

ANALISIS ECONOMICO DE LAS POSIBILIDADES DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS DE LAS PROXIMIDADES DE MADRID(*)

Por BERNARDO LOPEZ-CAMACHO Y CAMACHO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

La explotación de las aguas subterráneas en España, como en casi todos los países del mundo, ha sido predominantemente realizada por la iniciativa privada, de un modo más o menos anárquico.

Hasta fechas relativamente recientes han sido muy pocos los estudios regionales de recursos hidráulicos totales. Más escasos todavía son los estudios en que se haya analizado la viabilidad económica de diversas soluciones alternativas a base de aguas superficiales y/o subterráneas, cuya viabilidad técnica hubiese sido previamente comprobada.

Como iniciación al tema, del 11 al 22 de junio de 1973 se celebró en Madrid el ciclo de conferencias: "Doce lecciones sobre criterios económicos para la explotación de las aguas subterráneas", organizado por la Sección de Estudios Hidrogeológicos del Servicio Geológico de Obras Públicas, de la Dirección General de Obras Hidráulicas, y la Agregaduría de Hidrogeología del Doctorado de Geología Económica, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense.

Dentro de dicho ciclo fue dictada la conferencia que, con algún retoque posterior, exponemos en el presente artículo.

1. Introducción.

En la región de Madrid, y especialmente en los últimos años, la explotación de las aguas subterráneas ha experimentado un gran aumento, habiéndose perforado numerosos pozos, que, en su mayor parte, han sido construidos para satisfacer las demandas de agua del gran número de industrias y urbanizaciones asentadas en el área. Igualmente existen numerosos núcleos urbanos —como es el caso de Móstoles, Fuenlabrada y Parla, entre otros— abastecidos con agua de dicha procedencia.

Por otra parte, si exceptuamos el estudio realizado en 1965 por el Instituto Geológico y Minero por encargo del Canal de Isabel II ("Plan de urgencia para alumbramiento de agua subterránea en la cuenca de Madrid"), del que no nos ha sido posible consultar el capítulo de hidrogeología, no existen estudios actualizados de infraestructura hidrogeológica con la suficiente amplitud, detalle y rigor, que, recogiendo la dispersa información existente, puedan proporcionar orientaciones eficaces tanto a constructores y usuarios como a la Administración, sobre la distribución geográfica y posible cuantía de los recursos hidráulicos subterráneos de

la zona, así como acerca del rendimiento esperado por obra de captación, en función de sus características y ubicación.

Esta necesidad es una de las que intenta cubrir en una primera etapa el "Estudio de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Guadarrama y Henares", que ha sido realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas y la Comisaría de Aguas del Tajo (Madrid, diciembre 1973). Muchos de los datos expuestos en los apartados siguientes proceden de dicho estudio.

A grandes rasgos, el programa que se desarrolla en los siguientes apartados es:

- Exposición de la demanda de agua en la zona próxima a Madrid y su forma actual de satisfacción.
- Enumeración de los principales acuíferos existentes; sus posibles utilizaciones en función de la demanda; su ubicación y características hidrogeológicas, refiriéndonos de modo casi exclusivo a los embalses subterráneos constituidos por el Cretácico del borde de la sierra del Guadarrama y por el Mioceno detrítico de la parte norte de la Fosa del Tajo de la región de Madrid.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1975.

- Análisis del coste del metro cúbico de agua bombeada de estos dos últimos embalses subterráneos, bajo diversas hipótesis.

No vamos a entrar en la comparación de las soluciones alternativas para satisfacer ciertas demandas, ya que este tema fue objeto de otra conferencia del ciclo mencionado. Sin embargo, y con el fin de tener un coste de referencia desde el punto de vista del usuario, señalaremos en cada caso el precio o tarifa actual del metro cúbico de agua de origen superficial, según que su utilización sea para abastecimiento urbano o industrial. Asimismo, no entraremos en el tema del coste para usos agrícolas, ya que, igualmente, fue objeto de otra de las conferencias del ciclo.

2. Demanda de agua en la región de Madrid y origen actual del agua.

En el citado estudio Guadarrama-Henares (1), que abarca unos 10.000 Km² de extensión superficial, a efectos del estudio de la demanda, se han distinguido cuatro zonas de características esencialmente distintas (fig. 1):

- *Zona I:* Area Metropolitana (1.800 Km²), cuya demanda representa entre el 91 y 94 por 100 de la total para abastecimiento e industria.
- *Zona II:* Zona de influencia del Area Metropolitana (1.400 Km²), que comprende aquellos municipios próximos al Area Metropolitana y cuya población ha sido progresiva en el último decenio.
- *Zona III:* Pueblos de la Sierra del Guadarrama (800 Km²), que constituyen la residencia veraniega de parte de la población madrileña.
- *Zona IV:* Resto de la región no influida por Madrid (5.800 Km²), escasamente poblada y con marcado carácter regresivo.

Las cifras de la demanda para poblaciones e industria en las cuatro zonas consideradas para los años 1970, 1985 y 2000 se recogen en la figura 1 y en el cuadro 1. En el cuadro 2 pueden verse las demandas totales en la zona de estudio. Debemos señalar que, según se indica en el estudio de referencia, las cifras que se exponen en los cuadros pueden tener un eleva-

do grado de error, ya que muchas de ellas se han obtenido por estimaciones indirectas o por diferencia entre cantidades aproximadas, debiendo, en estudios posteriores, proceder a su revisión.

En el cuadro 3 se indica la procedencia del agua en el año 1970. Cerca del 90 por 100 del agua superficial utilizada en la zona por el sector población e industria fue suministrada por el Canal de Isabel II a Madrid y su Alfoz (1). El agua salida de los depósitos del Canal en 1969 fue de 376, 7 Hm³ (Canal de Isabel II: Memoria 1951-69, pág. 352). Según la misma fuente de información (2), el caudal regulado disponible en la actualidad es de 21,45 m³/seg., incluyendo 3,50 m³/seg., procedentes de la elevación de Picadas.

CUADRO 1. — *Demanda de agua para usos urbanos e industriales en las distintas zonas*

ZONAS	Demanda (Hm ³ /año)		
	1970	1985	2000
<i>Zona I:</i>			
Area Metropolitana de Madrid	500	1.000	2.200
<i>Zona II:</i>			
Zona de influencia del Area Metropolitana	17	50	110
<i>Zona III:</i>			
Pueblos de la sierra del Guadarrama	7	14	21
<i>Zona IV:</i>			
Zona no influida por Madrid	3	3	3
TOTALES (redondeados)	550	1.100	2.300

Fuente: SGOP y CAT (1973): Estudio de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Guadarrama y Henares.

CUADRO 2. — *Demanda total de agua*

SECTOR	Demanda (Hm ³ /año)		
	1970	1985	2000
Población e industria	550	1.100	2.300
Regadíos	200	300	300
TOTALES	750	1.400	2.600

Fuente: SGOP y CAT (1973): Estudio de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Guadarrama y Henares.

CUADRO 3. — *Origen del agua (año 1970).*
(Hm³/año)

SECTOR	Agua superficial	Agua subterránea	TOTAL (redondeado)
Población e industria	430	100	550
Regadíos	130	70	200
TOTALES (redondeados)	550	200	750

Fuente: SGOP y CAT (1973): Estudio de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Guadarrama y Henares.

3. Características de los acuíferos próximos a Madrid.

Desde el punto de vista hidrogeológico, los terrenos próximos a Madrid pueden clasificarse en los siguiente tipos (fig. 2) (1 y 3):

- Granito y rocas metamórficas de la Sierra, en cuya denominación se incluyen todo un conjunto de rocas cuyas características como acuíferos son similares. Sus recursos y reservas de agua son despreciables a nivel regional, aunque pueden ser interesantes para resolver algunos problemas locales de abastecimiento. Son materiales aptos para producir caudales que rara vez serán superiores a 100 m³/día (1 y 3).
- Calizas y areniscas del Cretácico del borde de la sierra del Guadarrama. La zona de los afloramientos que se extiende desde la confluencia de los ríos Lozoya y Jarama hacia el Oeste ha sido estudiada con detalle por el Servicio Geológico de Obras Públicas. Han sido publicados varios trabajos sobre estos acuíferos (4, 10, 11). Para el total del Cretácico de la zona han estimado los recursos en 50 Hm³/año, y las reservas explotables en unos 500 Hm³ (1).
- Materiales permeables de la Unidad Ibérica. Constituyen acuíferos poco estudiados hasta la fecha. El principal está constituido por retazos aislados de calizas jurásicas. Su descarga-recarga se evalúa en 80-100 Hm³/año (1). Dejando aparte su efecto regulador natural sobre

los ríos de esa zona no tienen una gran importancia en la actualidad debido a su situación geográfica y a la escasa demanda en su área de influencia.

- Terciario detrítico del norte de la Fosa del Tajo. Constituye el embalse subterráneo de mayor importancia por su volumen y por extenderse en las inmediaciones de Madrid (fig. 2). Su extensión en la zona de estudio es de unos 3.500 Km², evaluándose su recarga anual en unos 200 hectómetros cúbicos (1).
- Acuíferos aluviales del Cuaternario. Se extienden en una superficie de unos 1.100 Km². Su potencia, en general, no supera los 10 m. Sus recursos se han evaluado en unos 160 Hm³/año. Proporcionan el 30 por 100 del volumen de agua aplicado a regadíos en la zona (1).
- Mioceno evaporítico. Apenas se conocen sus características en la actualidad, pero debido al gran número de industrias asentadas sobre estos materiales, sería interesante realizar un estudio sobre sus posibilidades, ya que el agua de esta formación a pesar de su calidad puede ser útil para algunas aplicaciones.

