

ACTUALIZACION DE DATOS HIDROGEOLOGICOS EN
LOS ACUIFEROS DE ALMONTE-MARISMAS Y MIOCE-
NO DE BASE. 1982.

MODELO MATEMATICO BIDIMENSIONAL DEL SISTE-
MA ACUIFERO N° 27. UNIDAD ALMONTE-MARISMAS.

MADRID, DICIEMBRE DE 1982

35656

INDICE

I N D I C E

	<u>Pags.</u>
1.- <u>INTRODUCCION Y OBJETIVO</u>	1
2.- <u>METODOLOGIA</u>	2
3.- <u>EL PROGRAMA DIGITAL UTILIZADO</u>	4
4.- <u>LOS DATOS DE PARTIDA</u>	8
4.1. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y GEOMETRICAS DEL ACUIFERO.....	8
4.2. DISCRETIZACION DEL ACUIFERO: CARACTERISTICAS DE LA MALLA.....	11
4.3. OPCIONES DE SIMULACION UTILI ZADAS.....	12
4.4. PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS.....	14
4.4.1. <u>Niveles iniciales</u>	16
4.4.2. <u>Parámetros hidráulicos</u> <u>cos</u>	16
4.4.3. <u>Cotas del techo y mu</u> <u>ro del acuífero</u>	19
4.4.5. <u>Recarga</u>	20
4.4.6. <u>Datos de explotación</u> <u>y evolución de los ni</u> <u>veles piezométricos -</u> <u>del acuífero</u>	20
5.- <u>CALIBRACION DEL MODELO</u>	23
6.- <u>COMPORTAMIENTO DEL ACUIFERO SEGUN EL</u> <u>MODELO REALIZADO</u>	27

7.- <u>ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DEL</u> <u>COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DEL -</u> <u>ACUIFERO.....</u>	37
8.- <u>ALGUNAS RECOMENDACIONES PARA EL USO</u> <u>FUTURO DEL MODELO.....</u>	42
9.- <u>CONCLUSIONES.....</u>	44
10.- <u>BIBLIOGRAFIA.....</u>	49

A N E X O S (TOMO APARTE)

ANEXO 1: PROGRAMA UTILIZADO.

ANEXO 2: MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA.

ANEXO 3: DATOS DE ENTRADA DEL MODELO.

ANEXO 4: DATOS DE ENTRADA DE LA SIMULACION DE 40 AÑOS.

ANEXO 5: LISTADO DE SALIDA DEL MODELO.

ANEXO 6: LISTADO DE SALIDA DE LA SIMULACION DE 40 AÑOS.

P L A N O S

1.- MAPA GEOLOGICO.

2.- DISCRETIZACION EN CELDAS DEL ACUIFERO.

3.- MAPA DE COTAS DEL MURO DEL ACUIFERO.

4.- MAPA DE COTAS DEL TECHO DEL ACUIFERO EN CARGA.

5.- PIEZOMETRIA REAL DEL ACUIFERO EN JUNIO - JULIO DE -
1.982.

6.- MAPA DE PERMEABILIDADES.

7.- DIVISION EN SUBSECTORES.

- 8.- ZONAS DE EXPLOTACION ACTUALES EN EL ACUIFERO.
- 9.- EVOLUCIONES REALES Y SIMULADAS EN LOS PIEZOMETROS DE CONTROL.
- 10.- MAPA DE ISODESCENSOS AL CABO DE UN AÑO CON LAS EXPLOTACIONES ACTUALES.
- 11.- MAPA DE ISOPIEZAS EN REGIMEN PERMANENTE.
- 12.- MAPA DE POROSIDADES EFICACES.
- 13.- SECCIONES PARALELAS AL CONTACTO ZONA LIBRE - ZONA CONFINADA.
- 14.- MAPA DE ISODESCENSOS EN EL VERANO CON LAS EXPLOTACIONES ACTUALES.
- 15.- ZONAS DE EXPLOTACION PREVISTAS PARA EL AÑO 1.984.
- 16.- MAPA DE ISOPIEZAS E ISODESCENSOS AL CABO DE 40 AÑOS DE EXPLOTACION.

F I G U R A S

FIG 1 - 5: EVOLUCIONES DE LOS NIVELES PIEZOMETRICOS DURANTE LOS 40 AÑOS DE SIMULACION EN CINCO NUDOS REPRESENTATIVOS DE LAS ZONAS DE EXPLOTACION.

FIG 6: CORTE DEL ACUIFERO SEGUN LA FILA 40.

FIG 7: CORTE DEL ACUIFERO SEGUN LA COLUMNA 48.

FIG 8: CORTE ESQUEMATICO DEL ACUIFERO MOSTRANDO LA POSICION DE LA INTERFASE EN PROFUNDIDAD.

FIG 9: ZONAS DE DIFERENTE COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO - DEL ACUIFERO.

1.- INTRODUCCION Y OBJETIVO

1.- INTRODUCCION.

Por parte del Instituto Geológico y Minero de España se propuso la realización de un modelo digital del acuífero Almonte - Marismas que permitiese un análisis cuantitativo del comportamiento del acuífero a largo plazo con las explotaciones previstas para el futuro y las repercusiones de estos bombeos en el Parque Nacional de Doñana.

Aunque con anterioridad tanto el IGME como el IRYDA habían realizado sendos modelos matemáticos -- del acuífero, el presente modelo, elaborado en base al programa bidimensional de simulación de acuíferos de Trescott (1.976), tiene la doble ventaja de ser sencillo su manejo juntamente con una gran precisión, teniendo las celdas un tamaño de 500 x 500 m en los sectores de explotación, con lo que hay una celda por cada pozo.

Este modelo conjuga por tanto las ventajas del anterior modelo realizado por el IRYDA, de sencillo manejo pero menor precisión y las del realizado por el IGME, más preciso pero de más complicada utilización.

El modelo, realizado a partir de los datos de 500 pozos y sondeos perforados por el IRYDA será en el futuro una útil herramienta de cálculo que permitirá conocer el comportamiento del acuífero ante diversas alternativas de explotación.

2.- METODOLOGIA

2.- METODOLOGIA

La realización de un modelo digital exige - inicialmente un conocimiento lo más preciso posible de la geometría, piezometría, distribución de transmisividades , etc., puesto que la calidad de la información proporcionada por el programa nunca es mejor que la información inicial.

El proceso a seguir en el desarrollo del modelo, una vez conocidas las características generales del acuífero consiste en la discretización espacial del mismo mediante la superposición de una malla adecuada según la - densidad de información existente y según la geometría del sistema.

El siguiente paso es la atribución de valores a los nudos de la malla extrapolando los valores nodales con un criterio hidrogeológico "sensato".

Con todo este proceso se dispone de un juego de datos de entrada más o menos fiable que habrá que retocar en el proceso de calibración del modelo, tras sucesivas pasadas en régimen permanente y transitorio. Una vez - calibrado el modelo en régimen permanente y transitorio -- puede procederse a la simulación de las alternativas de explotación, pues se dispone de una distribución de paráme--tros hidráulicos que provoca unas respuestas del sistema - sensiblemente iguales a las respuestas del medio físico.

En resumen, para la realización de este trabajo se ha seguido el siguiente esquema metodológico:

- a) Elección del programa digital a utilizar.
- b) Geometría y condiciones de contorno del -
acuífero.
- c) Diseño de la malla del modelo y asigna--
ción de valores a los parámetros hidro--
geológicos de cada uno de los nudos que
la componen.
- d) Calibración del modelo en regimen perma-
nente y en regimen transitorio.
- e) Análisis del sistema de flujo del acuífe
ro.
- f) Hipótesis de explotación e interpreta- -
ción de los resultados obtenidos.
- g) Conclusiones.

3.- EL PROGRAMA DIGITAL UTILIZADO

3.- EL PROGRAMA DIGITAL UTILIZADO

El programa elegido para la simulación de este acuífero es el elaborado por Trescott, Prinder y Larson (1976). El programa tiene la ventaja de ser de fácil disponibilidad y manejo, muy elástico y permitir gran cantidad de alternativas diferentes. Tan sólo hubo necesidad de realizar una pequeña modificación que será comentada más adelante.

El programa en su versión original es capaz de simular en dos dimensiones la respuesta de un acuífero a lo largo del tiempo sometido a unas sollicitaciones exteriores también variables en el tiempo y en el espacio.

El acuífero puede ser libre, confinado o semiconfinado y permite el paso de libre a confinado.

El acuífero puede ser totalmente heterogéneo, anisótropo (con los ejes principales de tensor de transmisividades paralelos a las direcciones del mallado) y de forma irregular.

El acuífero se discretiza en una serie de celdas de forma rectangular pero que pueden ser diferentes entre sí.

El modelo permite simular ríos, manantiales y percolación de agua desde otro acuífero con presión constante a través de una capa semipermeable en la que existe un coeficiente de almacenamiento no nulo.

Se puede incluir una recarga por lluvia y -
recargas o extracciones en pozos o sondeos situados en --
los centros geométricos de las celdas (nudos). También se
puede simular la evapotranspiración en zonas encharcadas -
como función lineal del nivel freático.

El programa plantea las ecuaciones del flu-
jo para todos los nudos de la malla y forma así un siste-
ma de tantas ecuaciones e incógnitas como nudos tiene el
mallado.

A la hora de la resolución del sistema de -
ecuaciones, el usuario puede escoger entre tres métodos -
de resolución por aproximaciones sucesivas: el procedi- -
miento implícito de dirección alternante (IADI), el de so-
brerelajación lineal (LSOR) y el fuertemente implícito --
(SIP).

De estos tres métodos el de sobrerelajación
lineal no presenta ninguna ventaja y se encuentra actual-
mente en desuso.

El procedimiento fuertemente implícito es -
el que necesita menor número de iteraciones para resolver
el sistema de ecuaciones y es por ello el más rápido y el
que se ha usado en este trabajo.

Tiene sin embargo la desventaja respecto --
del método implícito de dirección alternante de que nece-
sita mayor capacidad del ordenador que éste y ello puede
ser decisivo a la hora de utilizar el programa en un sis-
tema informático de pequeña capacidad.

El listado de salida del programa, además - de los datos de entrada, proporciona los siguientes datos para cada intervalo de tiempo simulado (pueden eliminarse los que se deseen):

- a) Matriz de potencial hidráulico y diferencias con el potencial hidráulico de partida.
- b) Planos a escala, de distribución de potencial hidráulico y diferencias con el potencial hidráulico de partida.
- c) Balances detallados de entradas y salidas de agua al acuífero.
- d) Número de iteraciones necesarias para la resolución -- del sistema de ecuaciones y máximo cambio de nivel piezométrico en cada iteración.

Esto último es muy importante pues permite hacer una estimación del error cometido en la resolución aproximada de las ecuaciones de flujo por aproximaciones sucesivas.

De no actuar con cuidado es posible cometer errores importantes debido a acumulación de gran cantidad de pequeños errores individuales si éstos no disminuyen - con suficiente rapidez.

La única modificación realizada a la versión original del programa ha sido permitir que la recarga por

lluvias (o en general cualquier tipo de recargas o extracciones distribuidas superficialmente) pueda variar no sólo en el espacio (hecho contemplado en la versión original) sino también en el tiempo.

