Alternativa estacional del programa III)

Bombeo teórico de un caudal de  $18 \text{ Hm}^3/\text{año}$  durante 6 meses en el llano; parada los seis meses siguientes.

Duración del ciclo: 3 años.

Bombeo teórico de  $13 \text{ Hm}^3/\text{año}$  en la mina, durante los tres años.

Para lograr la simulación estacional con el equipo de excitación básico es necesario utilizar un generador de impulsos para cada periodo de bombeo proyectado. La sucesión de impulsos que constituyen un programa de bombeo de 3 años de duración, alternando seis meses de bombeo con seis meses de parada, está representada en el gráfico 3 y utiliza 3 generadores. Este programa se aplicó a los 10 nudos de bombeo en el llano (esquema 3 del programa III) por lo que fueron necesarios 6 generadores de impulsos (3 para cada grupo de 5 nudos). Mientras dura la aplicación del bombeo el caudal de extracción es doble que el empleado en el programa anterior. Para no exceder la capacidad de los generadores ni cambiar las resistencias  $R_w$  se modificó el factor de escala de caudales, teniéndose:  $a_3' \text{ (nuevo)} = 2a_3 = 6 \text{ Hm}^3/\text{año.mamp}$ , y en consecuencia:  $a_2' \text{ (nuevo)} = 2a_2 = 30 \text{ m/volt}$ , conserva constante la relación  $a_3/a_2$ , y no altera R.T ni C/S (véase ecuación I, del capítulo 3).

Los valores de  $R_w$ , calculados como anteriormente, resultan en:  $R_w \text{ (llano)} = 167 \text{ K}\Omega$  ;:  $R_w \text{ (mina)} = 46.2 \text{ K}\Omega$ . Las resistencias de los dos nudos de la mina son de valor doble a las utilizadas en el programa III. Es fácil deducir que tomando como capacidad de carga máxima aconsejable, 2 mamp por generador, sólo es necesario utilizar un generador de impulsos para la excitación de la "mina" en este programa.

Los caudales de extracción realmente impuestos, calculados sobre los valores medidos de  $R_w$  y resultantes de  $V$  (gráfico 3), fueron: 16 Hm<sup>3</sup>/año intermitentes en el llano y 12.8 Hm<sup>3</sup>/año en la mina.

Programa V: (Programa III reducido a sus tres primeros años).

Comparación de curvas descensos-tiempos del Programa IV con las que resultarían de un bombeo que extrajera al año el mismo volumen de forma continua (9 Hm<sup>3</sup> llano y 13 Hm<sup>3</sup> mina).

Se observará en el gráfico 3 que la amplitud del impulso para el bombeo en el llano es de 25 V. Aunque el cambio de caudales de bombeo debe hacerse sustituyendo  $R_w$ , se optó en este caso por la operación más sencilla (reducir la amplitud de  $V$ ) por tratarse de un programa comparativo (Programa III) y, en consecuencia, en caso de producirse errores suplementarios éstos serían detectados. Los programas de extracción realmente impuestos, calculados sobre los valores medidos de  $R_w$  y resultantes de  $V$  (gráfico 3) fueron: 8.3 Hm<sup>3</sup>/año en el llano y 12.8 Hm<sup>3</sup>/año en la mina.

### 3.2.1. Respuesta de los programas I y II

Los isodensosos y la piezometría resultante se reflejan en las figuras 6 a 9. Los efectos de considerar el drenaje del río obstaculizado (programa I) o no (programa II) se traducen, como es lógico, en un incremento general de los descensos que crece

## 5.2. RESULTADOS

El análisis de las respuestas <sup>(del modelo a)</sup> de la excitación comprende piezometría y balance hidráulico. Los resultados que atañen a piezometría se presentan en dos planos para cada programa, i.e: curvas de isodescensos al final del bombeo, y resultado de la superposición de éstas al estado inicial. El balance hidráulico está reflejado por los hidrogramas separados de las "cuatro fuentes" representadas en el modelo que deben equilibrar el caudal de extracción impuesto, a saber: Almacenamiento

Rio

Borde SE

Borde calizas

Nótese que este balance es "diferencial" y el significado de sus efectos es el de adición algebraica a la situación tomada como inicial. Por lo tanto el hidrograma correspondiente al río, que en el estado inicial es efluente, reflejará "disminución" de caudales drenados por el mismo, mientras que en las fuentes restantes los caudales reflejan "incremento" sobre los que se estuvieran produciendo en el estado inicial. En consecuencia, tomando como estado inicial el régimen estacionario, el único valor que parte de "cero" en las fuentes del balance es el hidrograma correspondiente al almacenamiento.

### 5.2.1. Respuesta de los programas I y II

Los isodescensos y la piezometría resultante se reflejan en las figuras 6 a 9. Los efectos de considerar el drenaje del río obstaculizado (programa I) o no (programa II) se traducen, como es lógico, en un incremento general de los descensos que crece

al acercarse a la zona de bombeo. El balance hidráulico se presenta ilustrado por los hidrogramas del Gráfico 1. Las medidas eléctricas se han traducido a sus análogas hidráulicas para el instante final correspondiente a los 20 años de bombeo. Las ordenadas en voltios divididas por el valor de la resistencia de medida  $R_B = 100 \Omega$  reproducen la intensidad, y ésta multiplicada por el factor  $a_3$  valora el caudal. El factor resultante para "leer" directamente caudales es  $\alpha_3 = 30 \text{ Hm}^3/\text{año.volt}$ . En el hidrograma total de ambos programas se obtiene el resultado constante de 0.51 volts, i.e:  $15.3 \text{ Hm}^3/\text{año}$  (en la pantalla del osciloscopio se registró una ligera pendiente, inferior a 10 m.volts/m.seg).

El error sobre caudal impuesto ha sido:  $\epsilon_q = \frac{15.3 - 16}{16} = -4,4 \%$

Utilizando un amplificador operacional (vid rfa <sup>3</sup>6) — se integraron los caudales instantáneos con los resultados siguientes:

	Programa I	Programa II
	Hm <sup>3</sup>	
- Volumen cedido por el almacenamiento en 20 años . . . . .	190.5	160.-
- id por déficit de drenaje al rio. . . . .	68.0	110.-
- id por incremento de alimentación en Borde SE . . . . .	22.5	28.-
- id por incremento de alimentación en Borde calizas . . . . .	3.0	3.-
<b>Total . . . . .</b>	<b>284.0</b>	<b>301.-</b>

Total  $397.5 \text{ Hm}^3$   
 Error sobre volumen  $\epsilon_v = \frac{397.5 - 424}{424} = -6.2\%$

5.2.3. Resp. El error volumétrico ( $\epsilon_v$ ) sobre extracción impuesta - ( $Q_v \cdot t = 16 \text{ Hm}^3/\text{año} \times 20 \text{ años} = 320 \text{ Hm}^3$ ) ha sido del -11.2% y -6.0% respectivamente. Se observará que la operación de integración electrónica introduce mayor error que ~~los~~ encontrados en la valoración de hidrogramas.

### 5.2.2. Respuesta del programa III

Los isodescensos y la piezometría resultante se ilustran en las figuras 10 y 11. Las mayores depresiones producidas han sido próximas a los 70 m (en la mina) tal como se había supuesto en las consideraciones que apuntaban al cálculo de factores de escala (véase 2. Datos de base, párrafo final).

El balance hidráulico se resume en el gráfico 2. En éste se han representado los hidrogramas de caudales siguiendo la misma pauta de los programas anteriores y se ha añadido además los gráficos de volúmenes acumulados tal como fueron observados en la integración electrónica. El factor de conversión directa para "leer" volúmenes fue  $\alpha_1 = 750 \text{ Hm}^3/\text{volt}$ .

Los resultados indican:

$$\text{Error sobre caudal impuesto } \epsilon_q = \frac{20.25 - (8 + 13.2)}{21.2} = -4.5\%$$

Volumen cedido por almac. (20 años)	---	172.5 Hm <sup>3</sup>
id por déficit de drenaje al río	---	195.0 "
id por incremento de alimentac. en Borde SE	---	26.3 "
id id en Borde Calizas	---	3.7 "
		397.5 Hm <sup>3</sup>
Total	---	397.5 Hm <sup>3</sup>

$$\text{Error sobre volumen } \epsilon_v = \frac{397.5 - 21.2 \times 20}{424} = -6.2\%$$

### 5.2.3. Respuestas de los programas IV y V

Los impulsos aplicados para obtener el bombeo, los hidrogramas totales, y su integración (volúmenes acumulados), en ambos programas, se ilustran en el gráfico 3. Calculando como anteriormente, los errores por pérdidas eléctricas en caudal y volumen, fueron:

$$\text{programa IV: } \varepsilon_q = \frac{28.2 - 28.8}{28.8} = -2\% \quad \varepsilon_v = \frac{58.5 - 62.4}{62.4} = -6.2\%$$

$$\text{programa V: } \varepsilon_q = \frac{20.4 - 21.1}{21.1} = -3.2\% \quad \varepsilon_v = \frac{60. - 63.1}{63.1} = -5\%$$

El gráfico 4 indica, en nudos seleccionados, la discontinuidad de las funciones descensos vs. tiempo en la extracción intermitente. Esta discontinuidad es naturalmente más acusada cuanto más próximo es el nudo a la zona de bombeo en el llano. Por otra parte, es sensible la tendencia a equilibrar los resultados que muestran ambos programas, según progresa el tiempo de bombeo.

-----

tanto, siendo limitada nuestra confianza en la representación del prototipo, se han visto también limitadas nuestras conclusiones de información, que han consistido fundamentalmente en averiguar el orden de magnitud de los descensos que se producen en el tiempo, y en qué grado podrían ser afectados los experimentos existentes al incrementarse la explotación.

El estudio seguido, consistente en cinco simulaciones, ha permitido, finalmente,



## 6. CONCLUSIONES

La reacción de manto de Guadix ante unas condiciones de explotación definidas había sido estudiada con la ayuda de un modelo digital en régimen permanente. Los resultados se referían a la nueva situación de equilibrio hidráulico que podría alcanzarse después de un período no precisado de tiempo, probablemente del orden de 40 años.

Para alcanzar una mayor aproximación se programó un estudio en régimen transitorio, valiéndose de un modelo R-C. No obstante, debido por una parte a que el manto se encuentra actualmente en condiciones muy próximas al equilibrio, y por otra a que los datos hidrológicos disponibles no alcanzan la suficiente precisión, no se podía pretender el ajuste del prototipo mediante una comparación a lo largo de un periodo de historia del sistema, como es usual en este tipo de estudios.