4. Análisis económico de los acuíferos del Cretácico del borde de la sierra.

4.1. Posible utilización del embalse subterráneo.

No entraremos en describir sus características hidrogeológicas y las posibles opciones para su explotación, que han sido tratadas con detalle en otros estudios (4); sin embargo, conviene hacer resaltar aquí algunos condicionantes que influyen en su posible utilización y en su estudio económico, como son:

- La demanda local en la zona en la que se extiende dicho acuífero es de muy pequeña entidad, y puede ser fácilmente atendible, por lo que los volúmenes de agua que pudieran extraerse podrían utilizarse en otras áreas de mayor demanda.
- Los canales del Jarama, del Atazar y de la Parra, del Sistema Norte del abastecimiento de agua a Madrid del Canal de Isabel II, discurren en un tramo de varios kilómetros sobre estos materiales o en

su inmediata proximidad, siendo relativamente fácil incorporar los volúmenes que pudieran explotarse a dichas conducciones.

- Los ríos Lozoya y Jarama, y el embalse de El Vellón están conectados hidráulicamente en mayor o menor grado con el embalse subterráneo. Mediante una adecuada operación en la explotación del acuífero, es muy probable que se pueda conseguir una regulación adicional de los ríos Guadalix y Jarama, siendo especialmente interesante en este último río que, en la actualidad, se encuentra poco regulado.

Parece por tanto lógico que los volúmenes que pudieran extraerse de dicho acuífero se podrían incorporar a los citados canales, utilizándolos para el abastecimiento del Área Metropolitana de Madrid.

4.2. Coste teórico del metro cúbico de agua.

A la vista de las numerosas variables que intervienen en el coste del metro cúbico, se ha preparado un programa de cálculo con ayuda del ordenador IBM 7090 del Centro de Cálculo de la Universidad Complutense de Madrid, en el que siguiendo el proceso propuesto por J. Andolz para la confección del coste (5), y con las hipótesis consideradas en la figura 3 se han obtenido 144 tablas, conteniendo 30 valores cada una de ellas, lo que representa un total de 4.320 datos. En la figura 4 puede verse una de estas tablas. El programa realizado está preparado para obtener 10^7 combinaciones de valores, y forma parte de un plan más general de Investigación en Hidroeconomía que se está realizando en coordinación con la Agregaduría de Hidrogeología.

Para los valores de las variables consideradas en el programa, los costes oscilan entre 12,50 y 0,20 ptas./m³, siendo inferiores a 3 pesetas/m³ en los siguientes casos:

- Prácticamente, siempre que el caudal del pozo sea superior a 25 l/seg.
- Para caudales de 10 l/seg. o superiores, si el período de amortización considerado es como mínimo de diez años.
- E incluso para períodos de amortización de cinco años, si los pozos se encuen-

tran próximos al lugar de recepción, sus caudales son iguales o superiores a 10 litros/seg., y el resto de las variables tienen valores no excesivamente desfavorables.

4.3. Coste del metro cúbico de agua extraída de los pozos construidos por el Servicio Geológico de Obras Públicas.

Hasta la fecha, el Servicio Geológico de Obras Públicas ha construido seis pozos experimentales de profundidades comprendidas entre 80 y 250 m, con media próxima a los 200 metros. El caudal total que puede extraerse del conjunto de los pozos está comprendido entre 250 y 450 l/seg., con un descenso medio, ponderado con los caudales, del orden de 35 m.

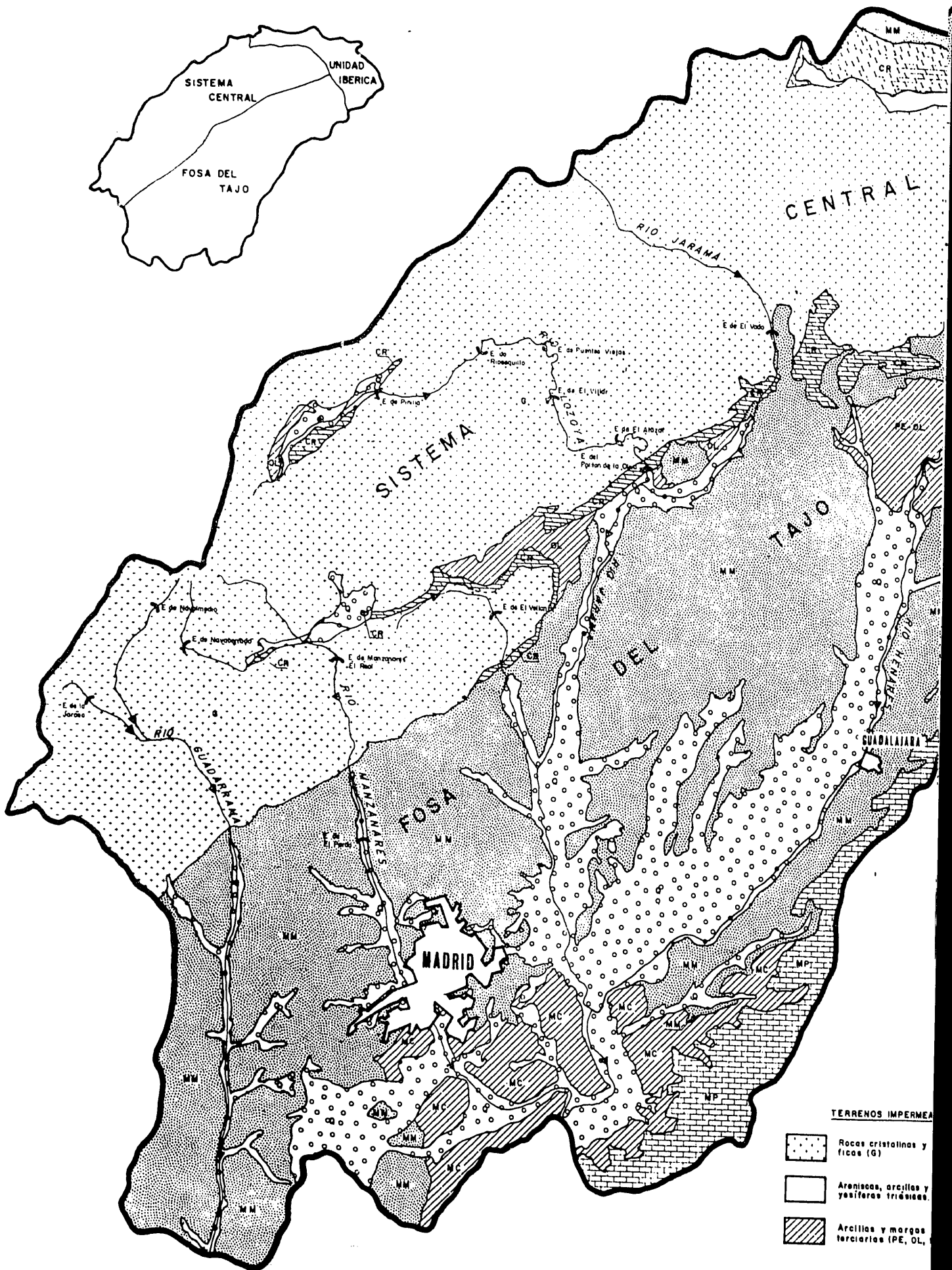
El coste medio resultante por pozo es de 1.300.000 pesetas, sin incluir ensayo de bombeo, si bien en uno de los pozos se incluyen desarrollo mediante acidificación y polisfosfatos y cinco ensayos de bombeo para controlar el efecto de estas y otras operaciones realizadas.

Podemos considerar, para quedarnos del lado de la seguridad, 1.500.000 pesetas por pozo, lo que equivale a unas 7.500 ptas./m, coste relativamente alto en terrenos coherentes. Igualmente si suponemos 50 l/seg. por pozo y 75 m de altura manométrica —valores muy pesimistas—, con conducción de 100 m (130.000 pesetas) y equipo de bombeo, transformador y línea eléctrica, que de acuerdo con el Boletín número 36 del SGOP (5) resultan de 530.000 pesetas por pozo un interés del capital invertido del 8 por 100; tiempos de bombeo de siete mil doscientas horas por año; y 75.000 ptas./año de gastos de operación por pozo, los costes del metro cúbico resultantes para diversos períodos de amortización figuran en el cuadro 4, en el supuesto de que la maquinaria se amortice como máximo en diez años.

Podemos ver que el hecho de aumentar el período de amortización de cinco a diez años supone un descenso de un 20 por 100 en el coste, y que para un período de amortización de veinte años la energía representa el 60 por 100 del coste total.