El programa modificado, junto con un manual de uso figuran en los anexos I y II.

4.- LOS DATOS DE PARTIDA

4.- LOS DATOS DE PARTIDA

Para la realización del modelo digital se ha podido contar con la información hidrogeológica que sobre este área poseen tanto el IGME como el IRYDA, y que se refiere principalmente a datos de parámetros hidrogeológicos, columnas litológicas de pozos y sondeos y datos de explotación del acuífero relativos al pasado, a la actualidad y a las previsiones futuras. Especialmente ha sido utilizado - también el Estudio Hidrogeológico actualizado del sistema acuífero nº 27: Unidad Almonte-Marismas, realizado durante 1982 por C.G.S. para el Instituto Geológico y Minero de España.

4.1. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS Y GEOMETRICAS DEL ACUIFERO

El sector modelado se encuentra situado dentro de la depresión del Guadalquivir, y geológicamente está formado por una serie de depósitos marinos de edad Neógena parcialmente arrasados y sepultados por sedimentos de origen fluvio marino y eólico de edad Cuaternario.

Al Norte y Nordeste la zona de estudio queda limitada por el río Tinto y los afloramientos de las margas azules del Mioceno superior-Plioceno inferior, al Este por el río Guadiamar, y al Sur y Suroeste por el río Guadalquivir y el Oceano Atlántico.

Las margas azules, anteriormente mencionadas, constituyen también el muro del acuífero. La regresión del final del Plioceno afectó a las condiciones de sedimenta--

ción. Las margas azules se hicieron más arenosas, o bien en su lugar se depositaron limos arenoso-calcareos de tonos amarillentos.

Sobre estos limos basales se asienta el - acuífero que a su vez está constituido por:

- a) Un tramo inferior de arenas basales blanco-amarillentas o amarillo-rojizas que pueden considerarse depósitos de tipo deltáico.
- b) Suprayacente y discordante con el tramo anterior está la denominada "Formación roja". En el contacto entre ambos aparecen esporádicamente unos niveles de margas verdosas muy plásticas con clastos de cuarzo; estos niveles sólo alcanzan una potencia significativa (alrededor de 3 m) en algunos puntos.

La "Formación roja" está constituida por - gravas, arenas y conglomerados cuyo cemento es rico - en óxidos de hierro y de ahí la coloración de esta -- formación.

- c) A todo lo largo de la línea de costa, desde la desembocadura del río Tinto a la del Guadalquivir, se extiende un sistema eólico que alcanza su mayor desarrollo en el sector del Parque Nacional de Doñana y sus inmediaciones. En este sistema dunar se pueden distinguir a veces hasta cuatro "cordones dunares" individualizados por los correspondientes "corrales".

Se trata de una serie de sedimentos de origen típicamente eólico formados principalmente a partir de los materiales infrayacentes, en general arenas basales.

- d) En el sector sur-oriental, el acuífero se encuentra -- confinado por los depósitos de marismas constituidos -- por limos arcillosos con algunos lentejones de arenas intercaladas.

El plano nº 1 muestra la geología de la zona, y en el nº 2 el área modelada limitada por el contorno de la malla utilizada.

La extensión total del acuífero, dentro del contorno de la malla es de unos 2.400 km² de los cuales 1.840 corresponden a zona de acuífero libre y 560 a zona de acuífero confinado bajo los sedimentos de marismas (parte suroriental).

El límite W-NW-N del modelo está constituido por las margas azules, anteriormente mencionadas, de naturaleza impermeable.

El límite S en el Océano Atlántico que se ha simulado mediante una serie de celdas de nivel constante a lo largo de toda la línea de costa.

El límite E del modelo está tomado siguiendo aproximadamente el cauce del río Guadalquivir; es un límite impermeable artificial, pero dado el tamaño de las

celdas de la malla en esa zona, y que el área que es objeto de una observación de mayor detalle está situada suficientemente lejos de esta barrera, los efectos de la misma sobre ella pueden considerarse despreciables.

El muro del acuífero son las margas azules de carácter impermeable, su profundidad es variable en el área modelada, las isolíneas de cotas de esta formación - se pueden ver en el plano nº 3.

El plano 4 es el de isolíneas de cotas del techo del acuífero; éste es libre en toda el área modelada excepto en la zona suroriental que se encuentra semi--confinado por los depósitos de marismas.

4.2. DISCRETIZACION DEL ACUIFERO: CARACTERISTICAS DE LA MALLA.

Para la discretización del acuífero se diseñó una malla de 81 columnas por 52 filas de celdas de dimensiones variables.

El tamaño de las celdas se estableció, de acuerdo con las indicaciones del IGME, según la densidad de información, debido a esto en los sectores en los que existen sondeos a distancias de 500 mts, la malla es cuadrada con $AX = AY = 500$ mts, a medida que la información va siendo más escasa el tamaño de las celdas va aumentando, tanto en dirección N-S como en E-W, con factor 1'5.

Las condiciones de contorno de la zona modelada ya han sido comentadas en el apartado 4.1.

4.3. OPCIONES DE SIMULACION UTILIZADAS.

El acuífero se considera en parte libre y - en parte confinado de acuerdo con la estructura geológica que se ha señalado anteriormente.

En la zona donde es libre la transmisividad es función lineal del espesor saturado ($T = k.b$) a lo largo del tiempo de simulación.

Dado que la capa semiconfinante se acuña suavemente sobre el acuífero, existe la posibilidad de que - en un momento dado (por ejemplo debido a un bombeo) el nivel piezométrico del acuífero se sitúe por debajo de su techo. Por esto en toda la zona de semiconfinamiento se ha supuesto la opción del paso de acuífero semiconfinado a - libre (o viceversa); esta condición implica el cambio automático del valor del coeficiente de almacenamiento: para cada paso de tiempo en la simulación, el programa chequea la situación del nivel piezométrico con respecto al techo del acuífero, y utiliza en el cálculo el coeficiente de almacenamiento de acuífero confinado o libre según esté por encima o por debajo del mencionado techo del - - acuífero.

El modelo permite también simular las pérdidas de agua por evapotranspiraciones tanto en la zona libre como en la semiconfinada y la descarga del acuífero , en la zona libre, hacia ríos o manantiales.

La evapotranspiración es función lineal de la profundidad del nivel de saturación: es constante y --

con un valor máximo cuando la zona saturada iguale o supere el nivel del terreno (zonas encharcadas), y cesa cuando la zona saturada se encuentre 2 mts por debajo del terreno. Se ha supuesto, también, que en algunas áreas la evapotranspiración es constante a lo largo del tiempo y con un valor determinado, estas áreas se corresponden en bosques de vegetación con raíces profundas por ejemplo -- del tipo eucaliptus.

La descarga por ríos y manantiales es también una función lineal de la diferencia entre el nivel del agua en la celda considerada, y el nivel del agua en el río, o la cota del manantial.

En la zona semiconfinada la transmisividad es también variable en el espacio en función del valor de la permeabilidad y del de la potencia del acuífero.

El lecho semiconfinante es de espesor variable, su permeabilidad vertical se ha estimado en un orden de $3 \cdot 10^{-8}$ m/seg, y se supone que también es capaz de almacenar agua. Se ha ensayado un valor de coeficiente de almacenamiento específico del orden de 10^{-6} m^{-1} . El flujo horizontal en este nivel se supone despreciable, y el nivel de saturación constante a lo largo del tiempo y prácticamente igual a la cota topográfica en cada punto.

A tenor de los resultados de los análisis químicos se considera la existencia de una zona con agua salada dentro del acuífero confinado con su correspondiente interfase.

Esta interfase se ha simulado en planta como una línea teórica definida en base a los datos químicos. El modelo permite analizar la velocidad de desplazamiento de esta línea tanto en régimen permanente como cuando se simulan bombeos.

Los análisis químicos muestran que la interfase es muy tendida, casi horizontal, debido a esto no existe inconveniente para tratar el problema bidimensionalmente.

En la zona del acuífero y del acuitardo en donde el agua es salada se ha supuesto, en el modelo, que los niveles están un poco más altos que la realidad para tratar de corregir el efecto de la mayor densidad del agua salada.

4.4. PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS.

Para el funcionamiento del modelo hay que definir en las celdas que constituyen la malla con la que se ha discretizado el medio físico los siguientes parámetros:

- Nivel (freático o piezométrico) inicial - (en todas las celdas).
- Permeabilidad (en todas las celdas).
- Porosidad eficaz (en la zona de acuífero libre). Este parámetro hay que definirlo también en la zona donde es posible el paso de acuífero confinado a libre o viceversa.

- Coeficiente de almacenamiento (en la zona de acuífero confinado).
- Coeficiente de almacenamiento específico (en las celdas que definen el lecho semiconfinante).
- Cota del terreno (en las celdas donde -- existe evapotranspiración).
- Cota del techo del acuífero (celdas de -- acuífero confinado).
- Cotas del muro del acuífero (en todas las celdas).
- Permeabilidad vertical (celdas que defi-- nen el lecho semiconfinante).
- Espesor del lecho semiconfinante (en las celdas que definen la capa semiconfinante del acuífero, y en las que tienen condi-- ción de río o manantial).
- Caudal máximo de evapotranspiración y/o - surgencia (celdas con condición de evapo- transpiración, y con río o manantial).
- Recarga (en las celdas donde existe este parámetro).

- Extracciones (en las celdas donde hay explotación).

Pasaremos a continuación a comentar los valores asignados a estos parámetros en el modelo realizado.

En los anexos 3 y 4 se pueden ver en detalle los valores asignados a cada uno de los nudos de la malla tanto para régimen permanente, como para las hipótesis de explotación realizadas.

4.4.1. Niveles iniciales

Se dispone de la piezometría regional del acuífero a escala 1:100.000 realizada por el IGME en 1982 plano nº 5, En ella se observa una zona con gradiente piezométrico muy pequeño coincidente con las marismas del Guadalquivir. En el resto del acuífero la piezometría es muy similar a la topografía estando en grandes zonas de éste el nivel saturado a unos pocos decímetros de profundidad bajo el terreno.

Los valores asignados a los nudos de la malla se han deducido del plano nº 5, que a su vez ha servido para calibrar el modelo en régimen permanente.

4.4.2. Parámetros hidráulicos.

Los valores que a continuación comentamos están de acuerdo con los obtenidos en ensayos de bombeos y otros métodos de campo tales como aforos directos escal-

nados, pruebas de permeabilidad en piezómetros, etc, reflejados en el Estudio Hidrogeológico actualizado del sistema acuífero número 27: unidad Almonte-Marismas (IGME, 1982).

La porosidad eficaz se ha supuesto del orden del 3% en la zona donde el acuífero es libre, y para el acuífero confinado se ha supuesto un coeficiente de almacenamiento de 10^{-4} ; caso de pasar a libre este coeficiente de almacenamiento sería sustituido por la porosidad eficaz.

La transmisividad del acuífero, en cada momento, es el producto de la permeabilidad por el espesor saturado, de tal manera que en la zona donde el acuífero es libre es función del espacio y del tiempo, mientras que cuando el acuífero está semiconfinado la transmisividad es función del espacio; en caso de paso del acuífero semiconfinado a libre pasaría a ser función del espacio y del tiempo.