Por lo tanto, siendo limitada nuestra confianza en la representatividad del prototipo, se han visto también limitadas nuestras exigencias de información, que han consistido fundamentalmente en tratar de conocer el orden de magnitud de los descensos previsibles, su evolución en el tiempo, y en qué grado podrían ser afectados los aprovechamientos existentes al incrementarse la explotación del manto.

El análisis seguido, consistente en cinco simulaciones, se resume a continuación:

PROGRAMA		I	II	III	IV	V
Incremento de la extracción. $\text{Hm}^3/\text{año}$	Llano	16	16	8	16	8.3
	Mina	—	—	13.2	12.8	12.8
Duración del bombeo. Años		20	20	20	3*	3
Condición de borde en río		Potencial variable	Potencial constante			
Balance de caudales ( $\text{Hm}^3/\text{año}$ ) aportados a la extracción en el instante final del programa por:	almacenamiento	6.3	3.9	3.6		
	disminución del drenaje al río	6.3	9.0	14.1		
	incremento en borde SE	2.1	2.1	2.25		
	id en borde calizas	0.3	0.2	0.3		
Volúmenes integrados ( $\text{Hm}^3$ ) durante todo el programa	almacenamiento	190.5	160.	172.5		
	río	68.	110.	195.		
	borde SE	22.5	28.	26.3		
	borde calizas	3.	3.	3.7		
	totales	284.0	301.0	397.5	58.5	60.-

\* intermitentes (6 meses bombeo, 6 de parada) en el llano

La reacción de los niveles piezométricos, ya descrita en detalle, condicionará principalmente las condiciones económicas de explotación en la zona del llano.

En cuanto a los efectos en el balance actual del sistema, podemos obtener como conclusión más importante del cuadro anterior, que la mayor parte del volumen de agua extraído en todas las simulaciones será -

proporcionado por el almacenamiento o reserva geológica del manto. - Para periodos de bombeo de 20 años el rio Verde podrá ser afectado - entre los límites  $6.3 \text{ Hm}^3/\text{año}$  y  $14.1 \text{ Hm}^3/\text{año}$ ; en el último caso debi do esencialmente al bombeo de la mina de Alquife, caudal que será - restituido de nuevo al rio.

Desde este punto de vista la implantación de un bombeo - en el llano del Marquesado tendrá como consecuencia más importante - la explotación de una reserva geológica; la utilización de esta re- serva para usos agrícolas habrá que considerarla deseable, si se tie ne en cuenta que en otro caso será asimismo agotada y desaprovechada en parte a causa del bombeo de la mina de Alquife.

Si se eligiesen otros valores del coeficiente de almace- namiento menos pesimistas, los resultados obtenidos en este caso se- rían semejantes a los anteriores y simplemente aplicables para un pe riodo de tiempo superior.

Finalmente, parece conveniente <sup>insistir en</sup> ~~indicar~~ que la metodolo- gía seguida en este estudio no ha sido encaminada a establecer un mo delo de predicción muy preciso, sino a acotar dentro de ciertos lími tes los efectos derivados del incremento de la explotación de este - sistema acuífero. <sup>Sin embargo</sup> Los resultados obtenidos podrían ser aprovechables para definir una estrategia de actuación y para dirigir cualquier fu tura recolección de datos hidrogeológicos hacia las variables y pará metros del sistema cuya influencia se estime que puede afectar en ma yor grado la fiabilidad de la predicción y sus consecuencias económi cas.

22 de Marzo de 1972

M. del Valle

D. Pascual

F. Anguita

Referencias bibliográficas

- 1 - Anguita, F. (1971). " Construcción de un modelo R-C basado en datos del acuífero del Delta del Llobregat". I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica - Comunicación E-3-4.
- 2 - Emery, P.A. (1966). "Use of analog model to predict stream flow depletion, Big and Little Blue River Basin, Nebraska" Ground-Water, vol. 4, nº 4. Oct. 1966.
- 3 - Fallot, P.; Faure Muret, A, y Fontboté, J.M. (1967). "Observations sur la partie occidentale de la formation de - Guadix". Bol. Inst. Geol. Min. Esp. T. LXXVII
- 4 - Karplus, W.J. (1958). "Analog Simulation". Mc Graw-Hill.
- 5 - Prickett, T.A. y Lonquist, C.G. (1968) "Comparison between analog and digital simulation techniques for aquifer evaluation". Symposium of Tucson, Dec. 1968.
- 6 - Proyecto del Guadalquivir (Mayo 1971). "Plan de Utilización de las Aguas Subterráneas para el Desarrollo Agrícola de la zona de Guadix". UNDP/FAO-Gobierno Español.
- 7 - Rushton, K.R. y Herbert, R. <sup>(1970)</sup> "Resistance network for three dimensional unconfined groundwater problems with examples of deep well dewatering" Dept. of Civil Engineering; University of Birmingham.
- 8 - Seminario de Modelos Analógicos y Digitales. (Abril 1972) Ministerio O.P. (SGOP y CEH).- Apuntes, Boletín del SGOP en preparación.-
- 9 - Stallman, R.W. (1961). "Preliminary design of an electric analog of liquid flow in the unsaturated zone". Geological Survey Research
- 10 - Valle, M. del (1970). "Estudio Hidrogeológico del Manto Freático de Guadix". Proyecto Guadalquivir, UNDP/FAO-Gobierno Español.
- 11 - Valle, M. del (1971). "Modelo matemático en régimen permanente del Manto Acuífero de Guadix (Granada)". I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica.
- 12 - Vera, J.A. (1970). "Estudio estratigráfico de la Depresión de Guadix-Baza". Bol. Inst. Geol. Min. Esp. T-LXXI-V.
- 13 - Wood, L.A. Gabrisch, R.K. y Patten, E.P. (1965). "Analog model study in the Houston District, Texas". Texas Water Comission Bull. 6508.



INDICE DE FIGURAS, ESQUEMAS Y GRAFICOS

## FIGURAS

- Figura 1 : Condiciones de borde.
- Figura 2 : Distribución de la transmisividad (T).
- Figura 3 : Distribución del coeficiente de almacenamiento (S).
- Figura 4 : Isopotenciales obtenidas con el modelo en régimen permanente.
- Figura 5 : Isopotenciales reales en régimen permanente.
- Figura 6 : Mapa de isodescensos a los 20 años de bombeo: programa I.
- Figura 7 : Piezometría final a los 20 años de bombeo: programa I.
- Figura 8 : Mapa de isodescensos a los 20 años de bombeo: programa II.
- Figura 9 : Piezometría final a los 20 años de bombeo: programa II.
- Figura 10: Mapa de isodescensos a los 20 años de bombeo: programa III.
- Figura 11: Piezometría final a los 20 años de bombeo: programa III.

## ESQUEMAS

- Esquema 1: Croquis del circuito eléctrico (régimen permanente).
- Esquema 2: Conexión a los generadores de impulsos para programas I y II.
- Esquema 3: Conexión a los generadores de impulsos para programa III.

## GRAFICOS

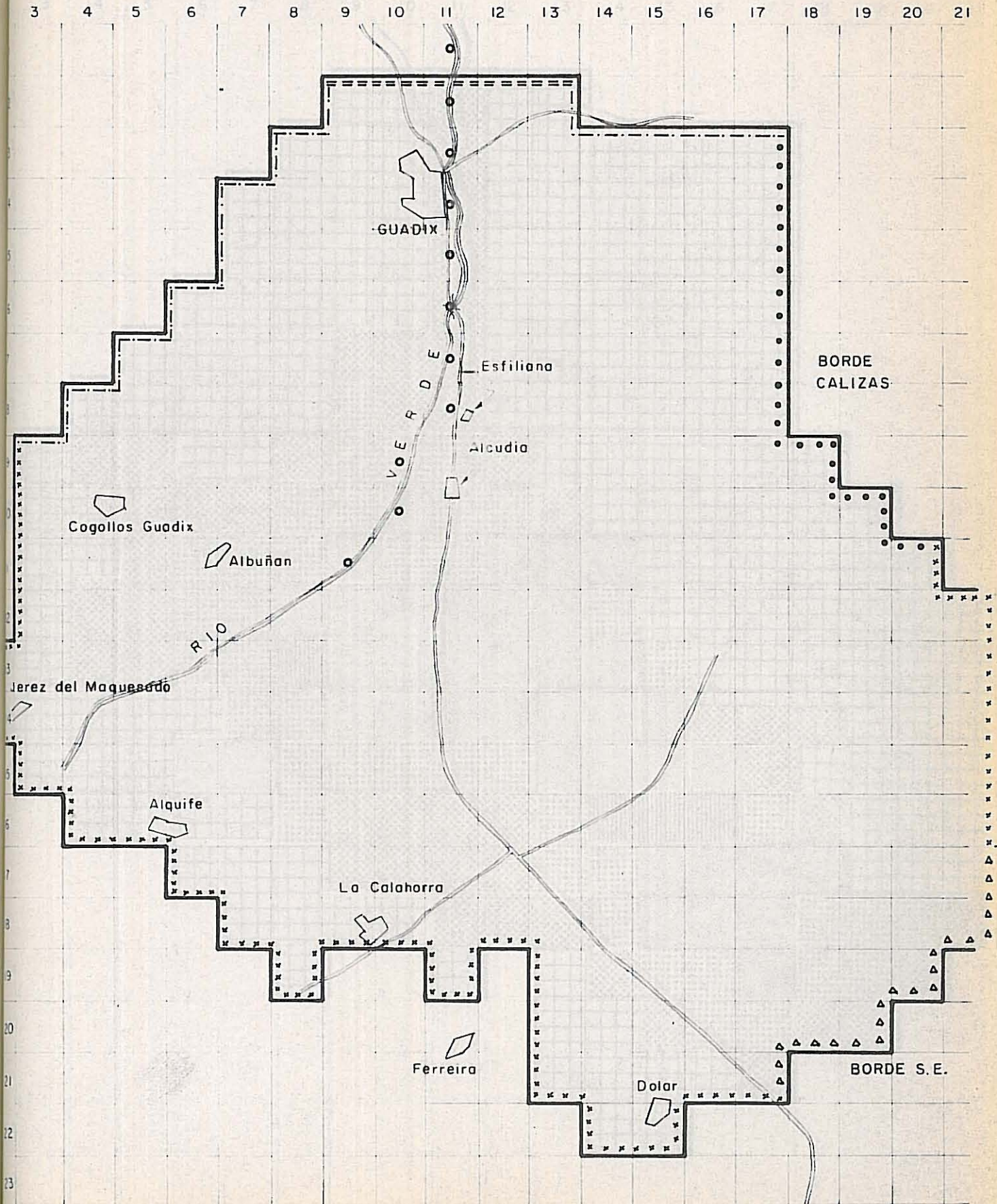
- Gráfico 1: Hidrogramas de los programas I y II.
- Gráfico 2: Hidrogramas y volúmenes acumulados del programa III.
- Gráfico 3: Bombeos, hidrogramas totales y volúmenes: programas IV y V.
- Gráfico 4: Comparación curvas descensos entre programas IV y V.