A la vista de los resultados del cuadro 4 puede concluirse que el coste resultante para el metro cúbico será muy probablemente inferior a una peseta. En el cálculo anterior se han

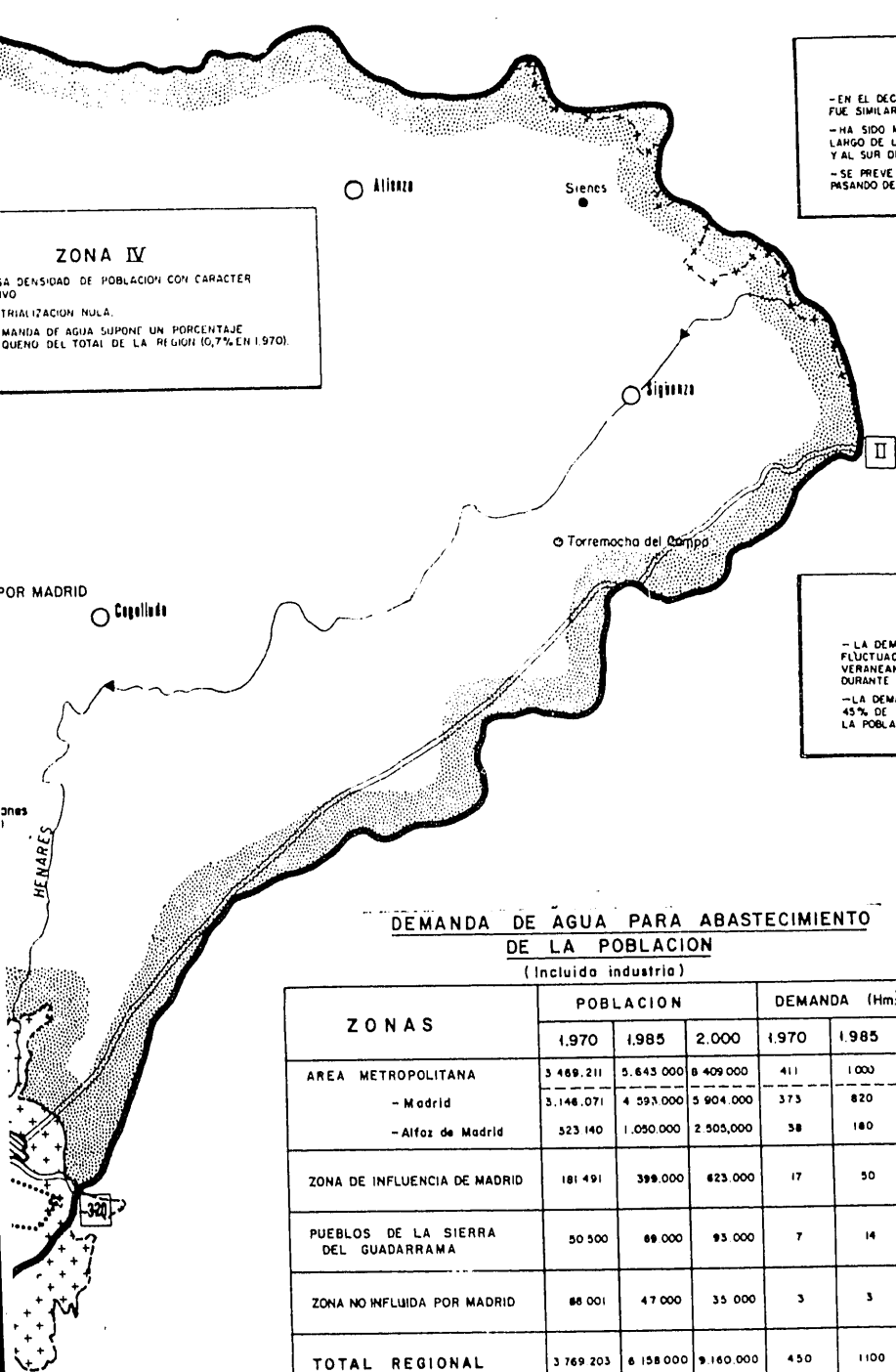
UNIDADES HIDROGEOLOGICAS



TERRENOS IMPERMEABLES

- Rocas cristalinas y ficas (G)
- Areniscas, arcillas y yesíferas triásicas
- Arcillas y margas terciarias (PE, OL)

Fig. 2. — Unidades hidrogeológicas



ZONA IV

BA DENSIDAD DE POBLACION CON CARACTER
IVO
TRIALIZACION NULA.
MANAJA DE AGUA SUPONE UN PORCENTAJE
QUENO DEL TOTAL DE LA REGION (0,7% EN 1970).

ZONA II

- EN EL DECENIO 1960-1970 EL CRECIMIENTO DE ESTA ZONA
FUE SIMILAR AL EXPERIMENTADO POR EL AREA METROPOLITANA
- HA SIDO MUY IMPORTANTE EL CRECIMIENTO INDUSTRIAL A LO
LARGO DE LA C.N.II. (ALCALA DE HENARES-GUADALAJARA)
Y AL SUR DEL AREA METROPOLITANA.
- SE PREVE UN IMPORTANTE AUMENTO DE LA DEMANDA DE AGUA
PASANDO DE 17 Hm³ (AÑO 1970) A 108,7 Hm³ (AÑO 2000)

ZONA III

- LA DEMANDA DE AGUA SE CARACTERIZA POR UNA GRAN
FLUCTUACION ESTACIONAL DEBIDO A LA AFLUENCIA DE
VERANEANTES EL 70% DE LA DEMANDA ANUAL SE PRODUCE
DURANTE LOS MESES DE VERANO (JUNIO-SEPTIEMBRE).
- LA DEMANDA DE LA POBLACION ESTABLE REPRESENTA EL
45% DE LA TOTAL CORRESPONDIENDO EL 55% RESTANTE A
LA POBLACION VERANEAGA

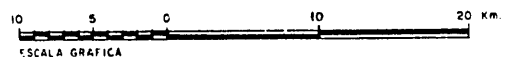
DEMANDA DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO DE LA POBLACION (Incluida industria)

ZONAS	POBLACION			DEMANDA (Hm ³ /año)		
	1.970	1.985	2.000	1.970	1.985	2.000
AREA METROPOLITANA	3 488 211	5 643 000	8 409 000	411	1 000	2 200
- Madrid	3 148 071	4 593 000	5 904 000	373	820	1 550
- Alfoz de Madrid	323 140	1 050 000	2 505 000	38	180	650
ZONA DE INFLUENCIA DE MADRID	181 491	399 000	623 000	17	50	110
PUEBLOS DE LA SIERRA DEL GUADARRAMA	50 500	69 000	93 000	7	14	21
ZONA NO INFLUIDA POR MADRID	68 001	47 000	35 000	3	3	3
TOTAL REGIONAL	3 769 203	6 158 000	9 160 000	450	1 100	2 300

NOTA: NO SE INCLUYE EL BOMBEO DE AGUA PARA INDUSTRIA EN EL AREA METROPOLITANA, QUE
SE ESTIMA EN 100 Hm³/AÑO.

LEYENDA

- ZONA I
- ZONA II
- ZONA III
- ZONA IV
- LIMITE HIDROLOGICO DE LA REGION EN ESTUDIO
- LIMITE DE PROVINCIA
- RIO PERMANENTE
- CABEZA DE PARTIDO JUDICIAL
- LIMITE DE ZONAS
- CARRETERA NACIONAL
- MUNICIPIO CON ESCASEZ DE AGUA
- CAPITAL DE PROVINCIA
- ZONAS INDUSTRIALES



ZONA I

- ES EL MAYOR CENTRO DE DEMANDA DE AGUA DE LA REGION Y SE GUARA SIENDO EN EL FUTURO, TANTO POR SU CRECIMIENTO DEMOGRAFICO COMO INDUSTRIAL.

- HASTA 1970 LA DEMANDA DE AGUA DEL AREA METROPOLITANA SUPUSO EL 91% DE LA DEMANDA TOTAL PARA ABASTECIMIENTO E INDUSTRIA DE LA REGION ESTUDIADA SE ESTIMA QUE ESTE PORCENTAJE SERA MAYOR EN EL FUTURO (93% EN EL AÑO 1985 Y 94% EN EL AÑO 2000)