La permeabilidad, plano 6, es menor en la zona libre con valores del orden de 10^{-5} m/seg o inferiores, aumentando en la zona confinada hasta valores del orden de 10^{-4} - 10^{-3} m/seg, existiendo un máximo en los alrededores del sector I (Planos 6 y 7).

El espesor saturado del acuífero se ha obtenido, para cada celda a partir de datos puntuales de sondeos, donde ha sido posible, y a partir de los planos del techo y muro del acuífero (planos 3 y 4) y del de --

isopiezas (plano 5) en el resto del acuífero. A grandes rasgos podemos decir que en la zona libre aumenta de N a S, alcanza unos 100 mts en el contacto con la zona confinada, y tiene un máximo de hasta 150 mts en la zona de la barra costera al S del Coto de Doñana.

En las celdas con condición de río o manantial se supone un lecho semiconfinante de un metro de espesor y de permeabilidad $3 \cdot 10^{-8}$ m/seg que regula la descarga del acuífero hacia el exterior.

Se ha supuesto condición de evapotranspiración en toda el área donde el acuífero es libre. En cada momento el valor de la evapotranspiración es función de la diferencia entre el nivel freático y la profundidad a la cual se supone que cesa este fenómeno; ésta última se ha supuesto, en cada celda a 2 m por debajo de la cota de la superficie del terreno, el caudal de evapotranspiración es máximo y constante si el nivel freático iguala o supera esta cota, y es cero cuando está 2 m o mas por debajo de ella:

En la zona donde el acuífero está semiconfinado, el espesor del lecho semiconfinante varía desde cero mts. en la zona del contacto acuífero libre-acuífero semiconfinado, y va aumentando progresivamente hasta alcanzar una potencia de unos 100 mts en el E y SE de la zona modelada. Su permeabilidad vertical se ha supuesto de $3 \cdot 10^{-8}$ m/seg y su coeficiente de almacenamiento específico de 10^{-6} m^{-1} como ya se expuso anteriormente.

4.4.3. Cotas del techo y muro del acuífero.

Han sido deducidas a partir de las columnas litológicas de los numeros sondeos perforados en el acuífero.

El techo del acuífero coincide con la cota topográfica en la zona de acuífero libre, y está entorno a los 100 mts de profundidad en el borde E-SE de la zona modelada (Plano 4).

El muro del acuífero se ha supuesto que es el contacto entre el acuífero y las margas azules del Mioceno superior-Plioceno inferior. Tiene una cota máxima -- por encima del nivel del mar hacia el N de la zona libre, mientras que hacia el S se sitúa entorno a los 200 mts bajo el nivel del mar (Plano 3).

4.4.4. Cotas del terreno.

Para obtenerlas se dispuso de mapas topográficos escala 1:50.000 publicados por el Instituto Geográfico y Catastral.

Asimismo se realizó una campaña de nivelación de todos los sondeos de las zonas regables por el -- IRYDA que sirvió para asignar a las celdas del modelo correspondientes el valor preciso de su cota topográfica.

En las celdas de tamaño grande se asignó como cota del terreno en ellas la cota topográfica media y

no la del punto central de la celda.

4.4.5. Recarga.

Según datos del Estudio Hidrogeológico actualizado del sistema acuífero nº 27: unidad Almonte-Marismas (IGME, 1982) puede estimarse una lluvia útil media de unos 170 mm/año.

Para régimen permanente se ha supuesto que - en la zona costera de dunas se infiltra el 100% de la lluvia útil, mientras que en la zona de marismas (acuífero se miconfinado) la infiltración es nula.

En el resto del acuífero, un balance entre - evapotranspiración, escorrentía superficial, lluvia útil , e infiltración eficaz, nos ha dado para esta última un valor que oscila entorno al 25% de la lluvia útil.

En régimen transitorio se ha supuesto una re carga adicional en las zonas regadas del 20% del agua destinada a tal fin.

4.4.6. Datos de explotación y evolución de niveles piezométricos.

La explotación actual del acuífero es para - abastecimiento a núcleos urbanos, y con fines agrícolas.

Los bombeos para abastecimiento comportan ac tualmente alrededor de 5 Hm³/año, en el modelo se supone - que la distribución de este volumen de agua es uniforme a lo largo del año.

Las extracciones de agua para regadío suponen en la actualidad del orden de $33 \text{ Hm}^3/\text{año}$ bombeados entre los meses de Abril a Octubre. Las zonas regadas se pueden ver en el plano 8.

Las máximas extracciones se realizan en los meses de Julio y Agosto representando del orden del 50% - del volumen total de agua proporcionada por el acuífero - a lo largo del año.

En los próximos años se piensa poner en regadío nuevas zonas, plano 15, lo que supondría una extracción de agua subterránea con este fin de $22 \text{ Hm}^3/\text{año}$ a sumar a los que actualmente se extraen.

Tanto el IGME como el IRYDA han mantenido - redes de control piezométrico periódico durante los últimos años. El primero ha abarcado todo el acuífero y el segundo se ha limitado fundamentalmente al área próxima a - los sectores de futura transformación en regadío. De estas redes se seleccionaron 39 piezómetros para el calado del modelo (plano 9).

Se observan pequeñas e irregulares variaciones en el nivel de los piezómetros situados lejos de las zonas de explotación, mientras que en los situados cerca de éstas zonas el nivel baja bruscamente en el verano y - se recupera generalmente en el invierno como corresponde al sistema actual de explotación del acuífero.

Tan sólo se observan tendencias al descenso en piezómetros situados en la zona Norte del sector II --

(plano 10). Las evoluciones de estos piezómetros serán -- más extensamente comentadas junto con las evoluciones simuladas en el apartado correspondiente a la calibración - del modelo en régimen transitorio.

5.- CALIBRACION DEL MODELO

5.- CALIBRACION DEL MODELO

Esta etapa del trabajo tiene por objeto el reajuste de los datos de partida conocidos con menor precisión con el fin de adecuarlos a los resultados experimentales.

El modelo se calibró primero en régimen -- permanente y posteriormente en régimen transitorio.

En la primera etapa se simuló con un valor medio para la recarga anual un periodo de 15.000 años su ficiente para alcanzar el régimen permanente. El elemento de calibración utilizado fue el plano de isopiezas ex perimentales realizado por el IGME (plano 5).

En la segunda etapa se simuló, mes a mes , el año hidrológico natural 1976-1977 con recargas y ex-- tracciones reales partiendo de la piezometría en régimen permanente, utilizándose para calibrar el modelo las evo luciones piezométricas medidas en los puntos de con- - trol reseñadas en el apartado 4.4.6.

Pasamos a continuación a comentar, para es tas dos etapas, las modificaciones realizadas en los datos de partida. En ambas etapas se respetaron siempre -- los valores de los parámetros obtenidos experimentalmente, variándose exclusivamente el valor de los parámetros supuestos o extrapolados.

a) Régimen permanente.-

En esta etapa se modificaron permeabilidades en las zonas extrapoladas, permeabilidades verticales en los lechos semiconfinantes, recargas a partir del agua de lluvia y áreas de evapotranspiración.

El valor de la permeabilidad tuvo que aumentarse en la parte N del acuífero donde posiblemente se hubiera infraestimado. La transmisividad media final, para esta zona quedó del orden de $10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$.

La permeabilidad vertical de los lechos semiconfinantes, estimada en principio en 10^{-7} m/seg , se redujo hasta 3.10^{-8} m/seg quedando este valor como definitivo.

En un principio se supuso que la evapotranspiración se efectuaba principalmente por las zonas topográficamente más deprimidas, posteriormente se puso condición de evapotranspiración a toda la superficie del acuífero libre, y es un resultado del modelo tanto las áreas donde la evapotranspiración se produce como el valor de ésta.

Asimismo se supuso un caudal constante de evapotranspiración a lo largo del año en las zonas de bosque de eucaliptus.

El plano 11 muestra la piezometría del acuífero, en régimen permanente proporcionada por el modelo ,

existiendo una buena concordancia con la obtenida a partir de los datos de campo (plano 5).

b) Régimen transitorio.-

En esta etapa se procedió al reajuste de los datos de porosidad eficaz y coeficiente de almacenamiento.

La porosidad eficaz, estimada en principio en un 3%, en la zona libre, hubo de modificarse ligeramente, los valores finales (plano 12) oscilan entre el 2% y el 5%.

El almacenamiento específico del lecho semi confinante, en la zona de Marismas, quedó en 10^{-6} m^{-1} , y el coeficiente de almacenamiento del acuífero en la zona semiconfinada en 10^{-4} .

Para la calibración en régimen transitorio se escogió el año hidrológico 1976-77 mes a mes con las explotaciones existentes en ese año (plano 8).

En el plano 9 se pueden observar las evoluciones reales y simuladas en los 39 piezómetros controlados comprobándose un grado de aproximación suficiente en la gran mayoría de los casos.

Las pequeñas diferencias existentes pueden ser debidas por un lado a errores en la cuantificación y distribución espacial de las extracciones, y por otro a -

que el ordenador da como nivel el medio para toda la celda, mientras que las medidas de campo son puntuales.

En nuestra opinión las diferencias apreciables observadas en el piezómetro S-IV-6-4 son debidas a una explotación existente en ese punto o en sus proximidades que no ha sido tomada en cuenta al hacer el inventario de campo, puesto que parece exagerada una oscilación del nivel piezométrico en ese punto de 6 mts debida exclusivamente a las variaciones climatológicas estacionales, hecho que no ocurre en ningun otro punto del acuífero.

6.- COMPORTAMIENTO DEL ACUIFERO SEGUN EL MODELO REALIZADO

6.- COMPORTAMIENTO DEL ACUIFERO SEGUN EL MODELO REALIZADO.

Una vez calibrado el modelo se procedió a analizar el comportamiento del acuífero a partir de él, tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.

6.1. COMPORTAMIENTO DEL ACUIFERO EN REGIMEN PERMANENTE.

En la zona de acuífero libre, el límite superior de la zona saturada se adapta con fidelidad a la superficie topográfica produciéndose la descarga del acuífero hacia el mar y hacia los cauces de la red fluvial -- existente.

Existe también una circulación de agua subterránea de la zona libre hacia la zona confinada incluso en la zona Sur del acuífero en los alrededores de la desembocadura del río Guadalquivir.

El gradiente en la zona de interfase agua dulce-agua salada dentro del acuífero confinado es pequeño, del orden de 10 cm por cada 4 km; este hecho condiciona un flujo muy lento con un desplazamiento de la interfase del orden de 5 m/año hacia el E.

La infiltración es del orden de $200 \text{ Hm}^3/\text{año}$, de ellos $38 \text{ Hm}^3/\text{año}$ va al mar por escorrentía subterránea, alrededor de $15 \text{ Hm}^3/\text{año}$ pasan a la zona confinada, el resto se pierde por evapotranspiración o se descarga por arroyos y manantiales.

La mayor parte del caudal circulante hacia la zona confinada se pierde por evapotranspiración en el contacto zona libre-zona confinada; para ilustrar este hecho, en el plano 13 se han representado tres secciones paralelas al mencionado contacto.