MAPA HIDROGEOLOGICO: del estudio hidrogeológico del manto freático  
de Guadix.

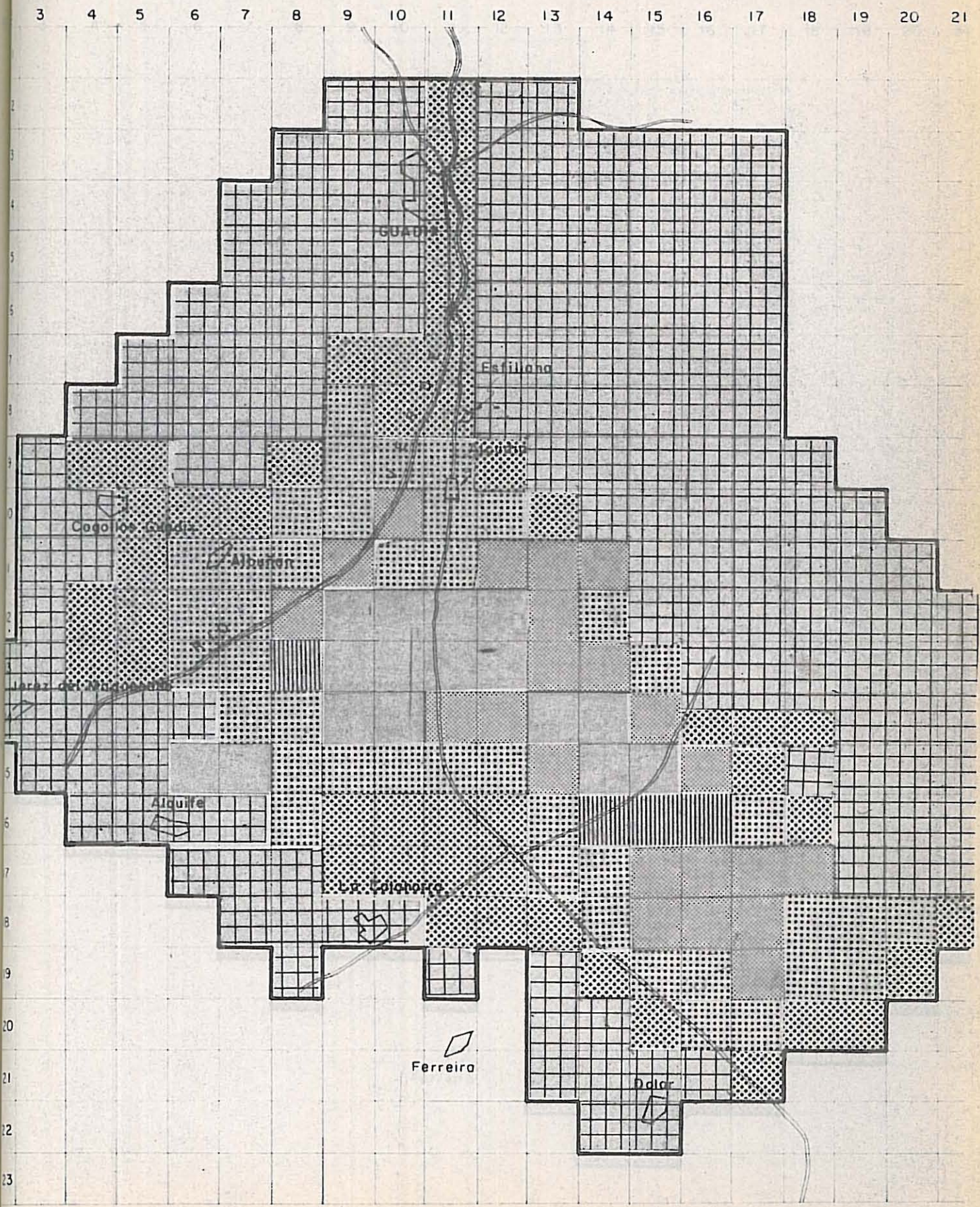
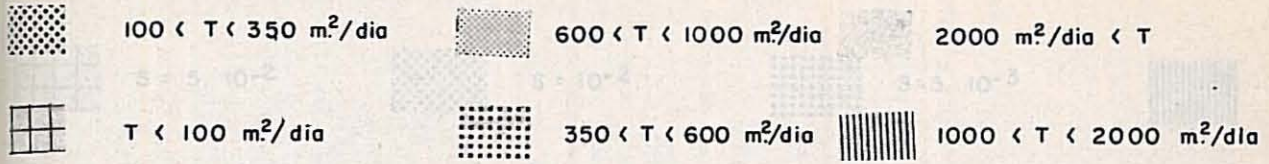
# LEYENDA

# FIGURA I CONDICIONES DE BORDE

- xxxxxxxxx Barrera geologica impermeable
- Divisoria piezometrica actual - se considera como barrera hidraulica
- AAAAAAAAA Divisoria piezometrica actual - (flujo subterraneo condicionado a la variacion de las condiciones de equilibrio)
- Borde semi-permeable.- potencial constante (a 2km. en direcc.normal)
- ==== Borde permeable (faja de extension)
- Nudo del rio



DISTRIBUCION DE TRANSMISIVIDADES (T)





DISTRIBUCION DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)