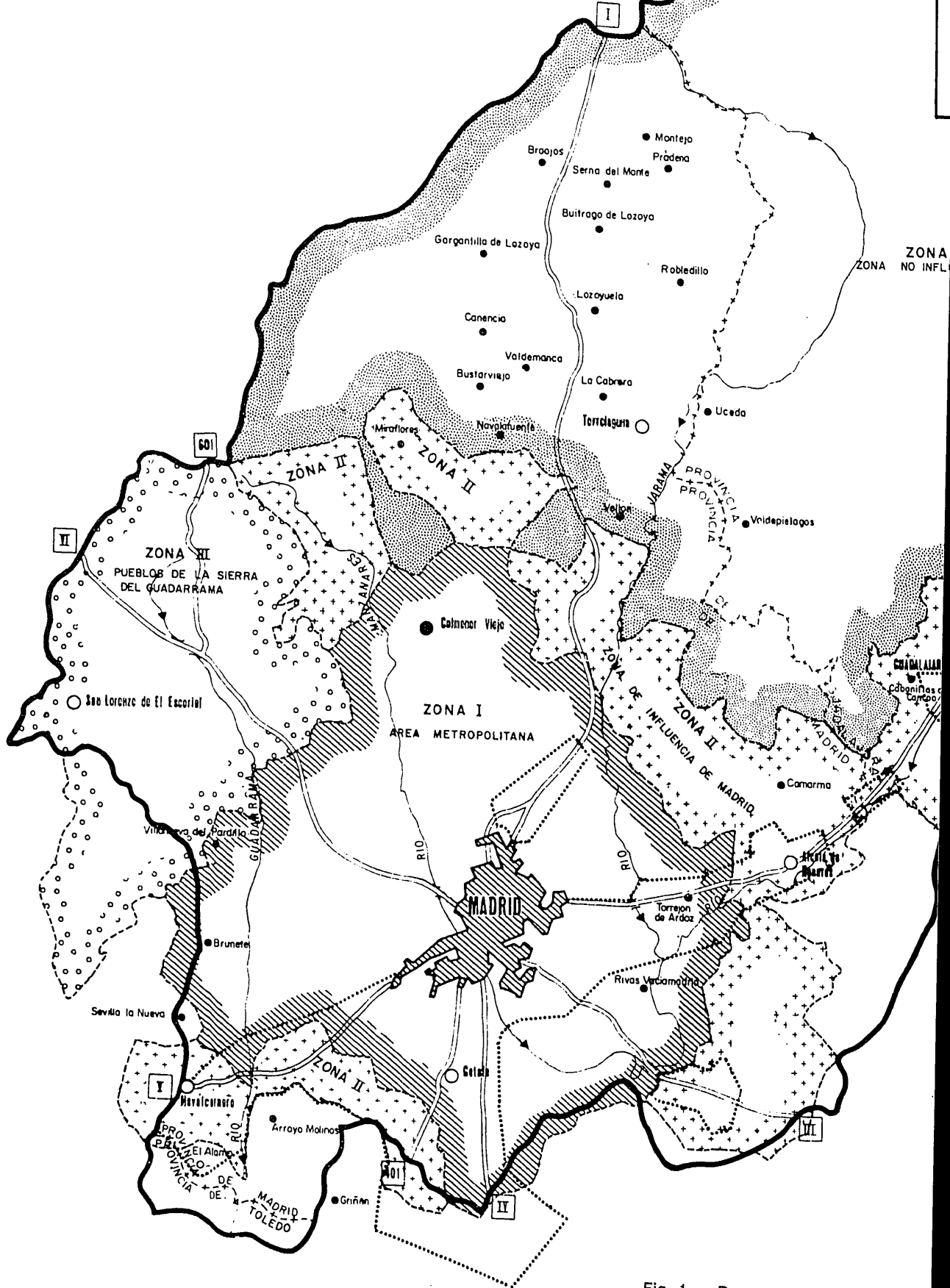
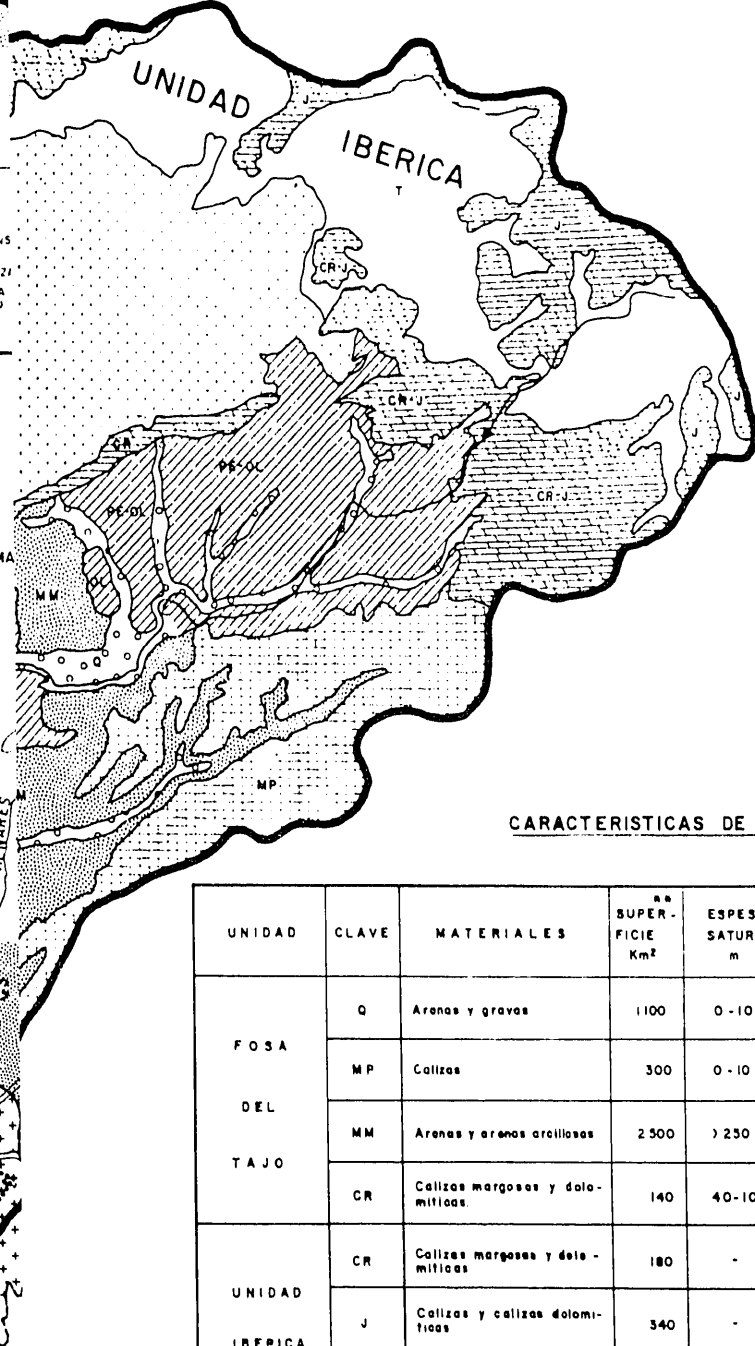


Fig. 1. — Demanda de agua en la zona



CARACTERISTICAS DE LAS UNIDADES HIDROGEOLOGICAS

UNIDAD	SUPERFICIE Km ²	PRECIPITACION Hm ³ /año	RECARGA Hm ³ /año	RESERVAS Hm ³	BOMBEO Hm ³ /año
FOSA DEL TAJO	4 900	2 430	400	> 50 000	175
UNIDAD IBERICA	1 000	600	100	300-2 500	0
SISTEMA CENTRAL	3 700	2 800	0	0	0
TOTAL REGION	9 600	5 830	500	> 50 000	175

CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES ACUIFEROS (*)

UNIDAD	CLAVE	MATERIALES	** SUPER- FICIE Km ²	ESPE- SOR SATURADO m	POROSIDAD EFICAZ %	TRANSMISI- VIDAD m ² /dia	RECARGA Hm ³ /año	BOMBEO Hm ³ /año	DRENAJE POR RIOS Hm ³ /año	CAUDAL PROBABLE POR POZO l/s
FOSA DEL TAJO	Q	Arenas y gravas	1100	0-10	10-20	200-600	160	70	90	5-15
	MP	Calizas	300	0-10	5-10	50-300	25	5	20	5-15
	MM	Arenas y arenas arcillosas	2500	> 250	5-15	30-200	200	100	100	5-50
	CR	Calizas margosas y dolo- miticas	140	40-100	2-5	50-2000	50	0	50	25-100
UNIDAD IBERICA	CR	Calizas margosas y dolo- miticas	180	-	1-5	-	30	0	30	-
	J	Calizas y calizas dolomi- ticas	340	-	1-5	-	30	0	50	-
	*** TM	Calizas dolomíticas	25	-	1-5	-	5	0	5	-
SISTEMA CENTRAL	Q-CR	Gravas, arenas y arillos calizas	40	50	1-20	> 150	-	0	-	-
	G	Rocas cristalinas y metamórficas que constituyen acuíferos locales cuando están fracturadas y/o meteorizadas								Q, 1-1,5

(*) Cifras redondeadas
 (**) Superficie de los afloramientos
 (***) Acuífero no cartografiado a la escala del plano

LEYENDA

TERRENOS PERMEABLES POR FISURACION	TERRENOS PERMEABLES POR POROSIDAD
Calizas y dolomías mesozoicas (CR, J)	Arenas y arenas arcillosas micáceas (MM)
Calizas de los pinnacos (MP)	Gravas y arenas aluviales (Q)



CONTENIDO DEL PROGRAMA *****

HIPOTESIS CONSIDERADAS

*ENCAREZAMIENTO DE LA TABLA CAUDALES DE

5-L./SEG.
10-L./SEG.
25-L./SEG.
50-L./SEG.
75-L./SEG.
100-L./SEG.

PERIODOS DE AMORTIZACION DE

5.A/OS
10.A/OS
20.A/OS
30.A/OS

INTERESES DEL CAPITAL DE

5.1
8.1
10.1

TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO

5000.HORAS/A/O
7200.HORAS/A/O

*VARIABLES DE CADA TABLA

CAPTACION

1000000.PESETAS
2000000.PESETAS

CONDUCCION

20.METROS
100.METROS
500.METROS
1000.METROS
3000.METROS

ALTURA DE ELEVACION

25.METROS
50.METROS
100.METROS

*VARIABLES FIJADAS EN ESTE ESTUDIO

PRECIO DEL KWH 1.20PESETAS

MAQUINARIA DE ACUERDO CON EL BOLETIN NO. 36 SGOP, IN-CLUYENDO TRANSFORMADORES Y LINEA ELECTRICA

ENTRETENIMIENTO 75000.PTAS.A/O/POZO

NOTAS

1.LA MAQUINARIA SE AMORTIZA COMO MAXIMO EN 10 A/OS

2.EL DIAMETRO DE LA CONDUCCION, SE HA CALCULADO A PARTIR DE LA FORMULA DE BRESS Y SE HAN CONSIDERADO PRECIOS DE TUBERIA DE FIERRO CEMENTO DE 10 ATM. DE ACUERDO CON EL BOLETIN NO.36 SGOP

Fig. 3. — Variables consideradas en el coste del metro cúbico de agua.