Por la primera de ellas (la más al W y todavía en zona libre) circulan $18 \text{ Hm}^3/\text{año}$ hacia la zona confinada; por la segunda (que representa el contacto) circulan hacia la zona confinada $15 \text{ Hm}^3/\text{año}$, este hecho representa que se han perdido por evapotranspiración $3 \text{ Hm}^3/\text{año}$ del caudal subterráneo circulante además de toda la infiltración debida a la precipitación en el área comprendida entre las secciones mencionadas en total entorno a $20 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Por último, por la tercera línea (más hacia el E y ya en la zona confinada próxima al contacto) circulan sólo $3 \text{ Hm}^3/\text{año}$, lo que implica un flujo ascendente de descarga entre esta línea y el contacto de unos $12 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

6.2. COMPORTAMIENTO DEL ACUIFERO EN REGIMEN TRANSITORIO.

Para el análisis del comportamiento del acuífero en régimen transitorio se han realizado varias hipótesis de explotación.

En la primera de ellas se simularon durante un año, mes a mes las condiciones de explotación actuales.

La recarga por retorno de riegos se estima en un 20% del caudal regado.

Dado que la distribución espacial de extracciones y riegos es la misma, el único efecto a considerar es la disminución de las explotaciones en un 20%.

El efecto de los bombeos a corto plazo puede observarse en el plano nº 14 de isodescensos en el verano con las explotaciones actuales. Se observan en él -- conos de bombeo de diversa forma y tamaño.

En las zonas de cultivos de fresas se observan depresiones de hasta 8 m. Dado que las extracciones -- están muy dispersas, la depresión es muy uniforme en las zonas de explotación. Debido a la pequeña transmisividad del acuífero, la depresión disminuye rápidamente al alejarse de las celdas donde están ubicados los pozos de bombeo.

Depresiones importantes se observan también en el sector II. Al Norte del Rocío existe una zona deprimida con descensos mayores de 5 m, producida por las explotaciones del subsector II-10 y de Meneu-Export.

Se observa que el cono producido por estos bombeos es profundo y no se desplaza aguas arriba de la zona de explotación debido a la menor transmisividad de esa zona.

Al Sur del Rocío también aparecen depresiones mayores de 5 m en los alrededores de los Mimbrales.

En esta zona el cono producido es más extenso y menos profundo que en la anterior alcanzándose los 5 m de depresión debido a que las extracciones son mayores. El cono de bombeo se extiende principalmente hacia el Sur, donde el acuífero aumenta su espesor saturado y por tanto su transmisividad.

Se observan también depresiones en el sector I y en las explotaciones para el Parque Nacional de Doñana. En estos casos debido a la mayor transmisividad del acuífero los conos producidos ocupan grandes extensiones en la horizontal y son menos profundos.

En el plano nº 10 están representados los descensos al cabo de un año de explotación, es decir, los descensos que no serán recuperados en el invierno siguiente.

Se observan descensos no recuperados en la zona de explotación concentrada del área de Palos de Moguer, dedicada mayormente a cultivos de fresas (donde éstos llegan a superar los 5 m). Se comprende lo que ya habíamos apuntado de que no es posible mantener una explotación intensiva durante largo tiempo en esta zona del acuífero puesto que se están consumiendo reservas de éste.

También hay descensos no recuperados en el sector II al Norte del Rocío, con un máximo de 5 m provo-

cado por las extracciones para el abastecimiento de Almonte y Bollullos.

Sobre el efecto a largo plazo de los bombeos veremos después que las explotaciones previstas para un futuro cercano en la zona de explotación concentrada del área de Palos de Moguer y en el sector II al Norte del Rocío agotarán el acuífero en esas zonas en un futuro más o menos próximo.

A este respecto hemos de concluir que aunque los recursos del acuífero son grandes (estimamos los recursos útiles en $150 \text{ Hm}^3/\text{año}$) la parte de éstos correspondiente a la zona poco transmisiva del acuífero sólo puede ser explotada por bombeos dispersos, manteniendo en cada zona positivo el balance infiltraciones menos extracciones. De un modo orientativo en estas áreas se aconseja no poner en regadío con aguas subterráneas más del 20-25% de la superficie.

Para ilustrar este hecho vamos a realizar un sencillo cálculo del caudal de agua que pasa a través de una línea Este-Oeste a la altura de Almonte hacia las zonas de sondeos de los sectores I y II.

La permeabilidad media es de unos 10^{-5} m/s, el espesor saturado son unos 30 m, el gradiente hidráulico medio un 1% y la longitud de la sección son unos 40 km. Con estos datos el caudal que atraviesa dicha sección vale unos $4 \text{ Hm}^3/\text{año}$ frente a los $23 \text{ Hm}^3/\text{año}$ de infiltración eficaz aguas arriba de esa línea.

Posteriormente se realizó una segunda simulación incluyendo todas las explotaciones previstas para 1984 (plano 15).

En esta simulación se mostró la existencia de problemas serios en el abastecimiento de Almonte y Rociñana antes de cumplirse el primer año de simulación, secándose los pozos destinados al abastecimiento, ubicados en la celda 19-33.

Se efectuó una nueva pasada del modelo eliminando el abastecimiento anterior, y pudo observarse que en las zonas de explotación concentrada del área de Palos de Moguer (ver plano 15) se planteaban problemas semejantes al anterior al cabo de poco más de un año de simulación. Dado que las extracciones de agua subterránea supuestas en este área coinciden sensiblemente con las existentes en la actualidad se ha podido comprobar que los problemas manifestados por el modelo existen en realidad, y que en esa zona actualmente se está extrayendo un volumen de agua superior a los recursos renovables del acuífero.

Se dió una cuarta pasada al modelo eliminando las extracciones para cultivos de fresas y se secaba el nudo 21-35 antes de los dos años de explotación. Este nudo se encuentra en el centro de los subsectores II-9, II-10 y II-11. Aunque este nudo tiene un espesor saturado menor que los adyacentes debido a que el muro del acuífero se encuentra a menor profundidad, se comprende que al poner en producción los subsectores II-9 y II-11 el descenso de los niveles de la zona hará disminuir sensiblemente la productividad de los pozos situados en el centro.

En la quinta simulación se aumentó artificialmente la permeabilidad del acuífero en las zonas de explotación concentrada del área de Palos de Moguer y se incluyeron las explotaciones en esta zona, eliminándose por el contrario las explotaciones del subsector II-9. Al cabo de unos cuatro años de simulación volvían a aparecer problemas de falta de agua en la zona de Palos de Moguer.

De estas cinco primeras simulaciones se concluye que el acuífero no puede aportar los caudales que se pretende extraer de la zona de Palos de Moguer y en los subsectores II-9, II-10 y II-11.

En una última simulación se eliminaron las extracciones de la zona de Palos de Moguer y las de los subsectores II-9 y II-11 para estudiar así el comportamiento a largo plazo con las explotaciones restantes. Al cabo de 40 años de explotación el acuífero está prácticamente en régimen permanente, como se aprecia en las figuras 1 a 5 en las que se pueden observar las evoluciones de los niveles piezométricos durante los 40 años en cinco nudos representativos de las zonas de explotación.

En el plano nº 11 se pueden ver las isopiezas e isodescensos al cabo de los 40 años. Se observa que las isopiezas están muy deformadas respecto de la piezometría en permante, habiéndose producido conos de depresión en las zonas explotadas. En especial estos conos son muy profundos en la zona Norte del sector II, descendiendo la piezometría por debajo de los cinco metros en el subsector II-10 y en Meneu Export. En esta última zona la piezometría llega a estar por debajo del nivel del mar.

En el mapa de isodescensos se pueden observar mejor los conos de bombeo producidos. Se observa que mientras éstos son muy estrechos y profundos en la zona Norte del sector II, con descensos mayores de 10 m, son anchos y poco profundos en la zona Sur de este sector y en el sector I, con descensos máximos de unos 5 m, debido a la mayor transmisividad del acuífero.

En base a los resultados de estas simulaciones se realizó un balance del funcionamiento del acuífero con unas condiciones de explotación semejantes a las actuales, los resultados se dan en el cuadro 1.

CUADRO 1

LLUVIA UTIL	250	Hm ³ /año	
BOMBEO	54	"	
RETORNOS POR REGADIO	10	"	
SALIDAS AL MAR	38	"	
EVAPOTRANSPIRACION	73	"	(*)
DRENAJE POR RIOS	30	"	
PASO A MARISMAS	15	"	
ESCORRENTIA SUPERFICIAL	50	"	

(*) De estos 73 Hm³/año, 48 Hm³/año corresponden a la evapotranspiración que se produce en las zonas de bosque con vegetación de raíces profundas tipo eucaliptus.

Estudie^{mos} ahora el efecto de los bombeos sobre el caudal aportado por el acuífero libre al confinado. Para ello recordemos en primer lugar el plano nº 13 -

en el que están representadas tres secciones paralelas al contacto acuífero libre-confinado.

Recordemos que en régimen permanente $15 \text{ Hm}^3/\text{año}$ atraviesan la línea divisoria entre una y otra parte del acuífero y tan sólo $3 \text{ Hm}^3/\text{año}$ lo hacen por la línea interior.

Durante el verano, debido a la existencia de bombes en la zona confinada, pasan a la zona en carga del acuífero $16/12 \text{ Hm}^3/\text{mes}$; es decir, un caudal superior al que pasa durante el invierno (que es aproximadamente asimilable al de régimen permanente). Sin embargo, por la línea interior el flujo se invierte y el caudal saliente vale $-2'5/12 \text{ Hm}^3/\text{mes}$. Al alcanzarse el régimen permanente tras los 40 años de simulación pasan $12 \text{ hm}^3/\text{año}$ al acuífero de carga y $1,5 \text{ hm}^3/\text{año}$ lo hacen por la línea interior.

El efecto de las explotaciones en el acuífero será pues la disminución del volumen de agua evaporado en la zona libre cerca del contacto con el acuífero en carga y en menor medida se disminuirá el paso del agua subterránea entre una y otra zona.

La velocidad del agua en la interfase, que en régimen permanente era de 5 m/año aproximadamente se invierte en algunas zonas durante el verano alcanzándose velocidades máximas de entre 1 y 2 m/mes .

Al cabo de 40 años de simulación la velocidad en la interfase llega a ser de unos $20-30 \text{ m/año}$ como término medio hacia las zonas de sondeos; pero la interfase sólo llegará a afectar en un futuro a los sondeos si--

tuados dentro de la zona confinada, pues debido a la recarga proveniente de la parte superior del acuífero el flujo se invierte cerca del contacto zona libre-zona confinada, como puede apreciarse en el plano nº 16. Tan sólo es de temer la salinización del agua de estos sondeos producida por la formación de conos salinos bajo los sondeos en explotación (up conning).

En cuanto a los descensos de la presión en el acuífero confinado, éstos son del orden de 0,5 m como valor medio al cabo de 40 años de explotación (véase plano 16). Ello disminuirá la percolación vertical en la zona confinada e incluso puede llegar a anularla invirtiéndose el sentido de circulación al Sur del sector I.

7.- ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DEL COMPORTAMIENTO
HIDRODINAMICO DEL ACUIFERO

7.- ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DEL ACUIFERO.

Sería erróneo considerar el acuífero como un todo-uno homogéneo. A partir de los resultados del modelo matemático dividimos el acuífero en cinco zonas de diferente comportamiento hidrodinámico (Fig. 9).