MAPA DE  
ELECTRICO EN REGIMEN PERMANENTE



$s = 5 \cdot 10^{-2}$



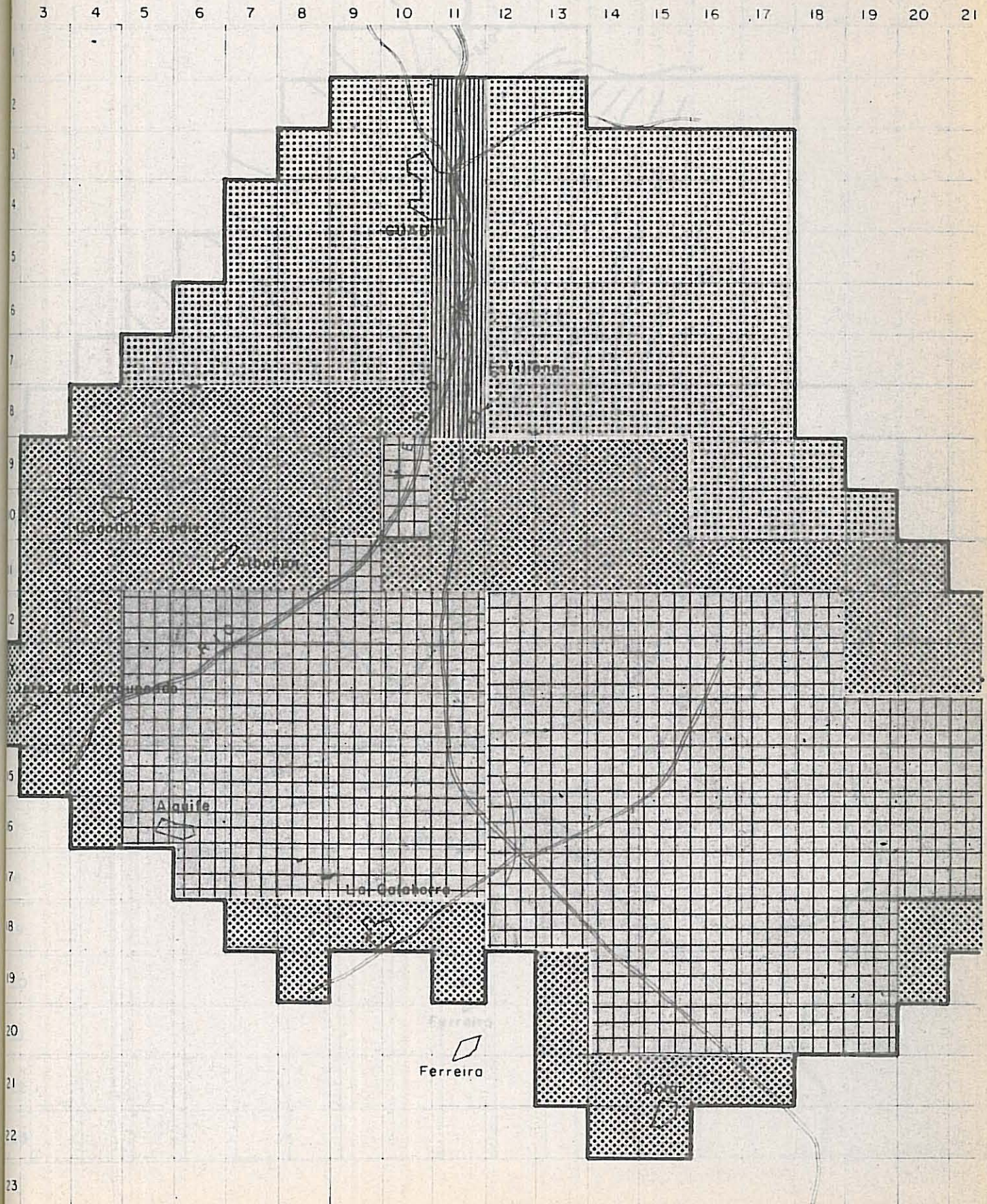
$s = 10^{-2}$



$s = 5 \cdot 10^{-3}$

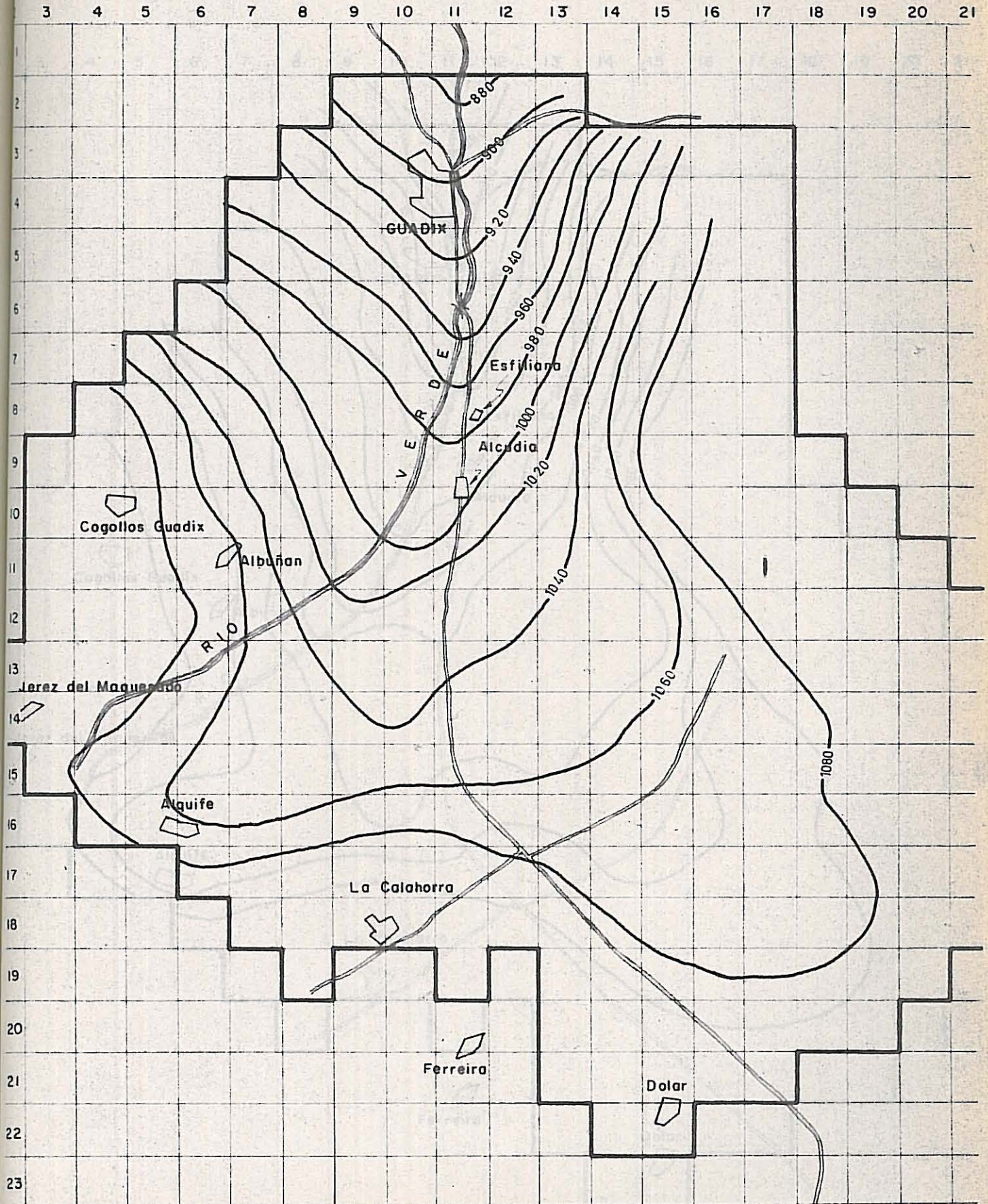


$s = 10^{-1}$



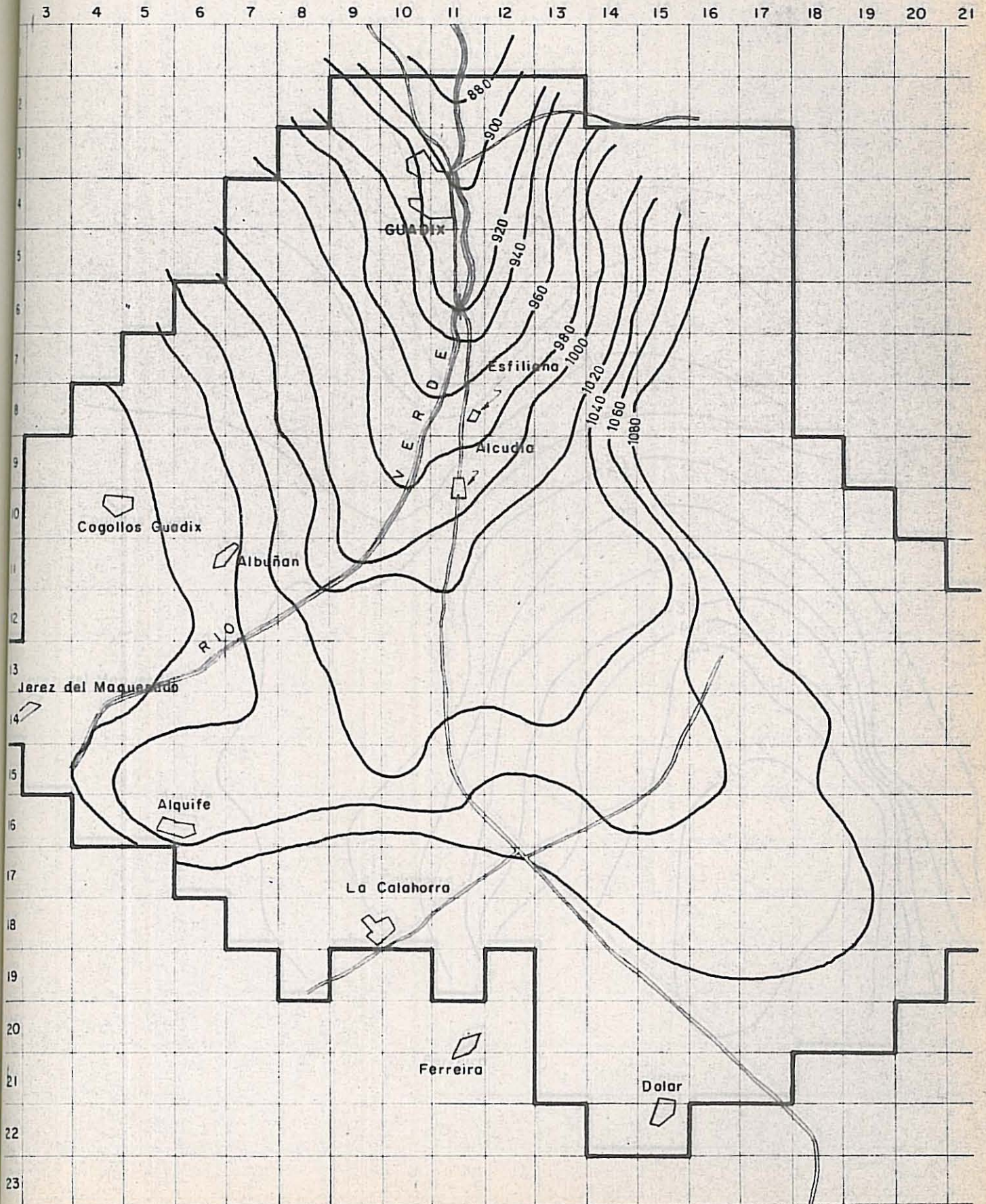
MAPA DE ISOPOTENCIALES OBTENIDO CON EL MODELO ELECTRICO EN REGIMEN PERMANENTE

MAPA DE ISOPOTENCIALES REALES EN REGIMEN PERMANENTE

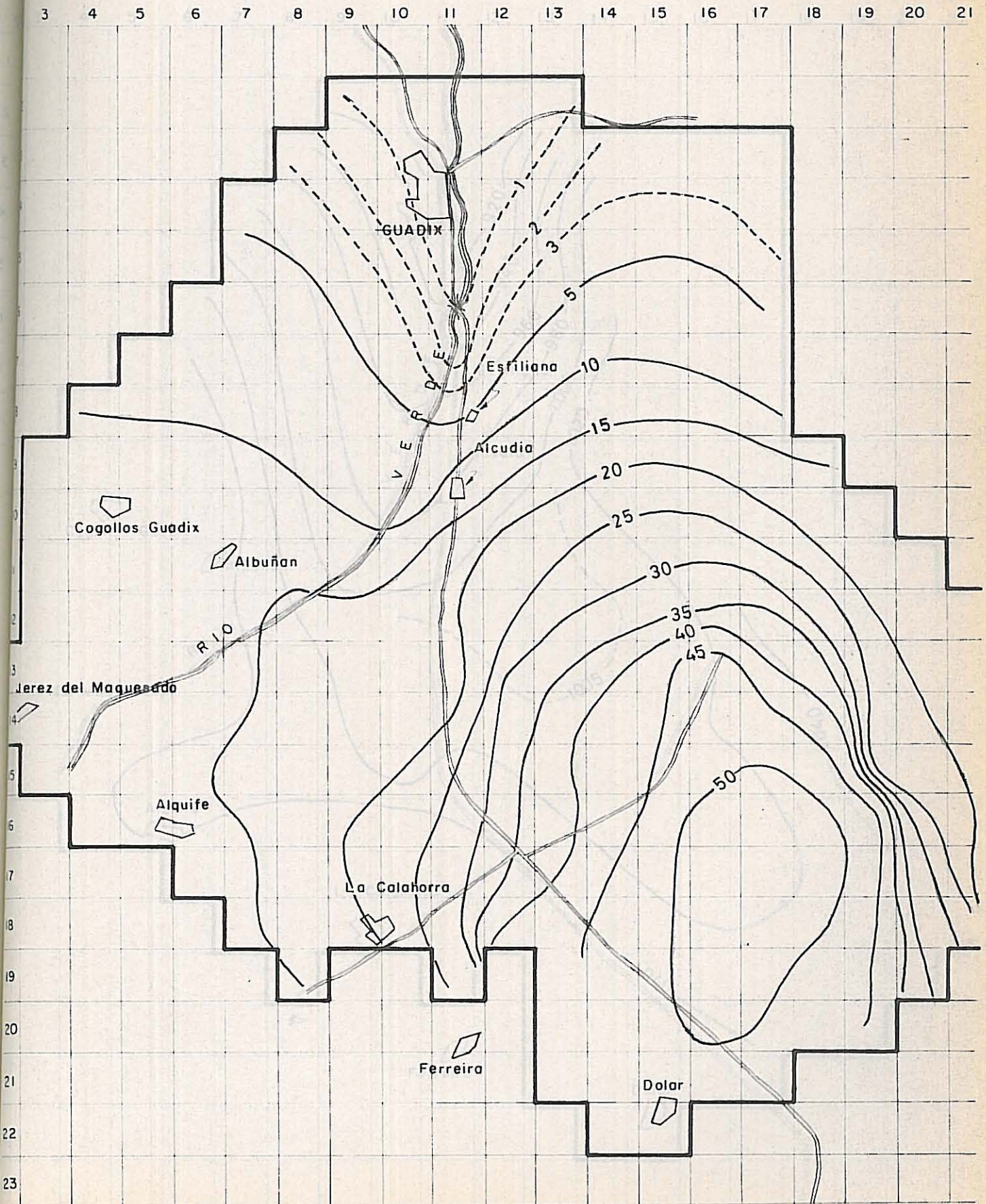


Mapa de isopotenciales a los 20 días de bombeo  
PROGRAMA 1. 16 m<sup>3</sup>/día bombeo en el pozo