ESTUDIO HIDROECONOMICO *****

HOJA NO. 63

CAUDAL DEL POZO 25-L./SEG.

PERIODO DE AMORTIZACION				20.ANOS	INTERES CAPITAL		8.1	TIEMPO DE BOMBEO		5000.HORAS/A/O
INVERSION										
CAPTACION	MAQUINARIA	CONDUCCION	ENTRET.	ENERGIA	COSTE DEL M-3(PTAS.)					
	(PTS./ANO)			(PTS./M-3)	CAPTACION	MAQUINARIA	CONDUCCION	ENTRET.	ENERGIA	TOTAL
1000000.	200000.	18000.	75000.	0.12						
1000000.	350000.	18000.	75000.	0.24	0.23	0.07	0.00	0.17	0.12	0.58
1000000.	430000.	18000.	75000.	0.48	0.23	0.12	0.00	0.17	0.24	0.75
1000000.	200000.	90000.	75000.	0.12	0.23	0.07	0.00	0.17	0.48	1.02
1000000.	350000.	90000.	75000.	0.24	0.23	0.12	0.02	0.17	0.12	0.60
1000000.	430000.	90000.	75000.	0.48	0.23	0.14	0.02	0.17	0.24	0.77
1000000.	200000.	450000.	75000.	0.12	0.23	0.07	0.10	0.17	0.12	1.04
1000000.	350000.	450000.	75000.	0.24	0.23	0.12	0.10	0.17	0.24	0.68
1000000.	430000.	450000.	75000.	0.48	0.23	0.14	0.10	0.17	0.48	0.85
1000000.	200000.	900000.	75000.	0.12	0.23	0.07	0.20	0.17	0.12	1.12
1000000.	350000.	900000.	75000.	0.24	0.23	0.12	0.20	0.17	0.24	0.78
1000000.	430000.	900000.	75000.	0.48	0.23	0.14	0.20	0.17	0.48	0.95
1000000.	200000.	2700000.	75000.	0.12	0.23	0.07	0.61	0.17	0.12	1.22
1000000.	350000.	2700000.	75000.	0.24	0.23	0.12	0.61	0.17	0.24	1.19
1000000.	430000.	2700000.	75000.	0.48	0.23	0.14	0.61	0.17	0.48	1.36
2000000.	200000.	18000.	75000.	0.12	0.45	0.07	0.00	0.17	0.12	0.81
2000000.	350000.	18000.	75000.	0.24	0.45	0.12	0.00	0.17	0.24	0.98
2000000.	430000.	18000.	75000.	0.48	0.45	0.14	0.00	0.17	0.48	1.25
2000000.	200000.	90000.	75000.	0.12	0.45	0.07	0.02	0.17	0.12	0.83
2000000.	350000.	90000.	75000.	0.24	0.45	0.12	0.02	0.17	0.24	1.00
2000000.	430000.	90000.	75000.	0.48	0.45	0.14	0.02	0.17	0.48	1.26
2000000.	200000.	450000.	75000.	0.12	0.45	0.07	0.10	0.17	0.12	0.91
2000000.	350000.	450000.	75000.	0.24	0.45	0.12	0.10	0.17	0.24	1.08
2000000.	430000.	450000.	75000.	0.48	0.45	0.14	0.10	0.17	0.48	1.34
2000000.	200000.	900000.	75000.	0.12	0.45	0.07	0.20	0.17	0.12	1.01
2000000.	350000.	900000.	75000.	0.24	0.45	0.12	0.20	0.17	0.24	1.18
2000000.	430000.	900000.	75000.	0.48	0.45	0.14	0.20	0.17	0.48	1.45
2000000.	200000.	2700000.	75000.	0.12	0.45	0.07	0.61	0.17	0.12	1.42
2000000.	350000.	2700000.	75000.	0.24	0.45	0.12	0.61	0.17	0.24	1.59
2000000.	430000.	2700000.	75000.	0.48	0.45	0.14	0.61	0.17	0.48	1.85

Fig. 4. — Salida de ordenador del programa de coste teórico del metro cúbico de agua.

CUADRO 4. — Coste del metro cúbico de agua extraída en los pozos construidos por el SGOP en Torrelaguna

Período de amortización (años)	Captación Ptas./m ³	Maquinaria Ptas./m ³	Conducción Ptas./m ³	Entretenimiento Ptas./m ³	Energía Ptas./m ³	TOTAL Ptas./m ³
5	0,29	0,10	0,02	0,06	0,36	0,83
10	0,17	0,06	0,01	0,06	0,36	0,66
20	0,12	0,06	0,01	0,06	0,36	0,61
30	0,10	0,06	0,01	0,06	0,36	0,59

NOTA: En el caso de que sólo se bombease durante tres mil horas al año, permaneciendo sin modificación el resto de las variables, los costes resultantes estarían comprendidos entre 1,50 y 0,90 ptas./m³, según que el período de amortización que se considere sea de cinco o treinta años.

supuesto, para caudales y elevaciones, valores bastante pesimistas. Si en su lugar se eligiesen otros más próximos a los obtenidos en los ensayos de bombeo realizados en los pozos construidos por el Servicio Geológico, podría concluirse que, posiblemente el coste resultante será del orden de la mitad de la cantidad antes citada.

En cualquier caso, parece que el coste del agua que pueda extraerse de este embalse subterráneo será bastante inferior a las 3 pesetas/m³, que es la cifra que indica el Canal de Isabel II como coste actual del agua regulada a la entrada de los canales de conducción (6).

4.4. Comparación económica del embalse subterráneo con los embalses superficiales del abastecimiento a Madrid.

En el cuadro 5 se han recogido una serie de datos de los embalses de abastecimiento de agua a Madrid, procedentes de la Memoria 1951-1965 (2), páginas 21 a 24, 47, 73 y 293.

Una estimación del cálculo del metro cúbico por segundo regulado procedente del embalse subterráneo puede hacerse del siguiente modo: si suponemos que los pozos proporcionan un caudal medio del orden de 30 a 50 litros por segundo, para bombear 1 m³/seg. serán necesarios entre 20 y 30 pozos. La inversión por cada uno de ellos no será superior a 2 millones de pesetas incluyendo maquinaria, conducción, transformador y línea eléctrica, lo que se traduce en que la inversión inicial en instalaciones estará probablemente comprendida entre 40 y 60 millones de pesetas.

CUADRO 5. — Datos económicos de los embalses del abastecimiento de agua a Madrid

EMBALSE	Capacidad (Hm ³)	Coste (M ptas.)	Coste m ³ /s. regulado (M ptas.)
Pinilla	38	350	350
El Vellón	45	490	393
Manzanares	95	450	150
Atazar	425	3.834 (*)	639
Val mayor	120	2.200 (**)	550

(*) Incluye el presupuesto de la presa entre 1-X-65 y 31-XII-71 y las obras complementarias que aparecen en la pág. 47.

(**) Incluye: presa de desviación en el río Guadarrama, depósito de regulación, estación de tratamiento y gran conducción hasta Majadahonda, según página 24.

Fuente: Memoria 1951-1969. Canal de Isabel II, páginas 21 a 24, 47, 73 y 239.

A la cantidad anterior hay que sumar los gastos de energía. Si suponemos el precio del kilovatio-hora entre 1 y 1,20 pesetas y una elevación media comprendida entre 50 y 100 metros, el coste por metro cúbico de agua oscila entre 0,20 y 0,48 pesetas, lo que representa entre 6,3 y 15,1 millones de pesetas por metro cúbico/seg. regulados y año. Capitalizando esta cantidad en veinte años con una tasa de interés del 8 por 100, la cantidad resultante se encuentra comprendida entre 60 y 150 millones de pesetas.

Sumando las cantidades incluidas en los dos conceptos anteriores, puede afirmarse que el coste del metro cúbico por segundo regulado procedente del embalse subterráneo estará probablemente comprendido entre 100 y 200 mi-

liones de pesetas, representando el coste de la energía entre el 60 y 70 por 100 del total.

A la vista de estos números, del cuadro 5 y de los planes futuros del abastecimiento de agua a Madrid, se obtiene la siguiente conclusión: si bien "las aguas subterráneas del Cretácico de Torrelaguna difícilmente podrían suministrar a Madrid de modo permanente un caudal anual superior al 5 ó 10 por 100 de la demanda actual de Madrid, sin embargo, es probable que constituyan la solución económicamente más ventajosa entre las restantes soluciones actualmente en estudio" (3) (págs. 15 y 16).

5. Análisis económico de las aguas subterráneas del Terciario detrítico de la región de Madrid.

5.1. Características generales.

El principal acuífero de la región de Madrid, tanto por su extensión y situación geográfica, es el constituido por las arenas y gravillas más o menos limpias, intercaladas en una masa de arcillas más o menos arenosas atribuidas estratigráficamente al Mioceno.