La primera es la zona libre de pequeña transmisividad, que comprende la parte Norte del acuífero con transmisividades del orden de 10^{-4} m²/s o menores y que comprende desde la línea Palos de la Frontera-Los Cabezudos-Villamanrique de la Condesa hacia el Norte.

En ella la pequeña transmisividad del acuífero hace que el flujo de agua subterránea esté muy condicionado por el relieve topográfico. Se producen muy pequeños cambios en la piezometría con un aumento o disminución de las infiltraciones y no es posible extraer por sondeos grandes caudales de agua, durante periodos prolongados de tiempo. El flujo de agua subterránea desde esta zona hacia el Sur es pequeño en comparación con sus recursos; la explotación más racional de esta zona, a nuestro juicio, sería con captaciones dispersas en el espacio, y de pequeño caudal de extracción, puesto que los conos de bombeo son profundos y de poca extensión en la horizontal.

La segunda zona es la barra costera con transmisividad intermedia, que comprende la parte del acuífero libre comprendido entre la línea Palos de la Frontera- Los Cabezudos y la línea de costa, extendiéndose por

la costa hasta llegar a la urbanización de Matalascañas. En esta zona la transmisividad está comprendida entre valores de 10^{-3} y 10^{-4} m^2/s .

En este área existe una mayor infiltración por agua de lluvia debido a la existencia de grandes zonas de dunas sin vegetación. Debido a ello la piezometría refleja muy fielmente el relieve topográfico. Gran parte de los recursos subterráneos de esta zona van a parar al mar, gracias a lo cual no hay problemas de intrusión marina en el acuífero. Gracias a la mayor transmisividad es posible la extracción de mayores caudales de -- agua por bombeo en pozos o sondeos.

La tercera zona es la parte del acuífero - libre que bordea el contacto con el acuífero en carga. - En esta zona, que comprende parte del sector I, el sec--tor II y el cordón litoral situado al Sur del coto de Doña, las transmisividades varían entre 10^{-3} - 10^{-4} y -- 3×10^{-2} m^2/s . Se trata, debido a ello, de la parte con mayores posibilidades de explotación.

El flujo en ella es hacia las Marismas salvo en el cordón litoral donde hay una divisoria de aguas subterráneas y una parte no despreciable de agua subte--rránea va a parar al mar.

Los recursos de esta zona, que suman las - aportaciones de las dos anteriores más las infiltracio--nes directas de agua de lluvia es en parte extraído para explotaciones agrícolas y otra parte circula hacia el -- contacto con la zona confinada.

De este último caudal la mayor parte es drenada o evaporada en la zona libre justo antes del contacto con el acuífero en carga, y sólo una pequeña parte, estimada en $15 \text{ Hm}^3/\text{año}$ pasa realmente a la zona confinada.

Al aumentarse o disminuirse los caudales -- bombeados en esta parte del acuífero se disminuyen o aumentan las cantidades evaporadas o drenadas en el acuífero libre cerca de la zona confinada y se afecta en mucho menor medida al caudal que alimenta el acuífero en carga.

En el acuífero cautivo se distinguen dos zonas debido a la existencia de una interfase salina. En todo él el aumento del espesor del terreno permeable conduce a unas transmisividades del orden de $3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{seg}$ e incluso mayores.

Sobre él existe un lecho semipermeable con una permeabilidad vertical de $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ en el que existe agua salada con concentraciones mayores de sal según nos desplazamos hacia la interfase agua dulce-agua salada, desde donde el agua del semipermeable ya es completamente salada.

El acuífero cautivo es surgente, de donde se deduce una percolación vertical de agua a través del semiconfinante que en volumen será igual a las aportaciones desde la zona libre.

El espesor del lecho semipermeable es mínimo en el borde y aumenta al acercarnos al centro de la cuenca.

Debido a esto la mayor parte de los recursos del acuífero en carga se drenan en la parte cercana al contacto con el acuífero libre.

Hay dos efectos que se suman y vienen a ha--cer mayor este fenómeno.

- En la parte salada del acuífero en carga la mayor densidad del agua provoca una disminución del gradiente hidráulico ascendente que reduce o incluso anula la percolación vertical en función de pequeñas variaciones en la topo--grafía.
- Los lentejones de agua salada en el semiconfinante situado por encima del acuífero provocan debido a su mayor --densidad un efecto similar disminuyendo de esta manera - el flujo ascendente de agua.

Al ser pequeño el flujo de agua dentro de la zona confinada la superficie piezométrica es muy tendida , con gradientes del orden del 1:10.000 e incluso menores. - Debido a ello también la interfase está prácticamente estática y su posición es subhorizontal.

En las figuras 6 y 7 se puede ver dos cor--tes del acuífero en zonas con abundancia de datos. Se ob--serva claramente la irregularidad del acuífero (nótese sin embargo que la escala vertical está muy ampliada) y el cambio del gradiente piezométrico al entrar en el acuífero en carga.

En la figura 8 se puede observar de un modo cualitativo y esquemático la posición de la interfase - - agua dulce-agua salada en un hipotético corte del acuífero. La forma convexa de la interfase es debida a la paulatina disminución del flujo.

8.- ALGUNAS RECOMENDACIONES PARA EL USO
FUTURO DEL MODELO

8.- ALGUNAS RECOMENDACIONES DE INTERES PARA EL USO FUTURO DEL MODELO.

El modelo matemático realizado es útil para la simulación de diversas alternativas de explotación en el acuífero de Almonte-Marismas y ha demostrado con la calibración ser un reflejo fiel de la realidad física de éste.

Si se usa el modelo para la simulación de nuevas hipótesis aconsejamos no modificar ninguna cifra hasta la línea número 2954 inclusive del listado de datos de entrada pues son los datos referentes a los parámetros hidrodinámicos del acuífero. Tan sólo se deben modificar las líneas 1 y 2 que corresponden al título de la simulación y el primer número de la línea 6 que representa el número de períodos de bombeo.

Estos parámetros del acuífero sólo habrán de ser modificados con la obtención de nuevos datos sobre las características del acuífero o en el caso de que se quiera hacer una simulación con unas condiciones iniciales diferentes; pero en cualquier caso aconsejamos hacer antes un detallado estudio del manual de usuario del programa de ordenador utilizado que figura en el anexo 2.

Los datos a partir de la línea 2955 en adelante son los correspondientes a las condiciones de explotación en los diversos períodos de bombeo que se pretende simular.

En la zona de agua salada hay que corregir la piezometría por efecto de la densidad del agua salada si se quiere medir el nivel del agua en el pozo.

Si C es la concentración en gramos/litro - de soluto, el nivel real será $H' = 1000/(1000+C) \cdot H$, tomando como origen de las alturas el centro de la capa acuífera. Si en el pozo va haber agua dulce, no es necesaria esta corrección.

9.- CONCLUSIONES

9.- CONCLUSIONES.

- 1) El modelo realizado reproduce fielmente el comportamiento del acuífero ante cualquier tipo de acción externa tanto en régimen permanente como en transitorio.
- 2) Desde el punto de vista hidrodinámico y a partir de los resultados del modelo se pueden distinguir, dentro del acuífero, cinco zonas de diferente comportamiento frente a la explotación del agua subterránea: (Fig. 9)
 - a) Primera zona.- Se caracteriza por ser la de transmisividad más baja del acuífero, los conos de bombeo son profundos y de escaso desarrollo en la horizontal, es decir los caudales específicos de los pozos son pequeños. La explotación de esta zona requiere captaciones dispersas en el espacio, y en cada zona en concreto el volumen de agua extraído no debe superar a los recursos renovables de ese lugar.

Según los resultados del modelo, los recursos renovables de esta zona sólo permitirían poner en regadío el 25% del área de la misma y en parcelas dispersas.

- b) La segunda zona la constituye la barra costera de --transmisividad entre 10^{-3} y 10^{-4} m^2/seg ; la infiltración es prácticamente el 100% de la lluvia útil; su mayor transmisividad permite explotaciones más concentradas con mayores caudales de extracción que en --

el caso anterior. como los terrenos no son muy aptos para el cultivo la mayor explotación de esta zona es con fines de abastecimiento urbano.

Gran parte de sus recursos de agua subterránea descargan al mar no existiendo en la actualidad problemas de intrusión marina.

- c) La tercera zona es la pared del acuífero libre que bordea el contacto con el acuífero en carga; es el área de transmisividad más alta y por tanto la de mayores posibilidades de explotación.

Los caudales bombeados en esta zona disminuyen las cantidades de agua evapotranspiradas en el acuífero libre en las proximidades del contacto con la zona confinada, no afectándole en gran medida el caudal que alimenta el acuífero en carga.

- d) La cuarta y quinta zonas están incluidas en el acuífero semiconfinado y están separadas entre sí por una interfase salina.

En este área el acuífero es surgente de donde se deduce una percolación vertical de agua a través del lecho semiconfinante que en volumen será igual a las aportaciones desde la zona libre. Esta descarga se produce fundamentalmente en las proximidades del contacto con el acuífero libre.

El gradiente hidráulico en el acuífero confinado es del orden del 1:10.000, debido a ello la interfase, en ausencia de explotaciones, está prácticamente estática y su posición es subhorizontal.

Aunque los parámetros hidrogeológicos indican que el acuífero en la parte confinada podría tener un alto rendimiento es aconsejable que su explotación esté controlada en todo momento por los fenómenos de intrusión salina que pueden inducirse y su repercusión en la salinización de los pozos y en -- las condiciones actuales del Coto de Doñana.

- 3) En régimen permanente, de los 200 Hm³ que anualmente se infiltran en el acuífero libre, 38 Hm³ descargan al mar, y 15 Hm³ pasan a la zona confinada; el resto constituye evapotranspiración y descarga por ríos y manantiales.
- 4) Con las explotaciones actuales y a corto o medio plazo el modelo pone en evidencia que en la zona de Palos de Moguer (al W de la zona modelada) se está consumiendo un volumen de agua superior a los recursos renovables del acuífero en ese área; la simulación realizada indica que en un plazo menor de dos años podrían agotarse las reservas del acuífero en algunos puntos de esa zona.
- 5) Con las explotaciones actuales se produciría, a medio plazo, un problema similar al anterior en los sondeos de abastecimiento a Almonte, Bollullos y Rociana.

- 6) Con las explotaciones previstas para 1984 el abastecimiento a estas poblaciones tendría graves problemas a muy corto plazo, extendiéndose estos mismos problemas a la parte central de la superficie ocupada por los subsectores II-9, II-10, y II-11.
- 7) En el sector I, dentro del acuífero confinado se preven problemas de salinización a medio plazo debido a la posible formación de conos de agua salada bajo las captaciones, y también al desplazamiento horizontal de la interfase provocado por los bombeos aunque este último a más largo plazo (unos 40 años).
- 8) La salinización afectará principalmente a los pozos perforados en el acuífero confinado, puesto que a pesar de los bombeos previstos, el flujo de agua dulce seguirá siendo de la zona libre hacia la zona en carga, no existiendo por tanto en el acuífero libre problemas de salinización.
- 9) En el resto de las explotaciones actuales o previstas para el futuro no se preven problemas especiales.
- 10) Las explotaciones previstas para un futuro disminuirán solamente en $3 \text{ Hm}^3/\text{año}$ el paso de agua subterránea de la zona libre a la zona confinada, el resto del volumen de agua extraído correspondería a una disminución de la evapotranspiración en el contacto entre ambas zonas.