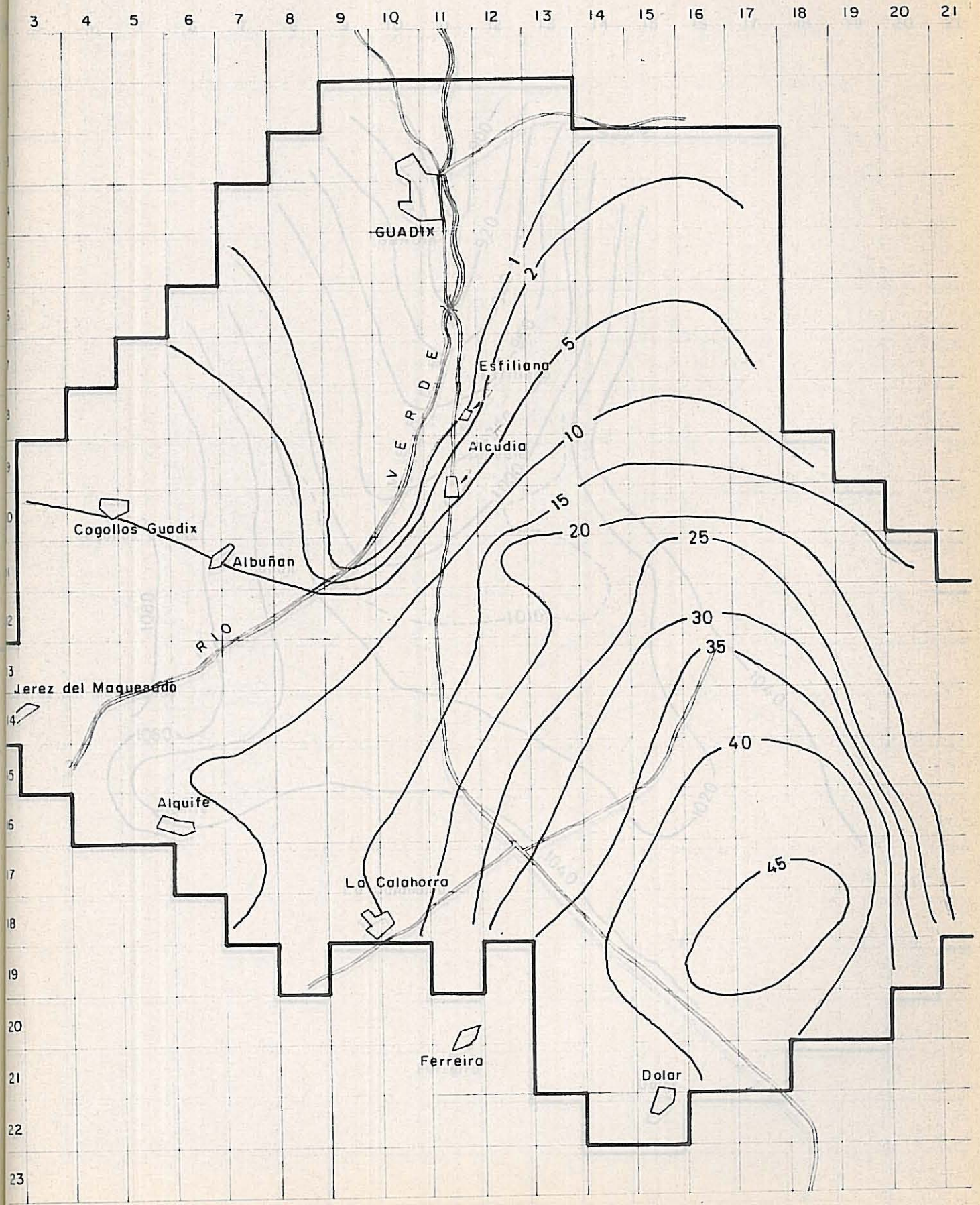
MAPA DE ISOPOTENCIALES REALES EN REGIMEN PERMANENTE



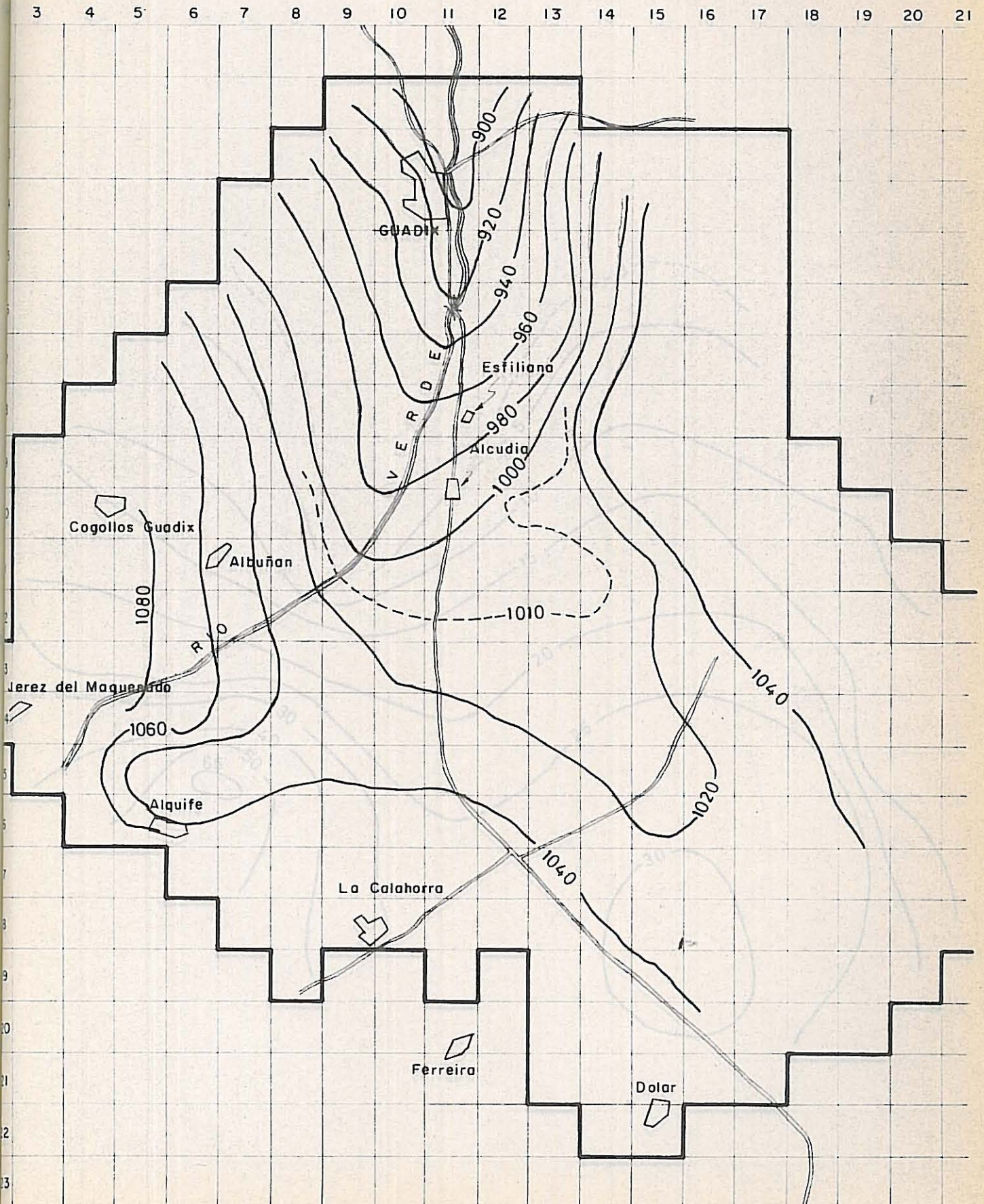
Mapa de isodescensos. a los 20 años de bombeo.  
PROGRAMA I. 16 Hm<sup>3</sup>/año continuos en el llano



Mapa de isodescensos a los 20 años de bombeo  
PROGRAMA II 16 Hm<sup>3</sup>/año continuos en el llano  
(nudos del rio a potencial constante)



Piezometria final a los 20 años de bombeo  
 PROGRAMA II 16 Hm<sup>3</sup>/año en el llano  
 PROGRAMA III (nudos del rio a potencial constante)