El estudio de este acuífero presenta algunas dificultades que no han sido abordadas de forma sistemática hasta hace relativamente poco tiempo. Los intentos de correlación entre los tramos permeables realizados hasta ahora han proporcionado resultados pocos satisfactorios. A continuación presentamos un enfoque diferente para su estudio, basado principalmente en métodos estadísticos. El método y resultados que se exponen son parte de un estudio más amplio del autor que piensa presentar como tesis para la obtención del grado de Doctor en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Madrid.

La explotación principal del embalse subterráneo se efectúa por numerosas industrias y urbanizaciones asentadas sobre él. Asimismo, numerosos núcleos de población se abastecen en agua de la misma procedencia. Se ha estimado, en principio, que el volumen bombeado procedente del embalse subterráneo es de unos $10 \text{ Hm}^3/\text{año}$ (1).

Recientemente, por acuerdo del Consejo de Ministros de 21 de septiembre de 1973, ha sido publicado el "Concurso para el suministro de

aguas subterráneas profundas con destino al abastecimiento del Area Metropolitana de Madrid", promovido por el Canal de Isabel II. El precio de la adjudicación ha sido de 2,95 pesetas/m³. En las bases del concurso se consideran periodos de amortización de cinco años prorrogables hasta un total de diez, y caudales comprendidos entre 500 y 1.000 l/seg. (6). Cuando la explotación se ponga en funcionamiento —en las fechas de redacción del presente artículo se están construyendo los pozos— constituirá el bombeo concentrado más importante de la región.

A partir de los primeros datos obtenidos en el inventario de puntos de agua realizados por el Servicio Geológico de Obras Públicas y la Comisaría de Aguas del Tajo (1) se han seleccionado datos de 106 pozos, de los que se tenía información más completa. La distribución de dichos pozos por octantes de las hojas del Mapa Topográfico Nacional a escala 1 : 50.000, puede verse en la figura 5. Posteriormente dicho inventario ha sido ampliado y mejorado.

5.2. Correlación caudal específico-profundidad.

Se ha comenzado estudiando la correlación existente entre el caudal específico de los pozos (caudal extraído por metro de depresión, sujeta ésta estabilizada a efectos prácticos) y el espesor saturado atravesado (fig. 6), obteniéndose un coeficiente de correlación del 0,10, que no difiere de cero al nivel de significación del 5 por 100, lo que indica que las dos variables estudiadas son independientes. La figura muestra que los pozos de más de 100 m no proporcionan un caudal específico mayor que el resto, y que en la mayoría de los casos es inferior a 1 l/seg. por metro de depresión. La primera conclusión provisional que podemos obtener de este resultado es que no puede afirmarse que, en general, se obtenga un mayor rendimiento perforando pozos de más de 150 metros de profundidad.

5.3. Modelo probabilístico del caudal específico.

El siguiente paso ha sido el de encontrar un modelo probabilístico al que se ajustase el caudal específico de los pozos. Para ello se ha

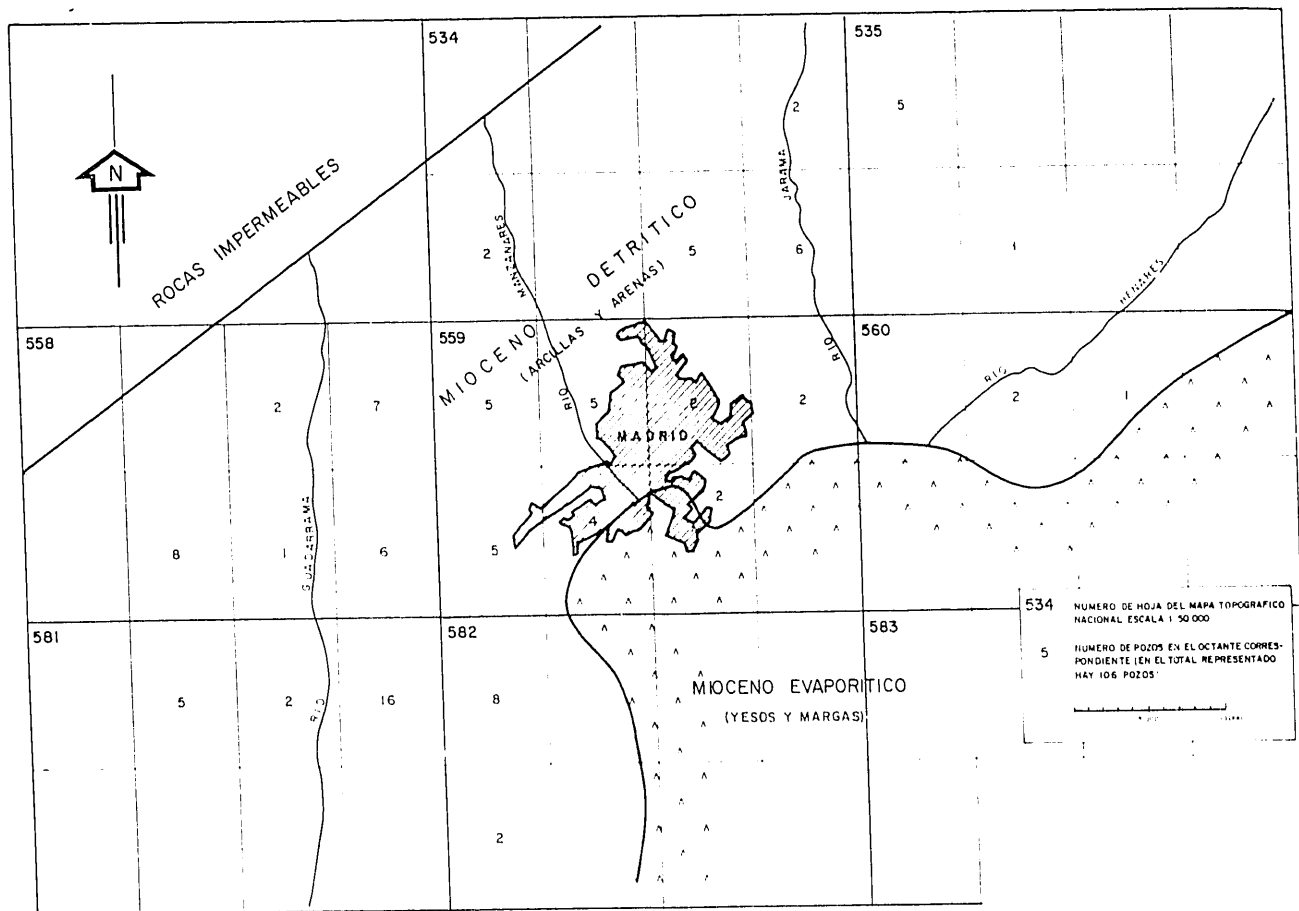


Fig. 5. — Distribución geográfica de los pozos estudiados en el Mioceno de Madrid

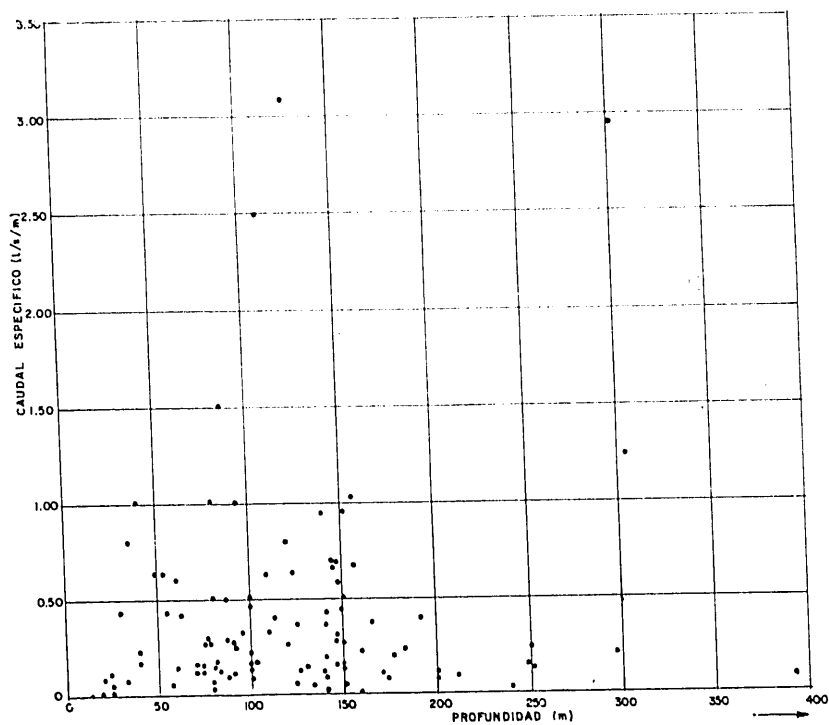


Fig. 6. — Relación entre el caudal específico y la profundidad en 106 pozos del acuífero mioceno de Madrid.

preparado un programa de cálculo para el ordenador IBM 7090 del Centro de Cálculo de la Universidad Complutense de Madrid, que, como primer paso, ordena los valores y les asigna una probabilidad según su posición (siguiendo el método de Gumbel). En la salida viene explícitamente indicado el valor de los siguientes estadísticos: media, desviación típica, coeficiente de asimetría, coeficiente de apuntamiento y mediana, con lo que puede observarse inmediatamente si los elementos de la muestra elegida siguen una ley probabilística normal.