Sin embargo la percolación vertical ascendente en el lecho semiconfinante se vería afectada, además

de en los 3 Hm³/año antes mencionados, en el volumen de agua extraído por los pozos perforados en el acuífero - en carga (9 Hm³/año) invirtiéndose en los alrededores - de las zonas en explotación el sentido del flujo del -- agua a través del lecho semiconfinante. A 5 km del contacto zona libre-zona en carga el flujo de agua dulce - se reduce de 3 a 1,5 hm³/año.

- 11) La disminución de la presión del agua en el acuífero - en carga en el Parque Nacional de Doñana, con las explotaciones previstas, alcanzará máximos de 1 m y será producida por las explotaciones ubicadas en esa zona, siendo mucho menor el efecto producido por las explotaciones agrarias de los sectores en producción.

10.- BIBLIOGRAFIA

10.- BIBLIOGRAFIA.

Anteproyecto de transformación en regadío de la zona de Almonte - Marismas. FAO -- (1.972).

Juan Corominas , Miguel Angel Sacristán, José Garrido. In forma final de los sondeos de la zona regable de Almonte - Marismas y síntesis - hidrogeológica. IRYDA (1.976).

Juan Corominas Masip. Informe sobre el control y vigilancia del acuífero "Almonte - Marismas" -- durante los años 1.975 a 1.977. IRYDA -- (1.978).

Loïc Menanteau . Les marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du Quaternaire récent. Université de Paris - Sorbonne (1.980).

Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia. CEDEX (1.981).

Informe hidrogeológico y de recursos hídricos, desagües y vertidos, y posibles incidencia de los mismos en el Parque Nacional de Doñana. MOPU (1.981).

Estudio hidrogeológico actualizado del -
sistema acuífero nº 27: unidad Almonte -
Marismas. IGME (1.982).

Trescott, Prinder, Larson. Finite difference model
for simulation of ground - water flow in
two dimensions. U.S. Geological Survey -
(1.976).

Modelo matemático de la zona de Almonte -
Marismas. IGME (1.975).

Segundo informe sobre el modelo matemático
de los acuíferos de Almonte - Maris -
mas. Sección de Aguas Subterráneas del -
IRYDA (Noviembre 1.976).