Mapa de isodescensos a los 20 años de bombeo

8 Hm<sup>3</sup>/año en el llano

PROGRAMA III

13.2 Hm<sup>3</sup>/año en la Mina

FIGURA 11

8 Hm<sup>3</sup>/año en el llano

PROGRAMA III

13.2 Hm<sup>3</sup>/año en la Mina

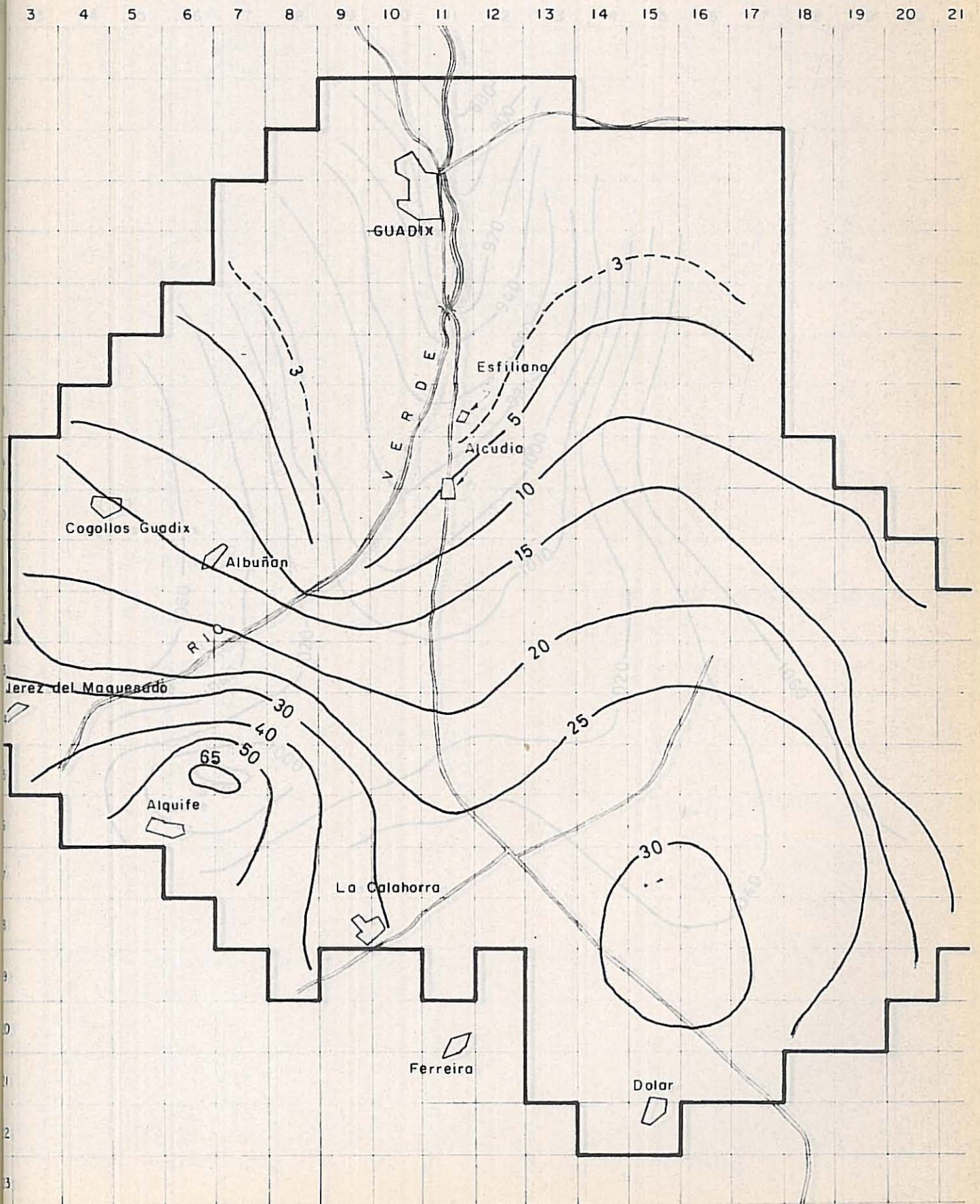


FIGURA II

Piezometria final a los 20 años de bombeo

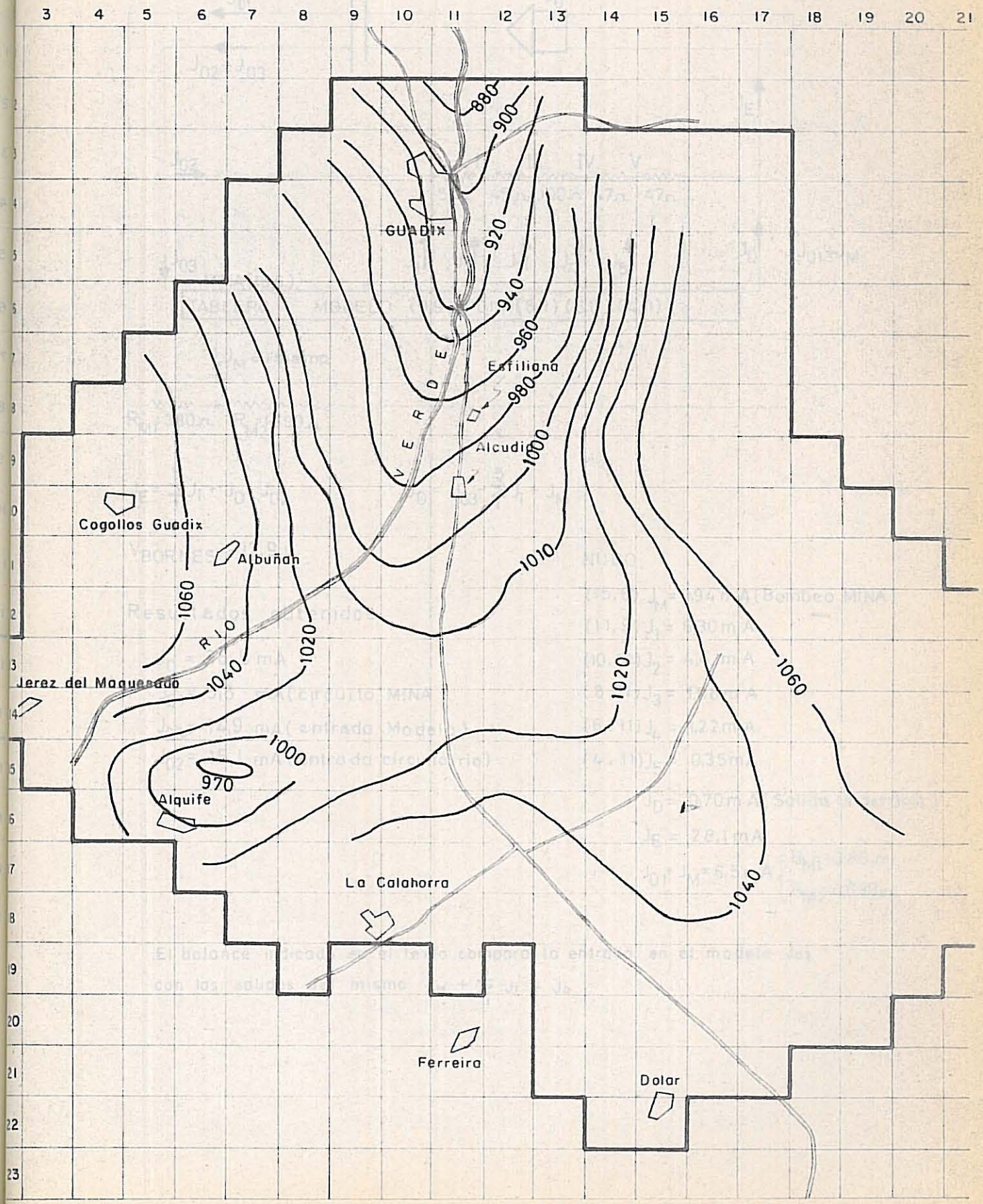
DEL CIRCUITO ELECTRICO

PROGRAMA III

8 Hm<sup>3</sup>/año en el llano

Regimen permanente

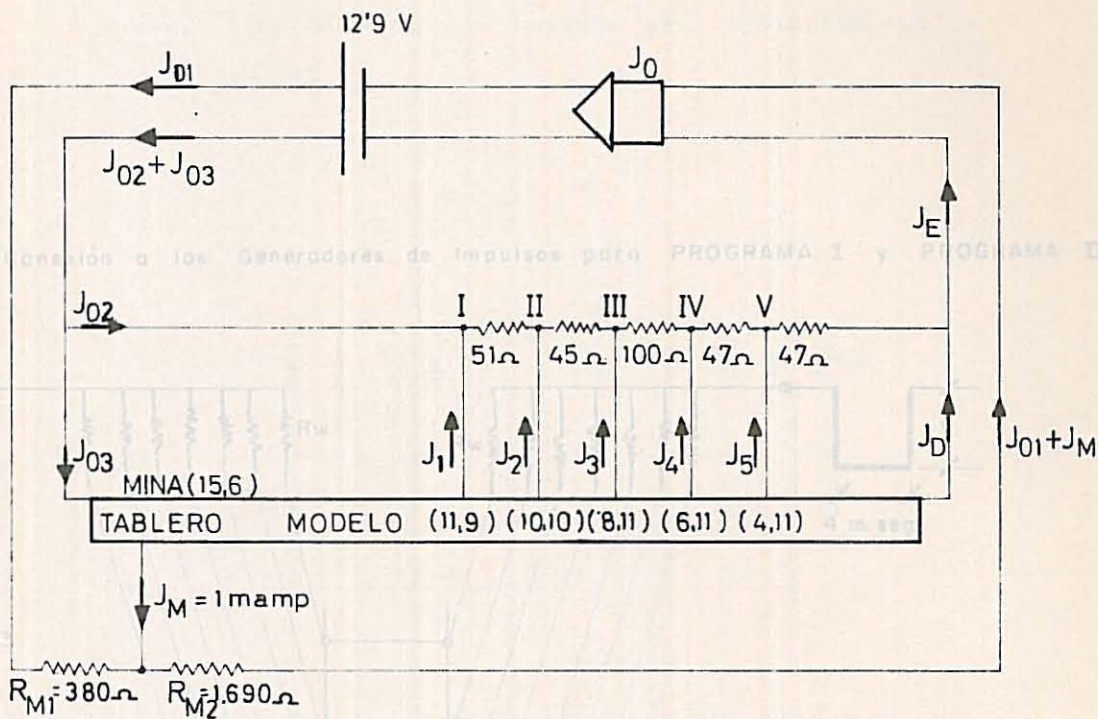
13.2 Hm<sup>3</sup>/año en la Mina





CROQUIS DEL CIRCUITO ELECTRICO

— Regimen permanente —



$$J_E = \sum_1^5 J_i + J_D + J_{02}$$

$$J_D = J_{03} - \sum_1^5 J_i - J_M$$

$V_{\text{BORNES}} = 12,9 \text{ v}$

NUDO

Resultados obtenidos

$J_0 = 36,5 \text{ mA}$

$J_{01} = 5,6 \text{ mA (circuito MINA)}$

$J_{03} = 14,9 \text{ mA (entrada Modelo)}$

$J_{02} = 15,1 \text{ mA (entrada circuito rio)}$

(15,6)  $J_M = 0,94 \text{ mA (Bombeo MINA)}$

(11,9)  $J_1 = 6,30 \text{ mA}$

(10,10)  $J_2 = 4,4 \text{ mA}$

(8,11)  $J_3 = 1,08 \text{ mA}$

(6,11)  $J_4 = 1,22 \text{ mA}$

(4,11)  $J_5 = 0,35 \text{ mA}$

$J_D = 0,70 \text{ mA (Salida Underflow)}$

$J_E = 28,1 \text{ mA}$

$J_{01} + J_M = 6,5 \text{ mA} \begin{cases} R_{M1} = 380\Omega \\ R_{M2} = 1690\Omega \end{cases}$