En nuestro caso no ha sido así. Este resultado negativo podría justificarse *a priori* con el siguiente razonamiento: si una variable es la resultante de un elevado número de causas independientes con efectos aditivos, y cada una de estas causas tiene un efecto despreciable frente al conjunto, entonces dicha variable se distribuye según una ley normal (teorema central del límite).

Sin embargo, en el caso del caudal específico de un pozo pueden pensarse que las causas que influyen en él, como zona de ubicación del pozo, materiales atravesados, desarrollo del entorno, tipo de rejilla, colmatación, etc., no influyen como sumandos en el efecto resultante, sino que cada factor es suficiente por sí sólo para controlar el resultado final. Estos efectos podrán quizá expresarse como si el caudal fuese el producto de un número de causas independientes:

$$Q_{esp.} = \prod_{i=1}^n [\xi_i (1 + \rho_i)]$$

donde ξ_i designa la parte sistemática del efecto debido al factor i , y ρ_i , la parte aleatoria relativa (8). En dicho caso, si se demostrase teóricamente que:

- Los factores son muy numerosos, n grande.
- Los factores son independientes.
- Los efectos ξ_i y ρ_i son despreciables cualquiera que sea i ,

la variable considerada seguiría una ley log-normal o de Galton, o lo que es lo mismo, el logaritmo de la variable seguiría una ley normal (fig. 7).

INTERVALO	Nº DE POZOS	FRECUENCIA RELATIVA %
-4,5 -4,0	3	2,83
-4,0 -3,5	2	1,89
-3,5 -3,0	3	2,83
-3,0 -2,5	5	4,72
-2,5 -2,0	16	15,09
-2,0 -1,5	21	19,81
-1,5 -1,0	16	15,09
-1,0 -0,5	16	15,09
-0,5 0,0	14	13,21
0,0 0,5	5	4,72
0,5 1,0	2	1,89
1,0 1,5	3	2,83
TOTALES	106	100,00

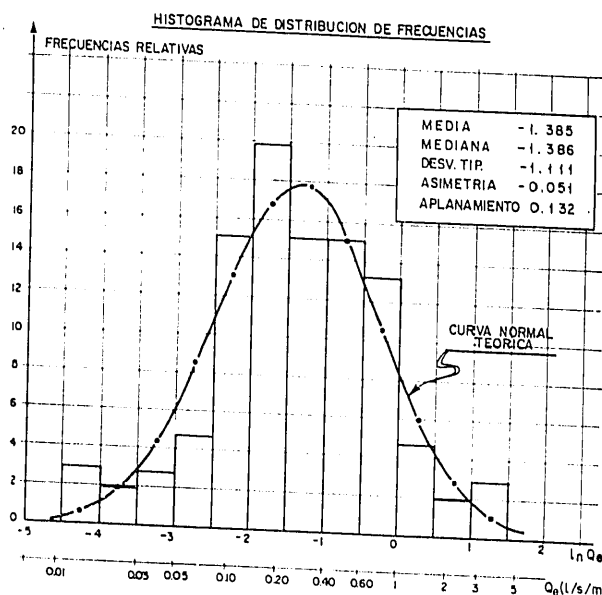


Fig. 7. — Distribución de frecuencias relativas del caudal específico de los pozos del Mioceno de Madrid.

En nuestro caso parece razonable poder aceptar las dos primeras condiciones mencionadas, no pareciendo, en cambio, tan evidente poder aceptar la tercera condición.

Para comprobar si la muestra obtenida, en nuestro caso, se ajusta al modelo probabilístico propuesto, se ha utilizado el método de ajuste gráfico mediante la recta de Henri (8). En otras palabras; si la variable considerada se distribuye según una ley log-normal, llevando los datos a un papel probabilístico-logarítmico, se ajustarán a una recta. En las figuras 7 y 8 puede verse el modelo probabilístico propuesto. Para comprobar la bondad del ajuste se ha empleado el test chi-cuadrado, previa preparación del correspondiente programa para el ordenador. Los resultados del test indican que el ajuste obtenido es muy satisfactorio.

Se ha completado el modelo probabilístico

considerando los resultados negativos o "fallos", ya que un pozo no se utilizará cuando su rendimiento sea excesivamente pequeño. Para ello (teniendo en cuenta que en una empresa constructora de pozos tomada como testigo se han obtenido el 11,33 por 100 de "fallos" en una muestra de 150 pozos), y a falta de mejor información, hemos considerado razonable admitir que la probabilidad de obtener resultados negativos es del 10 por 100. Es muy posible que en el futuro, debido a un mayor conocimiento del acuífero y a una mejor tecnología constructiva, tal cifra puede ser rebajada.

5.4. Observaciones al modelo probabilístico.

Antes de seguir adelante conviene hacer algunas indicaciones sobre el método seguido:

1. La fiabilidad de los datos es en muchos casos dudosa. Con el Inventario de pozos disponible con posterioridad a la redacción del presente artículo podrán eliminarse algunos errores al aumentar el tamaño de la muestra.

2. La homogeneidad de los datos es escasa. No se han tenido en cuenta algunos factores que influyen en el caudal específico, como son, entre otros, el diámetro del pozo y el tiempo de bombeo (12).

3. No se han considerado efectos de penetración parcial del pozo en el acuífero, difíciles de evaluar en este caso.

4. Se ha considerado que los pozos están perforados en un acuífero único de características homogéneas. Como paso siguiente se está estudiando la división del acuífero en zonas según el área madre de procedencia de los sedimentos que lo constituyen y la distancia del área de sedimentación al área madre. Las coincidencias y diferencias de las variables consideradas se probarán con *test* estadísticos adecuados.

5. Por último, la variable considerada —en este caso el caudal específico—, aunque cómoda de interpretación física, puede no ser la más adecuada. Como paso siguiente se están estudiando igualmente las variables: a) caudal específico por metro de espesor saturado atravesado, y b) caudal específico por metro de filtro o tramo permeable atravesado por el pozo.

5.5. Coste del metro cúbico de agua procedente del Terciario detrítico.

Del modelo probabilístico obtenemos los siguientes datos (fig. 8):

Caudal específico (l./s.m.)	Probabilidad de ser superado (%)
0,073	89 (moda)
0,13	75
0,25	50 (mediana)
0,46	29 (media)
1,00	10

Aceptando los valores de la figura 9 para las variables que intervienen en el coste del metro cúbico de agua, y una inversión en maquinaria de acuerdo con (5), se obtiene la curva dibujada en la misma figura, que nos relaciona el coste del metro cúbico con los caudales de explotación y la probabilidad de conseguirlos.

Puede, por tanto, concluirse (repetimos una vez más que a falta de un estudio por zonas que permitirá posiblemente afinar estos datos) que, construyendo un pozo al azar, si aceptamos las condiciones de la figura 9, el coste esperado por metro cúbico es de 1,47 pesetas (mediana).

Los cifras anteriores deberán incrementarse para cubrir el riesgo de pozos negativos (en estos casos, el coste sería únicamente el de la construcción del pozo). Por otra parte se ha considerado un descenso arbitrario. En etapas siguientes sería recomendable estudiar el descenso que producen los costes más bajos, o lo que es lo mismo, la explotación más económica.

5.6. Tarifas actuales del Canal de Isabel II

Con el fin de tener una idea comparativa de los costes calculados anteriormente respecto a los que resultarían del metro cúbico de agua tomada de otra procedencia, reproducimos algunos datos de las tarifas actuales del Canal de Isabel II. Debemos señalar que si bien dichas tarifas no representan el coste del agua superficial desde el punto de vista de la Administración, pues en ella van incluidas otra serie de