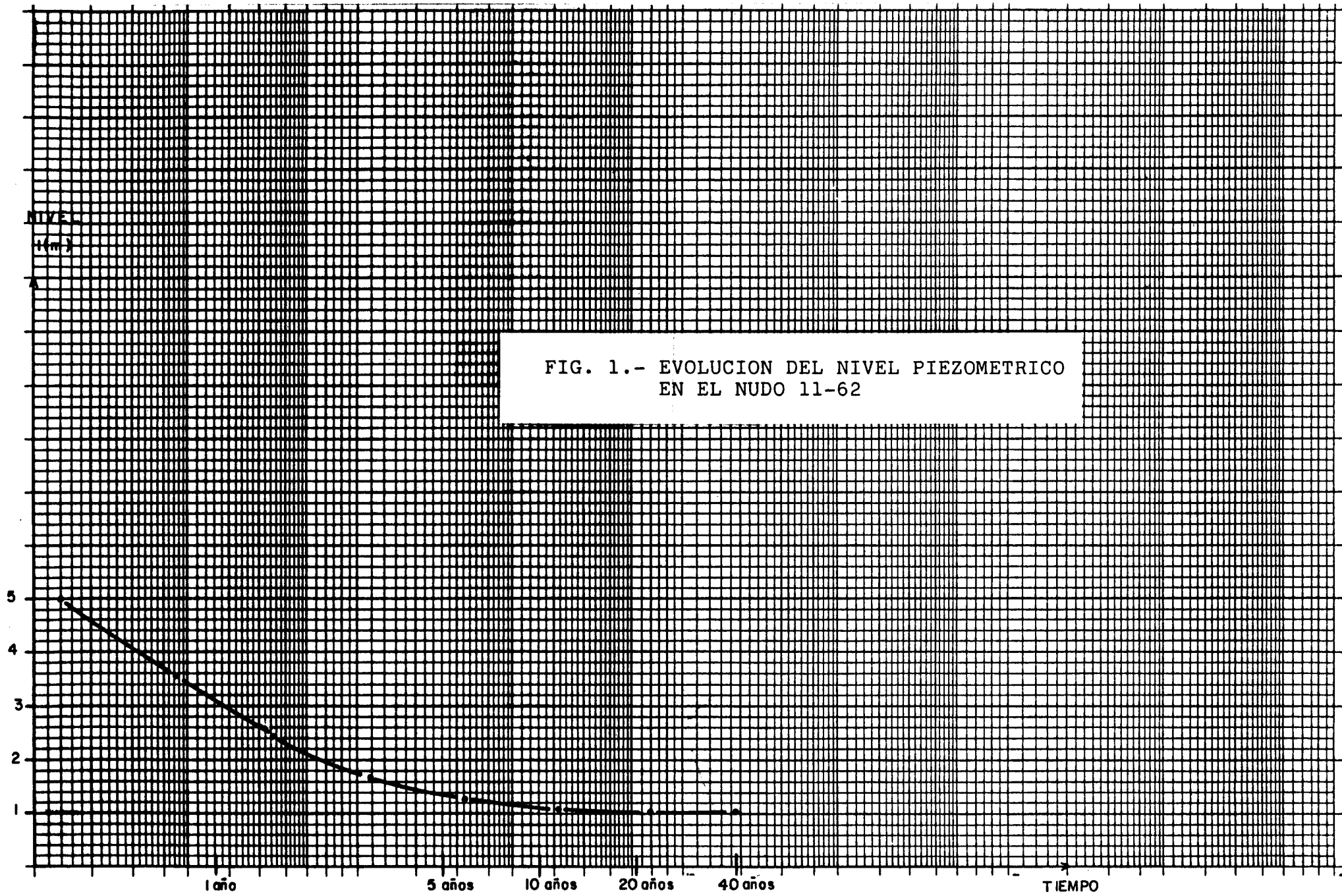


FIG. 1.- EVOLUCION DEL NIVEL PIEZOMETRICO EN EL NUDO 11-62

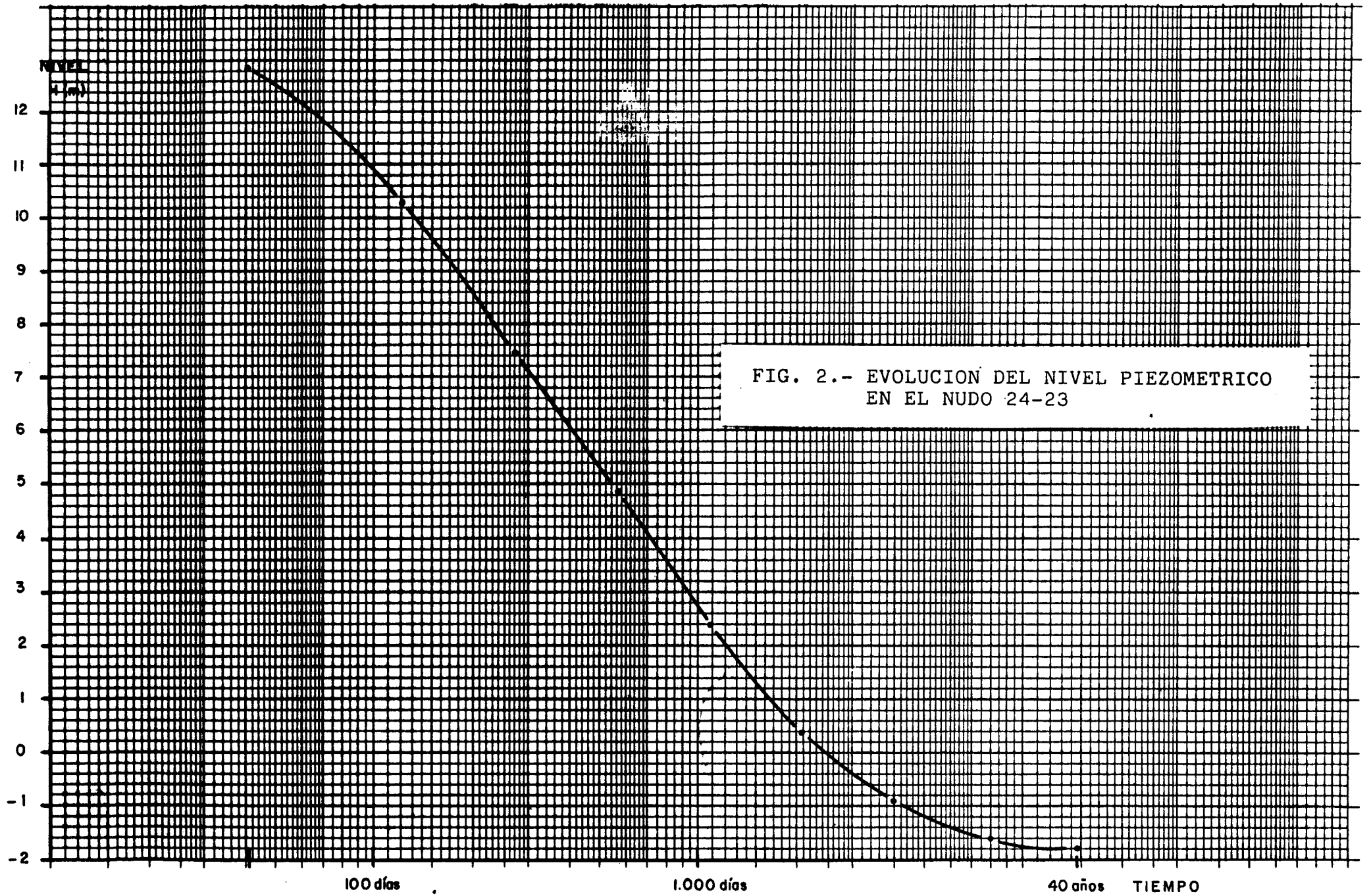


FIG. 2.- EVOLUCION DEL NIVEL PIEZOMETRICO EN EL NUDO 24-23

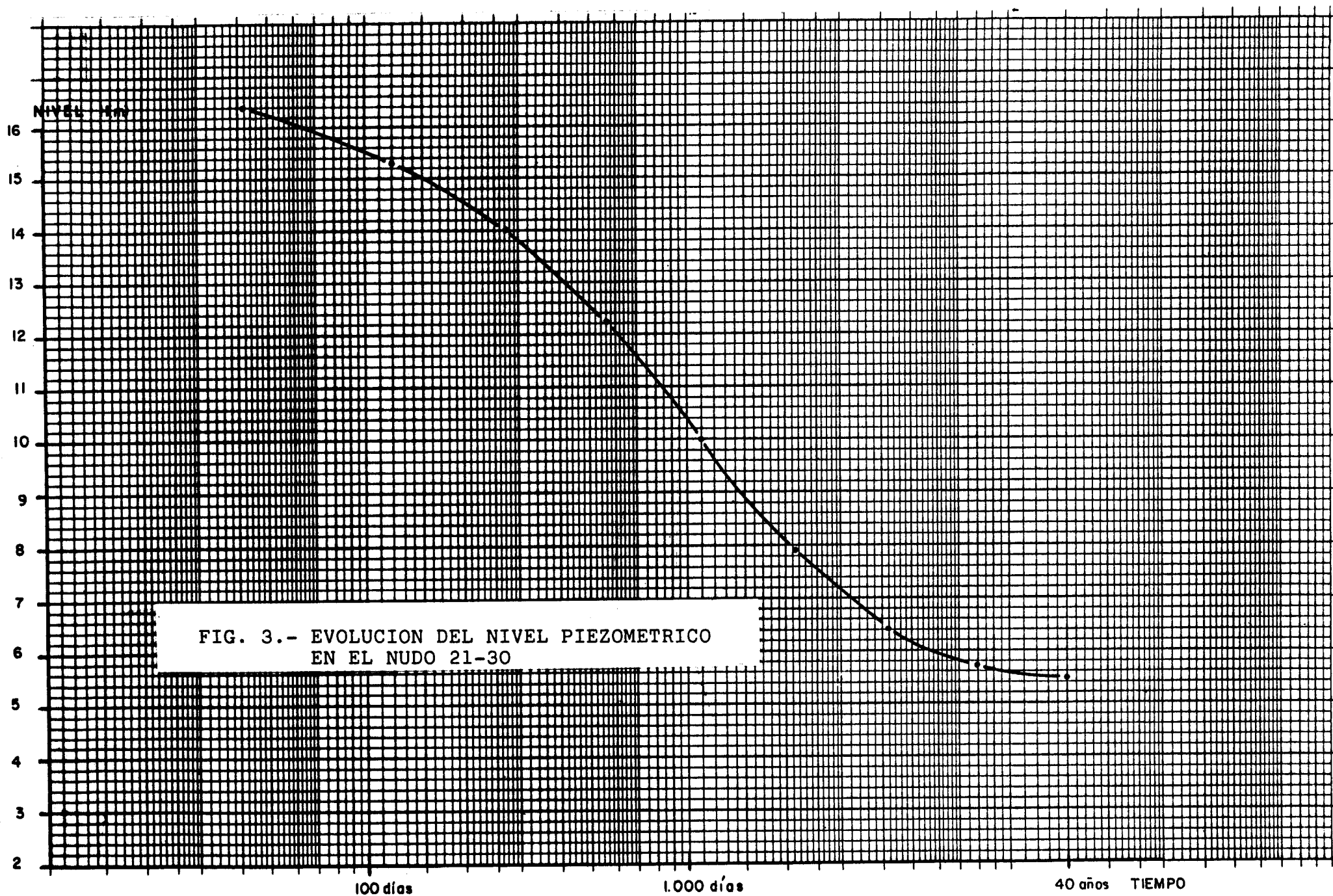
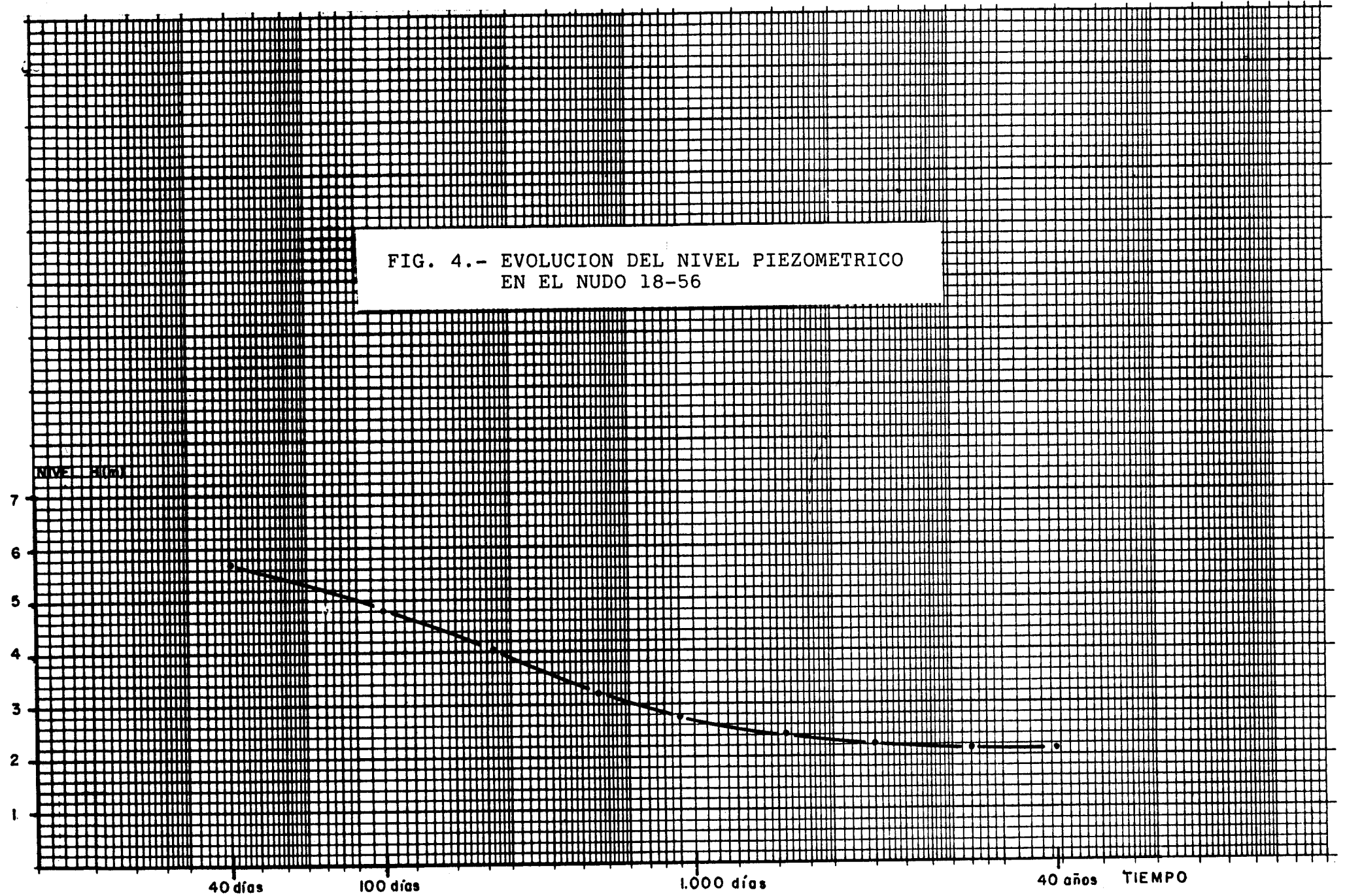