El balance indicado en el texto compara la entrada en el modelo  $J_{03}$

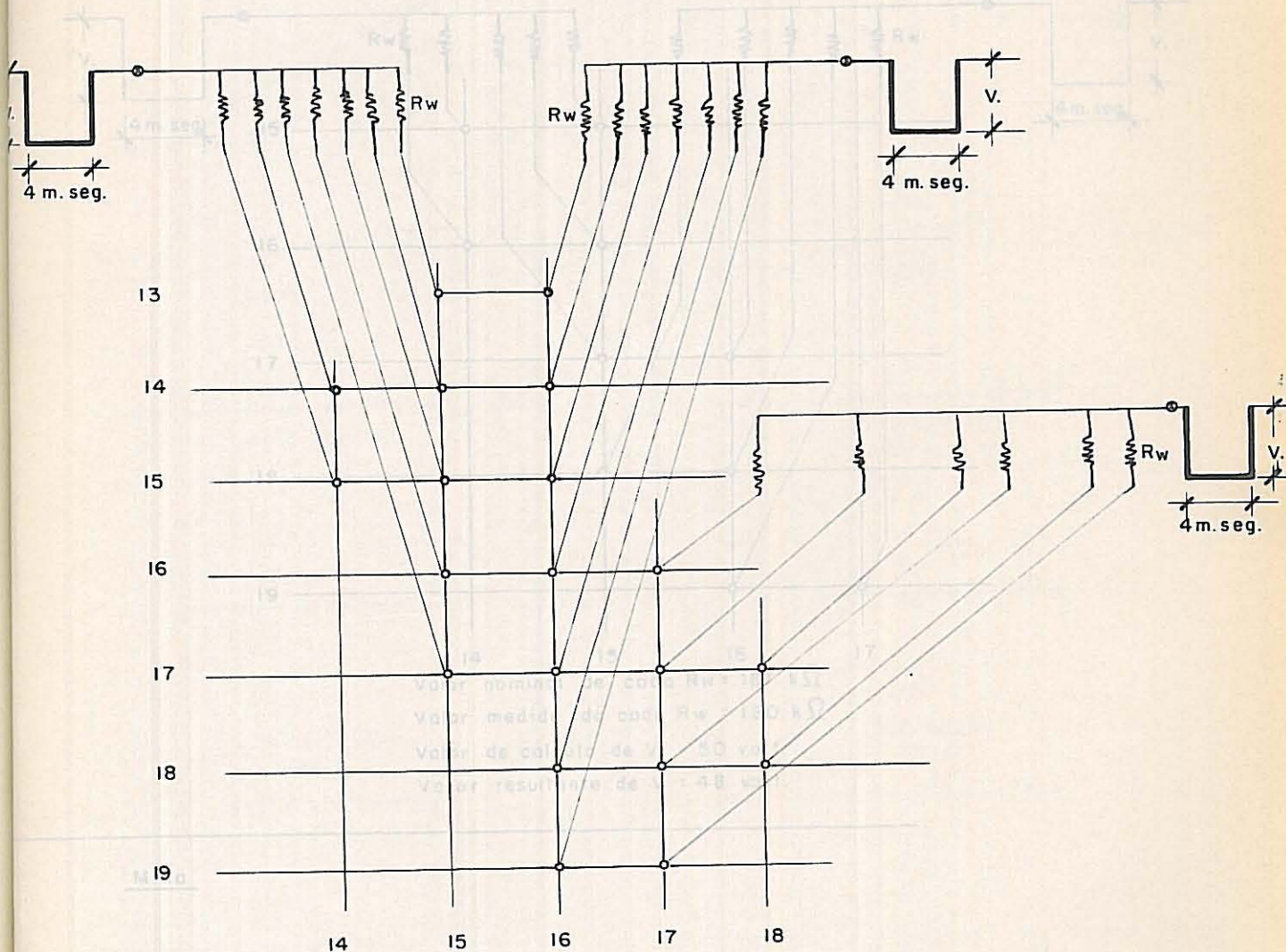
con las salidas del mismo  $J_M + \sum_1^5 J_i + J_D$

Valor de calculo de  $V = 30 \text{ volt}$

Valor resultante de  $V = 47,5 \text{ volt}$

Conexión a los Generadores de Impulsos para PROGRAMA III

Conexión a los Generadores de Impulsos para PROGRAMA I y PROGRAMA II



Valor nominal de cada  $R_w = 167 \text{ k}\Omega$   
 Valor medido de cada  $R_w = 178 \text{ k}\Omega$   
 Valor de cálculo de  $V = 50 \text{ volt.}$   
 Valor resultante de  $V = 47.5 \text{ volt.}$

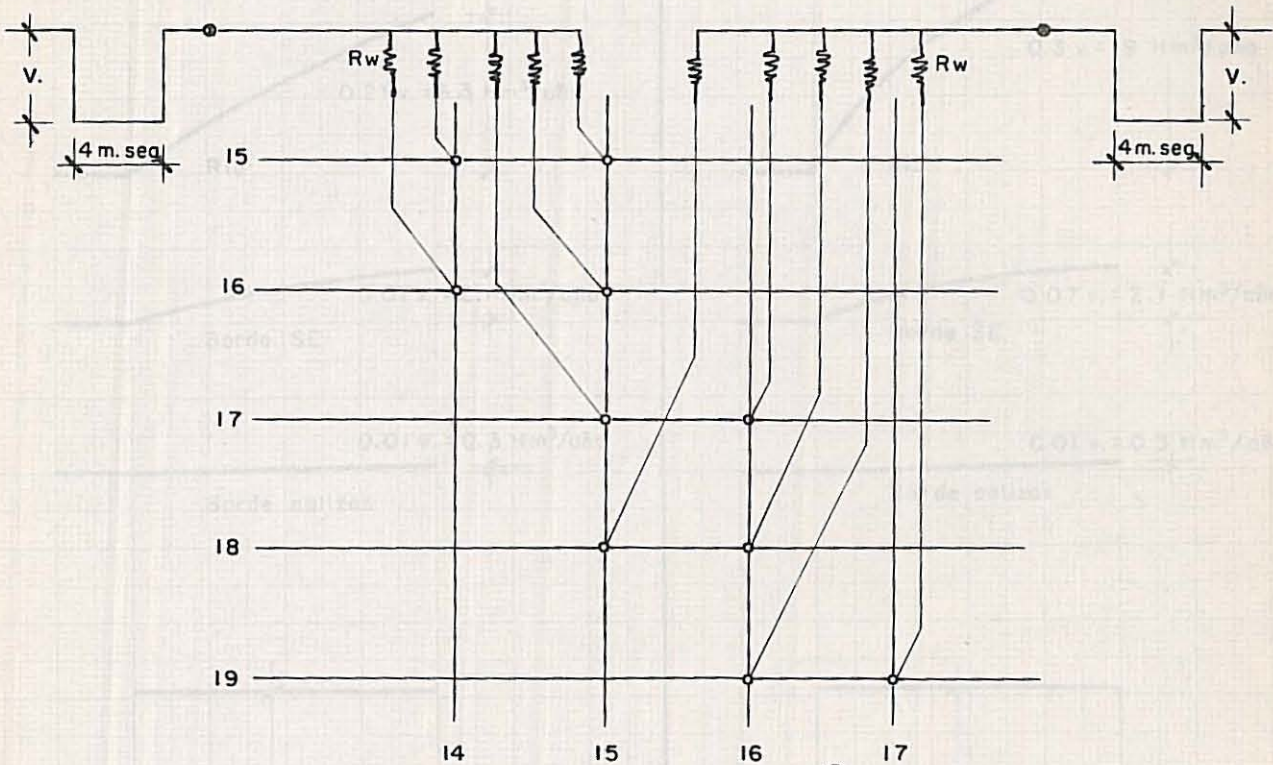
Valor nominal de  $R_w = 23.1 \text{ k}\Omega$   
 Valor medido de  $R_w = 22.2 \text{ k}\Omega$   
 Valor de cálculo de  $V = 50 \text{ volt}$   
 Valor resultante de  $V = 49 \text{ volt}$

PROGRAMA I.

PROGRAMA II.

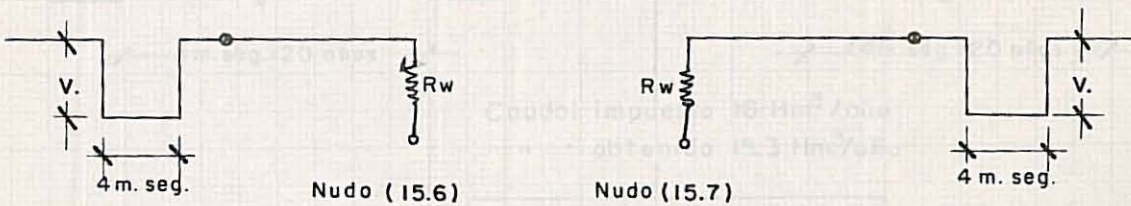
Conexión a los Generadores de Impulsos para PROGRAMA III

Llano



Valor nominal de cada  $R_w = 167 \text{ k}\Omega$   
 Valor medido de cada  $R_w = 180 \text{ k}\Omega$   
 Valor de cálculo de  $V = 50 \text{ volt.}$   
 Valor resultante de  $V = 48 \text{ volt.}$