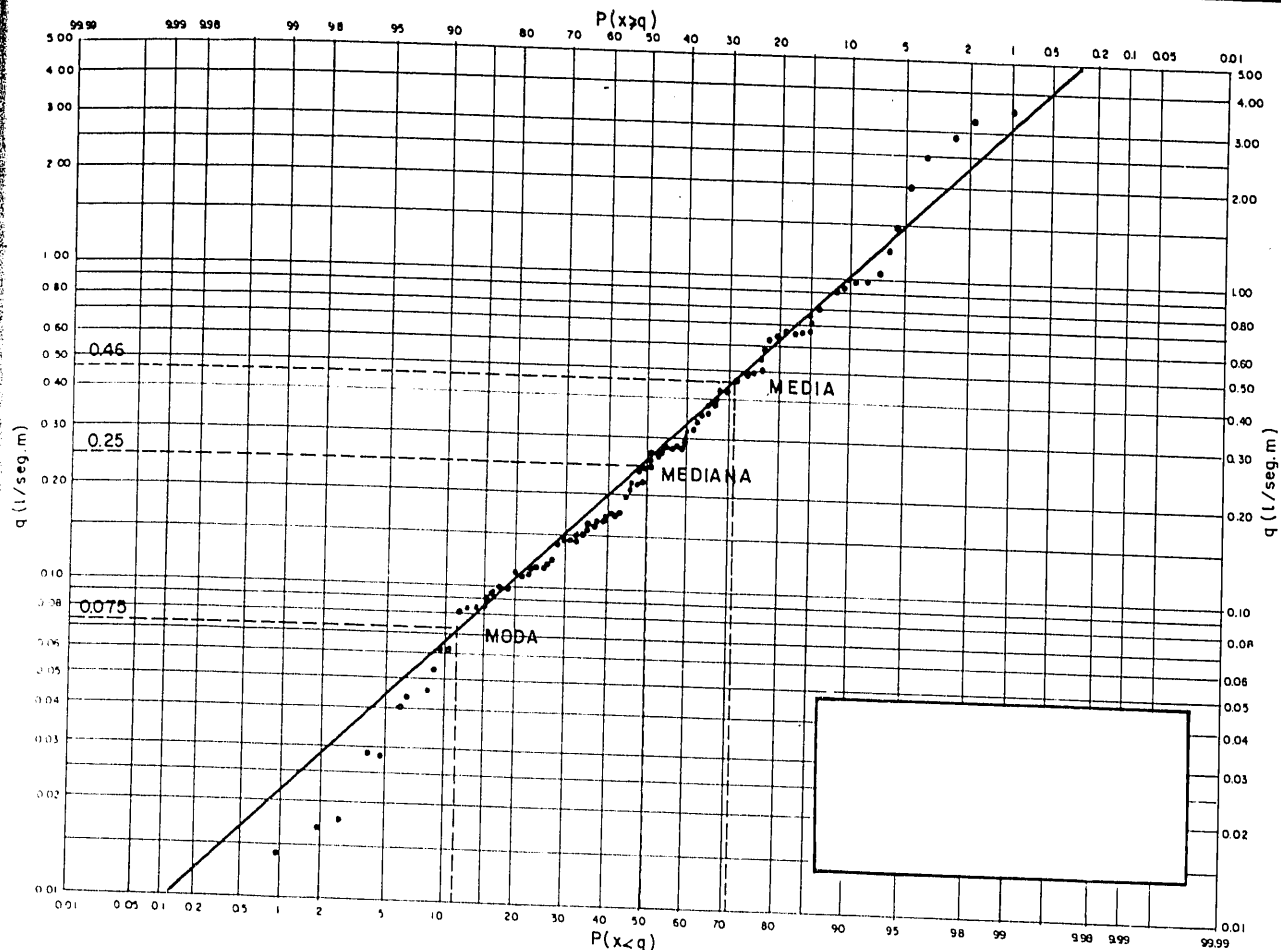


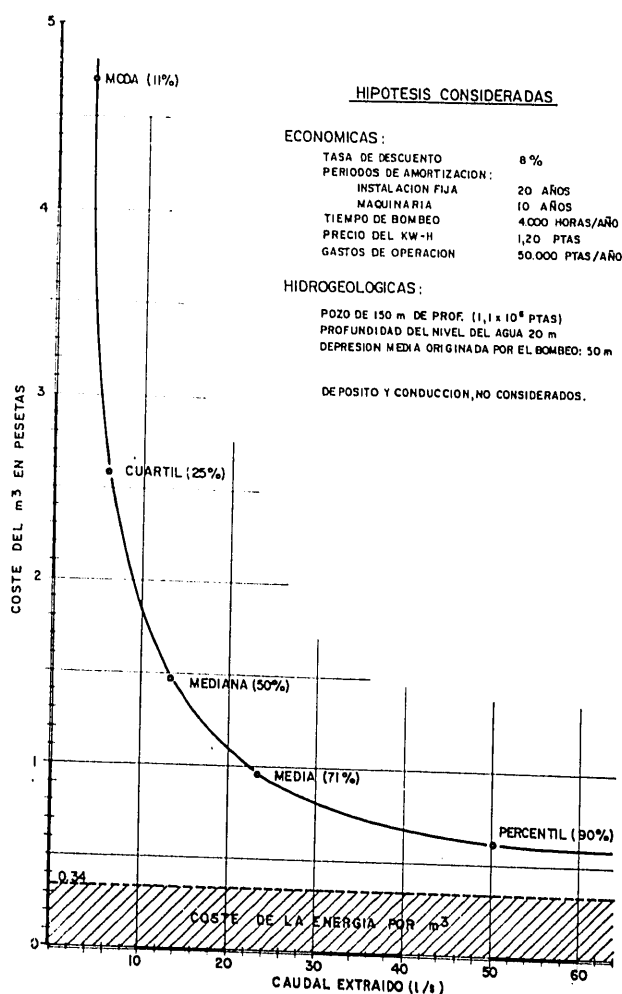
Fig. 8. — Ajuste al modelo probabilístico propuesto.

factores cuya enumeración no procede hacer en este lugar, sí pueden considerarse como tales desde el punto de vista del particular (industria o urbanización ubicada en el Mioceno detrítico) que está estudiando soluciones alternativas para su abastecimiento de agua.

Las tarifas siguientes son las aprobadas por el decreto 1.774/67 de 20-VII-67, *Boletín Oficial* de 25-VII-67, autorizadas por el Consejo de Ministros del 5 de febrero de 1971.

Para las actividades industriales y comerciales es de 7 ptas./m³ para industrias existentes, de conveniente radicación en el Area Metropolitana, y de 11 ptas./m³ para el resto de industrias y tomas provisionales. Para usos domiciliarios la tarifa base es de 5,50 ptas./m³, con modificaciones o recargos según los casos, de 7 ptas./m³ para usos domiciliarios no domésticos.

3. — Coste del metro cúbico de agua en función del caudal del pozo.



6. Coste del metro cúbico de agua procedente de otras fuentes.

Nos referimos principalmente a la reutilización de las aguas residuales, cuyo uso se plantea en zonas industriales, riego de la ciudad, lagos para recreo al sur de Madrid, etc. En la publicación (7), sin entrar en detalles, se señala que es previsible que el coste en depuradora del metro cúbico de agua que ha sufrido un tratamiento completo no excede en mucho al del tratamiento secundario, que en España puede ser de 3 ptas./m³.

7. Conclusiones.

Las aguas subterráneas, aunque en la región de Madrid no parecen constituir una solución para resolver los abastecimientos a las grandes concentraciones urbanas, sí parece probable, en cambio, que constituyan la solución más económica para resolver problemas de abastecimiento a numerosos núcleos urbanos, urbanizaciones e industrias.

Presentan la ventaja de la distribución geográfica de recursos, ya que el principal acuífero de la región —el constituido por el Mioceno detrítico— tiene una superficie de algunos miles de kilómetros cuadrados, y si bien, con los datos disponibles hasta el momento, no parece probable que pueda proporcionar elevados caudales por obra de captación, sí puede proporcionar los suficientes para cubrir de forma económica gran número de demandas pequeñas y medias que se están desarrollando de forma creciente en los alrededores de Madrid.

El coste de llevar aguas superficiales a las zonas de baja densidad de población (o baja densidad de consumo) como son las zonas II y parte de las I y IV descritas en el apartado 2, puede resultar más cara que la explotación de las aguas subterráneas.

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Dr. Manuel Ramón Llamas, Prof. Agregado de Hidrogeología de la Universidad Complutense de Madrid, que además de haber organizado el ciclo de conferencias antes citado, ha sido el

promotor e iniciador de la mayor parte de métodos y programas que se han utilizado en la presente publicación. Asimismo, hacemos constar nuestra gratitud a D. Andrés Sahuquillo, Jefe de la Sección de Estudios Hidrogeológicos del Servicio Geológico de Obras Públicas, por su constante asesoramiento.

BIBLIOGRAFIA

1. "Estudios de las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona comprendida entre las cuencas de los ríos Guadarrama y Henares". Servicio Geológico de Obras Públicas y Comisaría de Aguas del Tajo. Madrid, 1973.
2. "Memoria 1951-1969". Canal de Isabel II. Madrid, 1971.
3. LLAMAS, M. R.: "Informe sobre el concurso para el abastecimiento de aguas profundas con destino al Área Metropolitana de Madrid". Servicio Geológico de Obras Públicas. 1971.
4. LLAMAS, M. R., y col.: "Primer informe hidrogeológico sobre los embalses subterráneos del Cretácico de la cuenca media del río Jarama". Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid, 1972.
5. ANDOLZ, J.: "Coste del agua subterránea para abastecimiento urbano". Boletín núm. 36 del Servicio Geológico de Obras Públicas, 1972.
6. Boletín Oficial del Estado de 20 de noviembre de 1971: "Resolución del Canal de Isabel II por la que se anuncia concurso para contratar el suministro de aguas subterráneas profundas con destino al abastecimiento del Área Metropolitana de Madrid". 1971.
7. MARTINEZ DE BASCARAN, G.: "La reutilización de las aguas residuales, ¿una solución para Madrid?". Boletín de Información del Ministerio de Obras Públicas. Enero 1973.
8. CALOT, G.: "Curso de estadística descriptiva". Editorial Paraninfo. Madrid, 1970.
9. GULLON, A.: "Introducción a la estadística aplicada". Editorial Alhambra. Madrid, 1970.
10. CORCHON, F.: "Estudio hidrogeológico del Cretácico de los alrededores de Torrelaguna (Madrid, Guadalajara)". Tesis doctoral (en preparación). Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense. Madrid, 1973.
11. Servicio Geológico de Obras Públicas: "Segundo informe hidrogeológico sobre los embalses subterráneos del Cretácico de la cuenca media del río Jarama (Madrid, Guadalajara)". En edición, 1973.
12. SAHUQUILLO, A.; LOPEZ, L., y SANCHEZ, V.: "Estudio estadístico de los acuíferos de Manzanar". Primer Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica. Madrid, 1971.