Mina

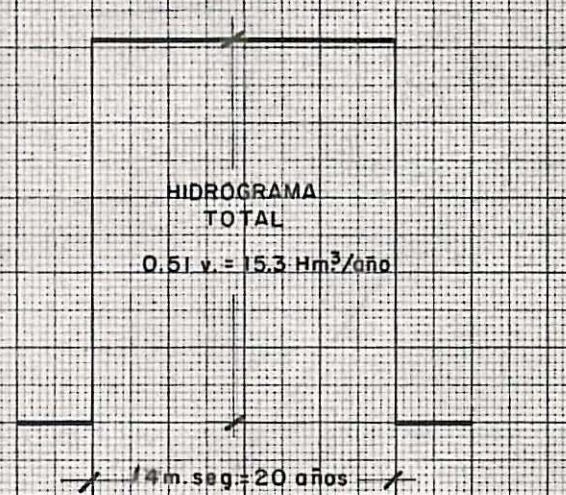
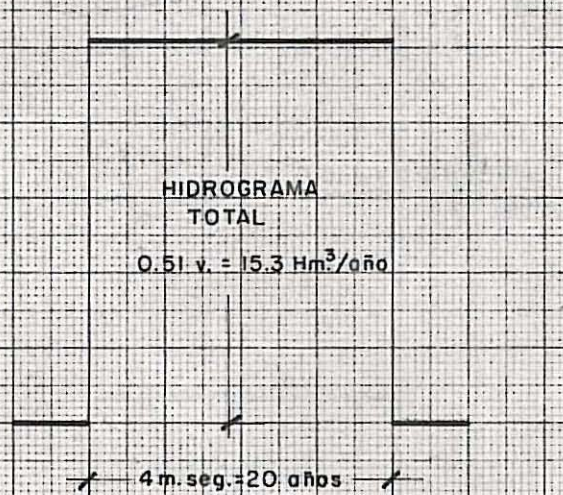
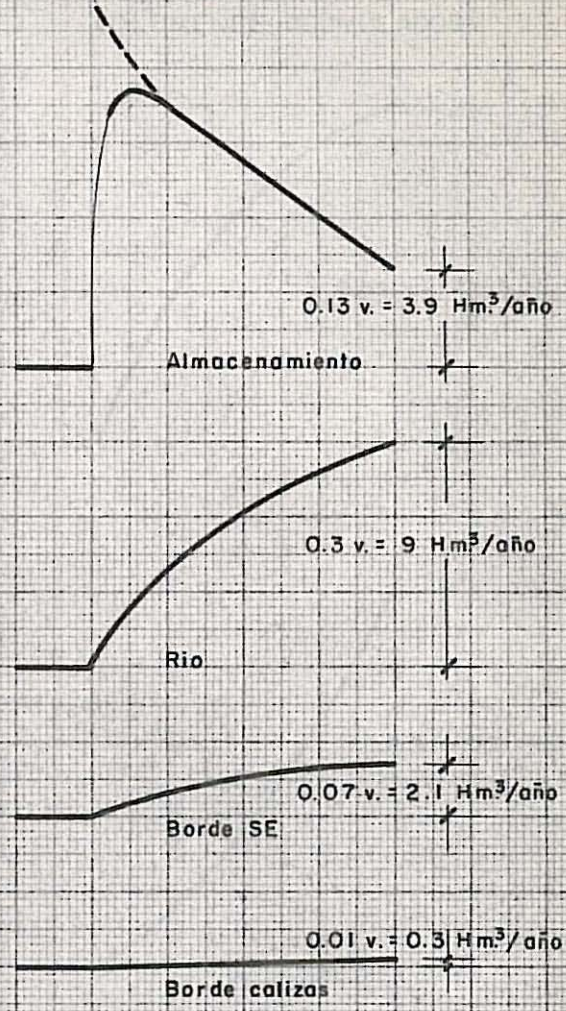
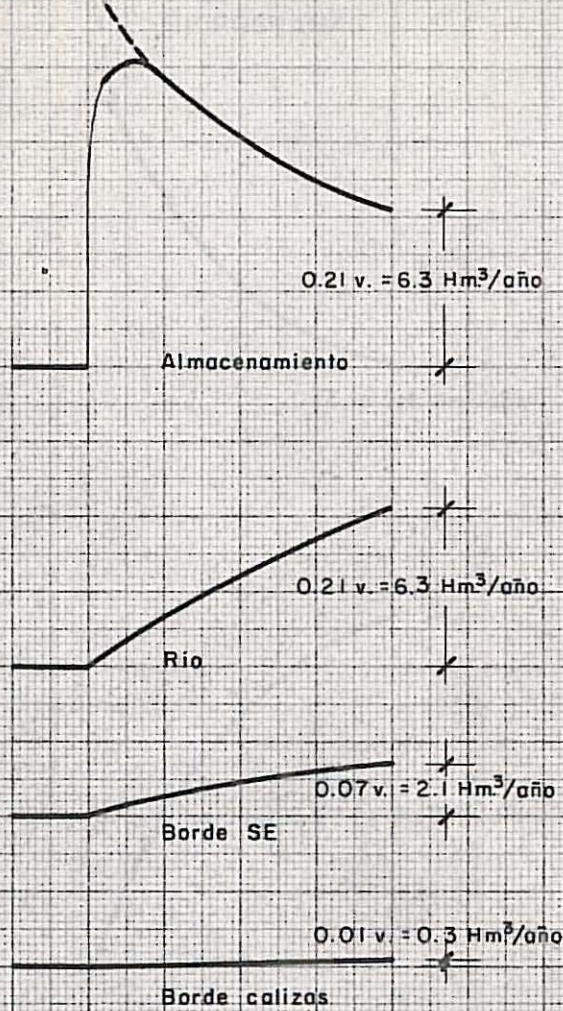


Valor nominal de  $R_w = 23.1 \text{ k}\Omega$   
 Valor medido de  $R_w = 22.2 \text{ k}\Omega$   
 Valor de cálculo de  $V = 50 \text{ volt.}$   
 Valor resultante de  $V = 49 \text{ volt.}$

GRAFICO I . HIDROGRAMAS

PROGRAMA I

PROGRAMA II



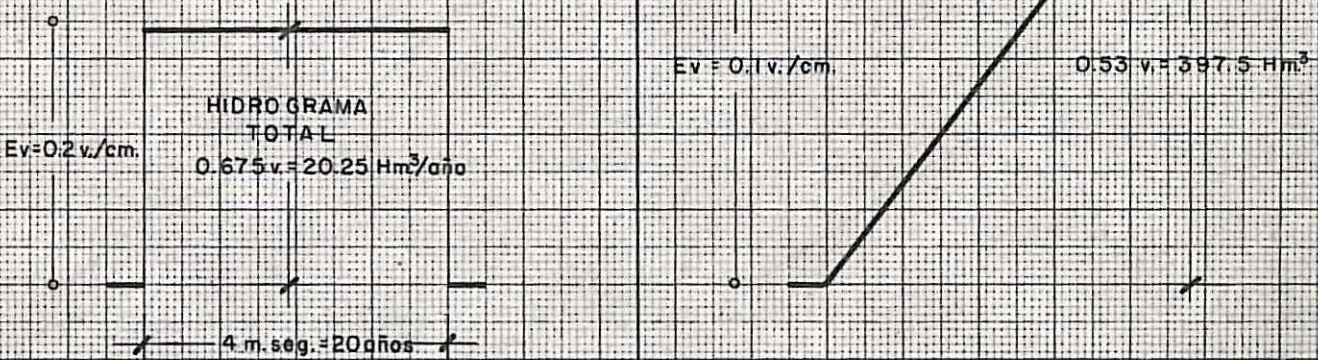
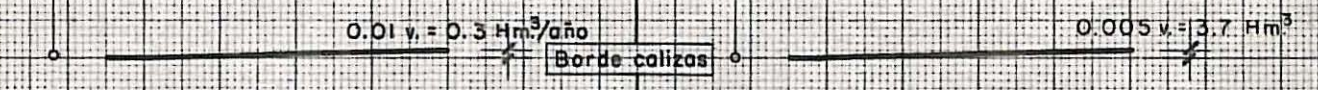
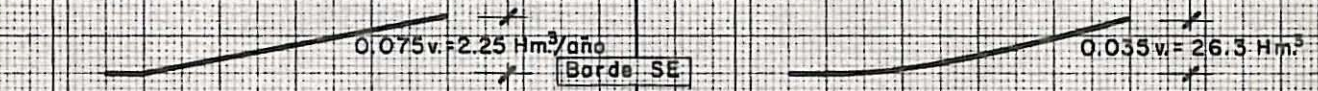
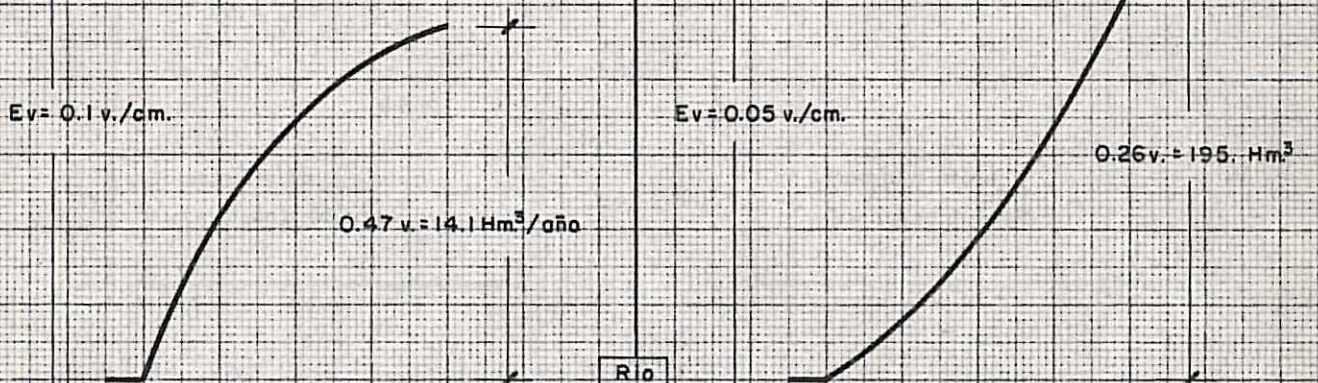
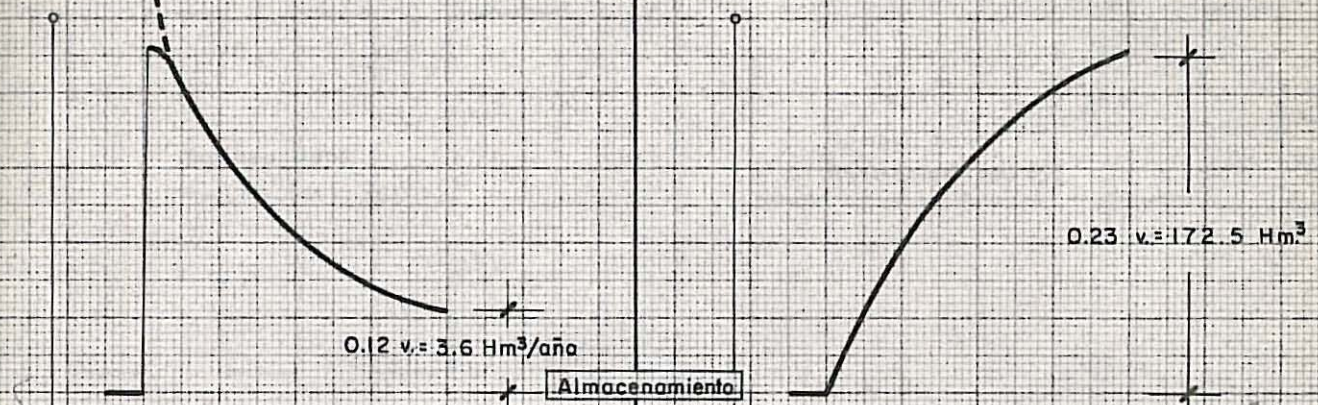
Caudal impuesto  $16 \text{ Hm}^3/\text{año}$   
 " obtenido  $15.3 \text{ Hm}^3/\text{año}$

- $E_V$ :  $0.1 v./\text{cm.}$
- $E_H$ :  $\text{time}/\text{cm.} = 1 \text{ m. seg.}/\text{cm.}$
- $Q_4$ :  $5 \text{ años}/\text{m. seg.}$
- $Q_3$ :  $3 \text{ Hm}^3/\text{año. mamp.}$
- $\infty_3$ :  $30 \text{ Hm}^3/\text{año. volt.}$

GRAFICO 2.- Programa III

HIDROGRAMAS

VOLUMENES ACUMULADOS



Caudal impuesto  $21.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$   
 $\alpha_3 = 30 \text{ Hm}^3/\text{año. volt}$

$E_H = 1 \text{ m. seg. /cm.}$   
 $\alpha_3 = 3 \text{ Hm}^3/\text{año. mamp}$   
 $\alpha_4 = 5 \text{ años/m. seg.}$

$\alpha_1 = 750 \text{ Hm}^3/\text{volt}$

GRAFICO 4. Curvas descensos-tiempo

PROGRAMA IV

PROGRAMA V

$\sigma_2' = 30 \text{ m. / volt.}$

$\sigma_4 = 5 \text{ años / m. seg.}$