FIG. 3.- EVOLUCION DEL NIVEL PIEZOMETRICO
EN EL NUDO 21-30

FIG. 4.- EVOLUCION DEL NIVEL PIEZOMETRICO
EN EL NUDO 18-56



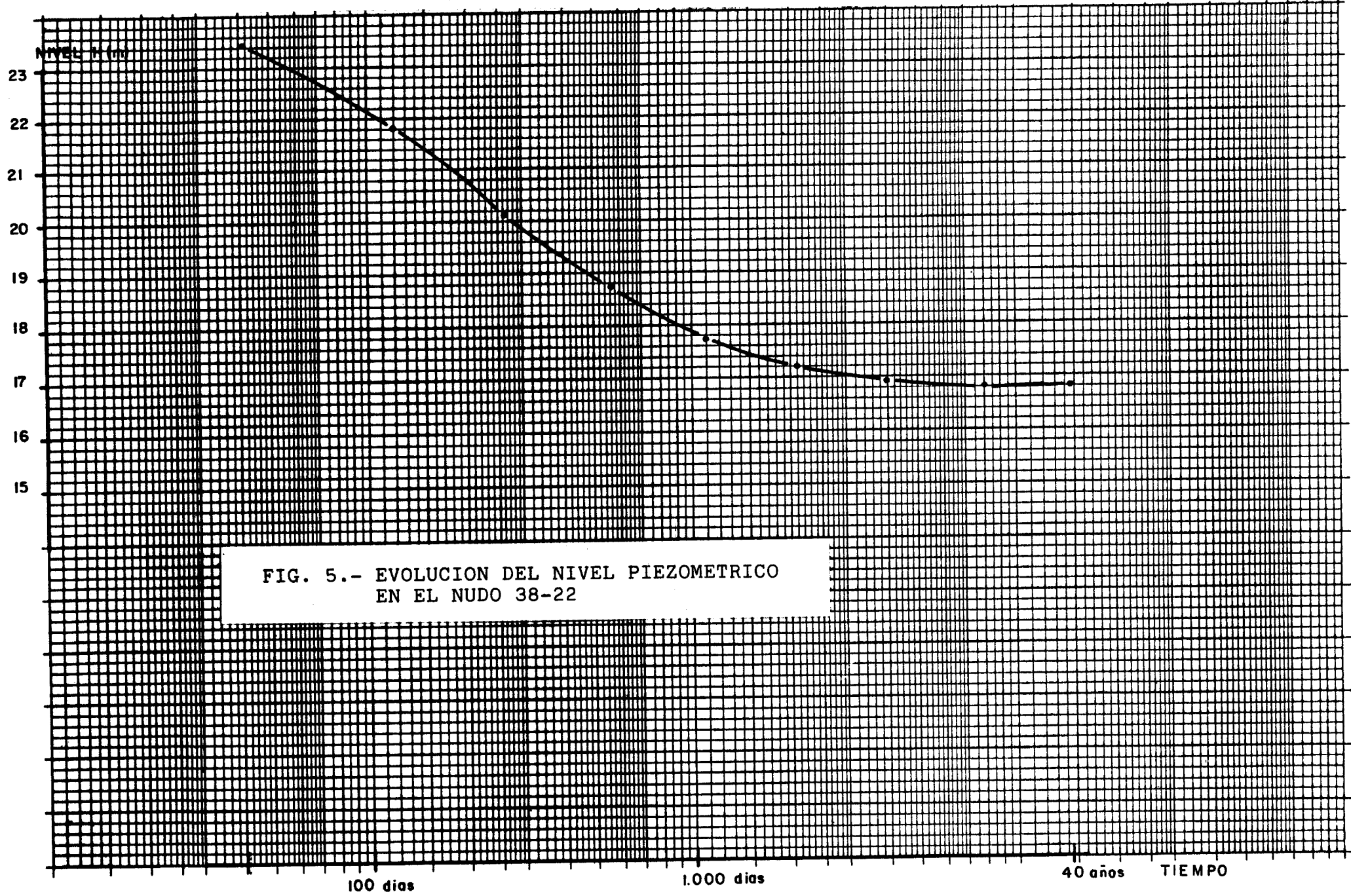


FIG. 5.- EVOLUCION DEL NIVEL PIEZOMETRICO EN EL NUDO 38-22

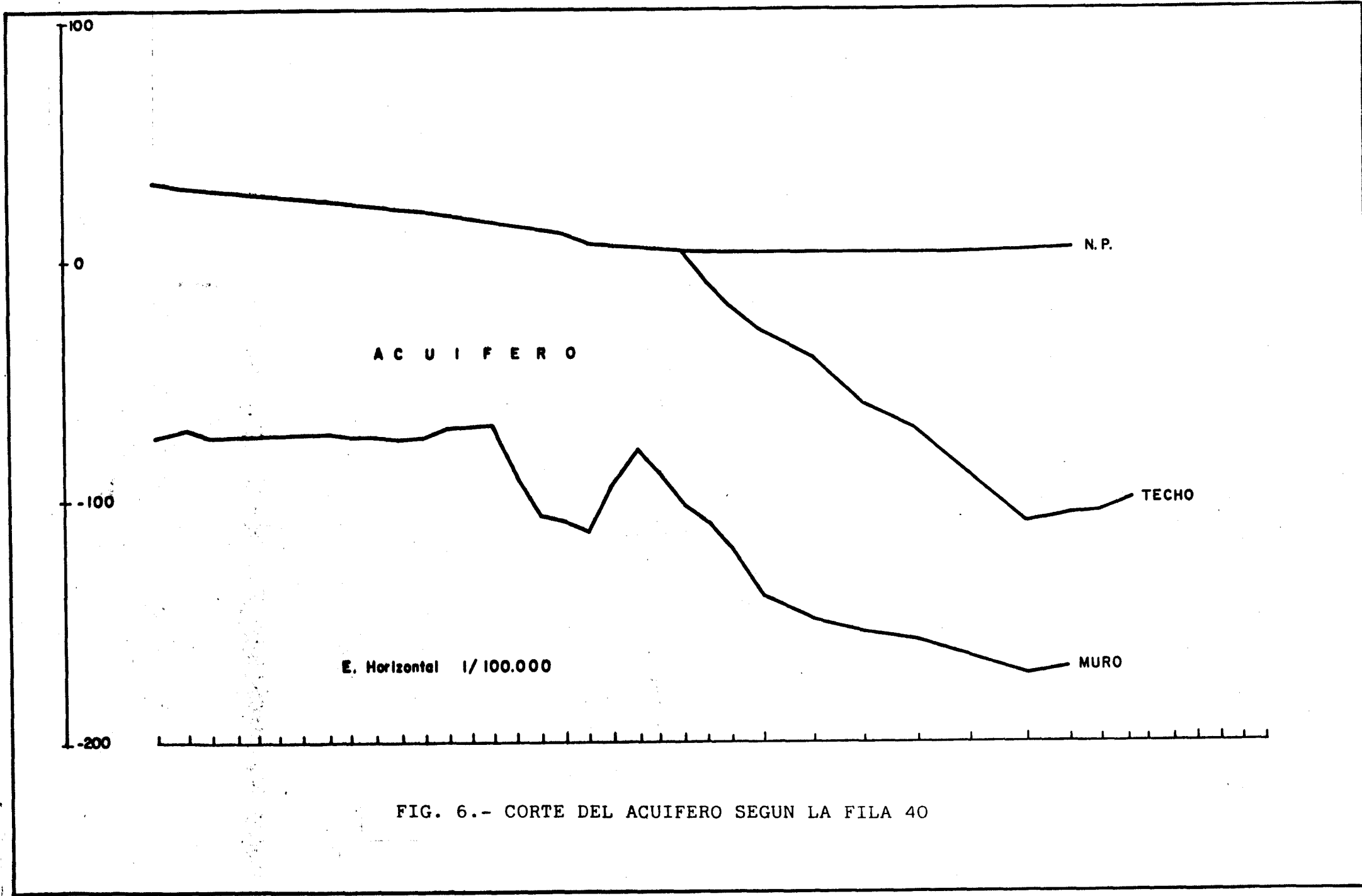
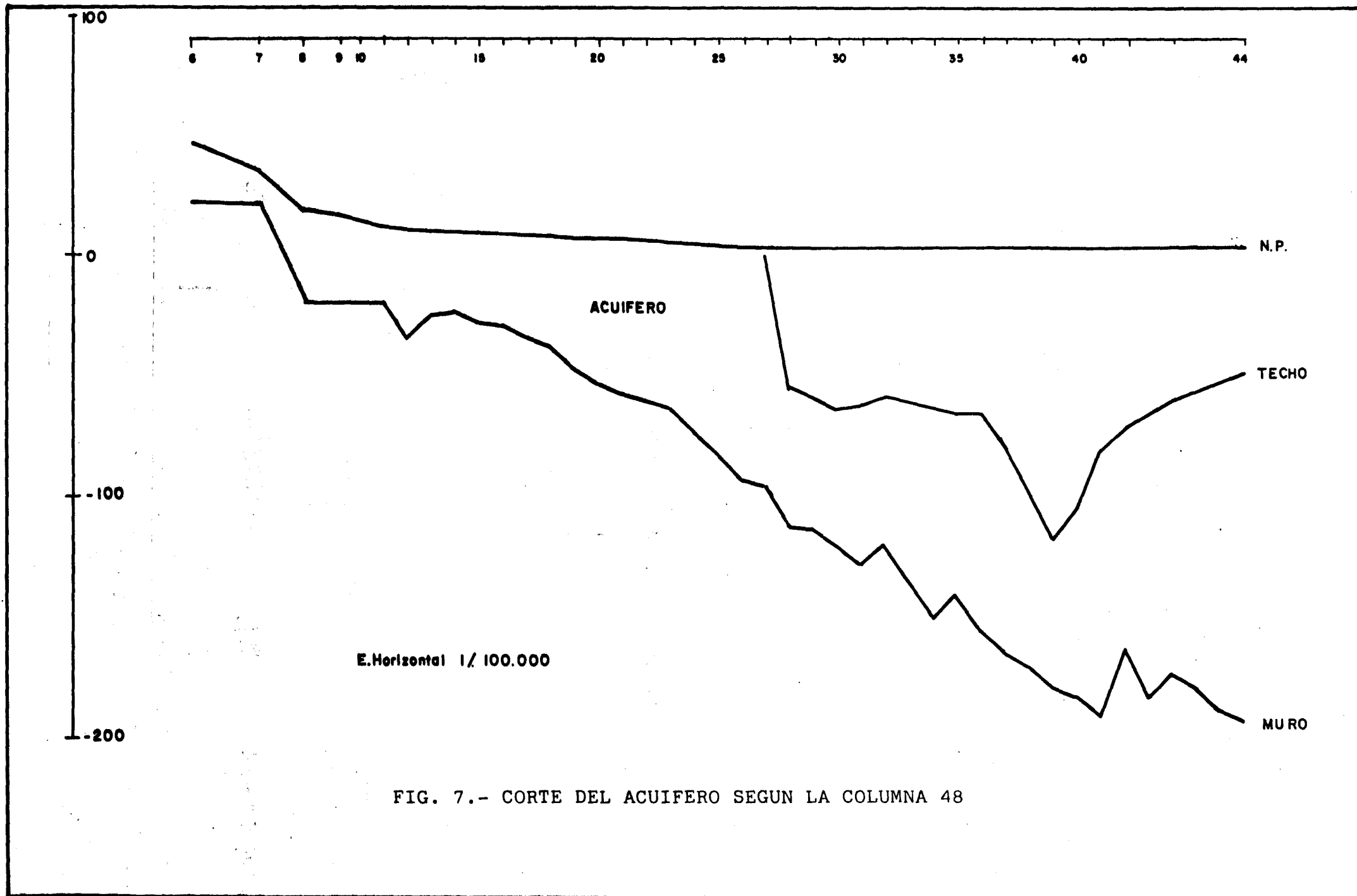


FIG. 6.- CORTE DEL ACUIFERO SEGUN LA FILA 40



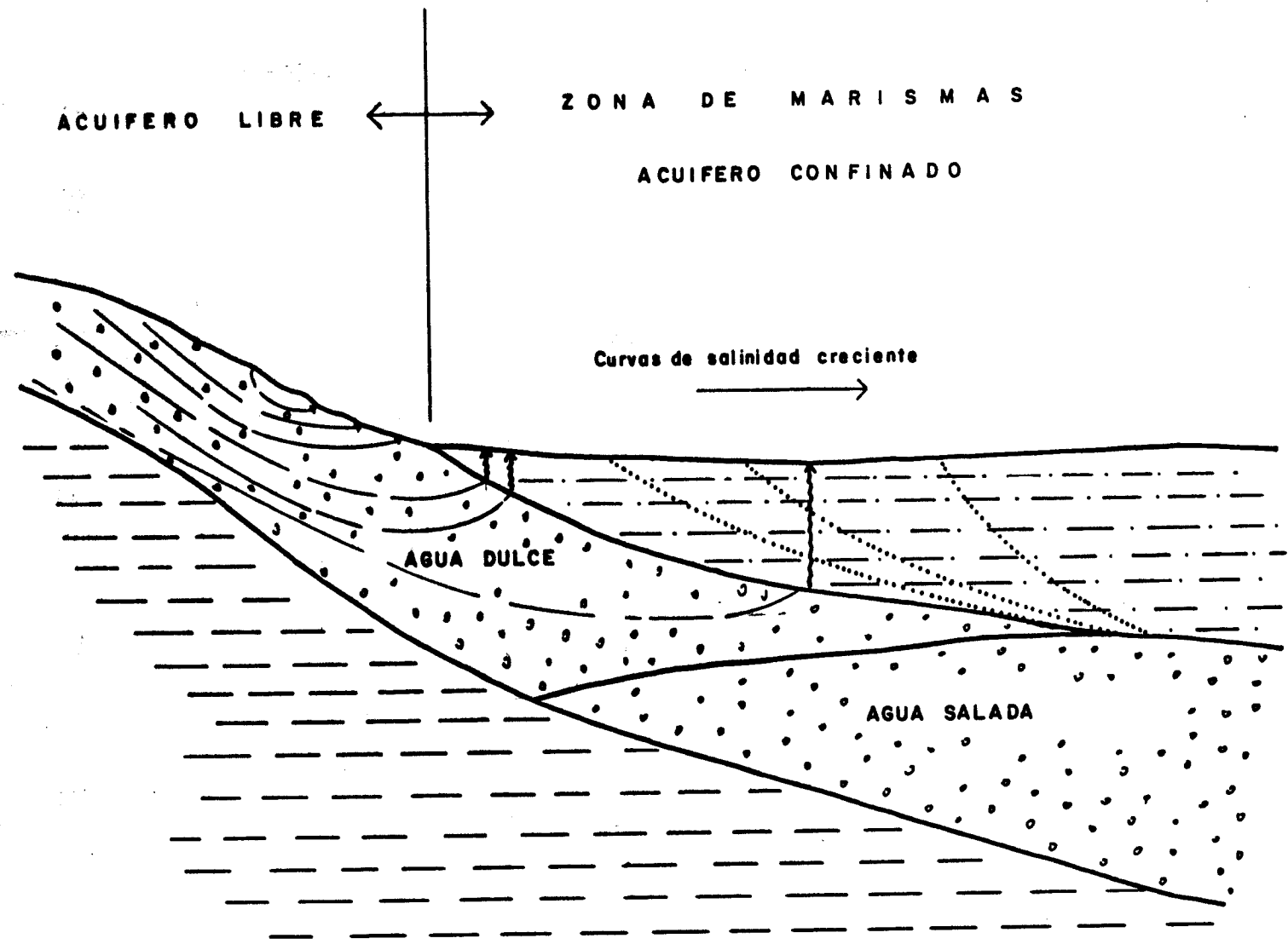
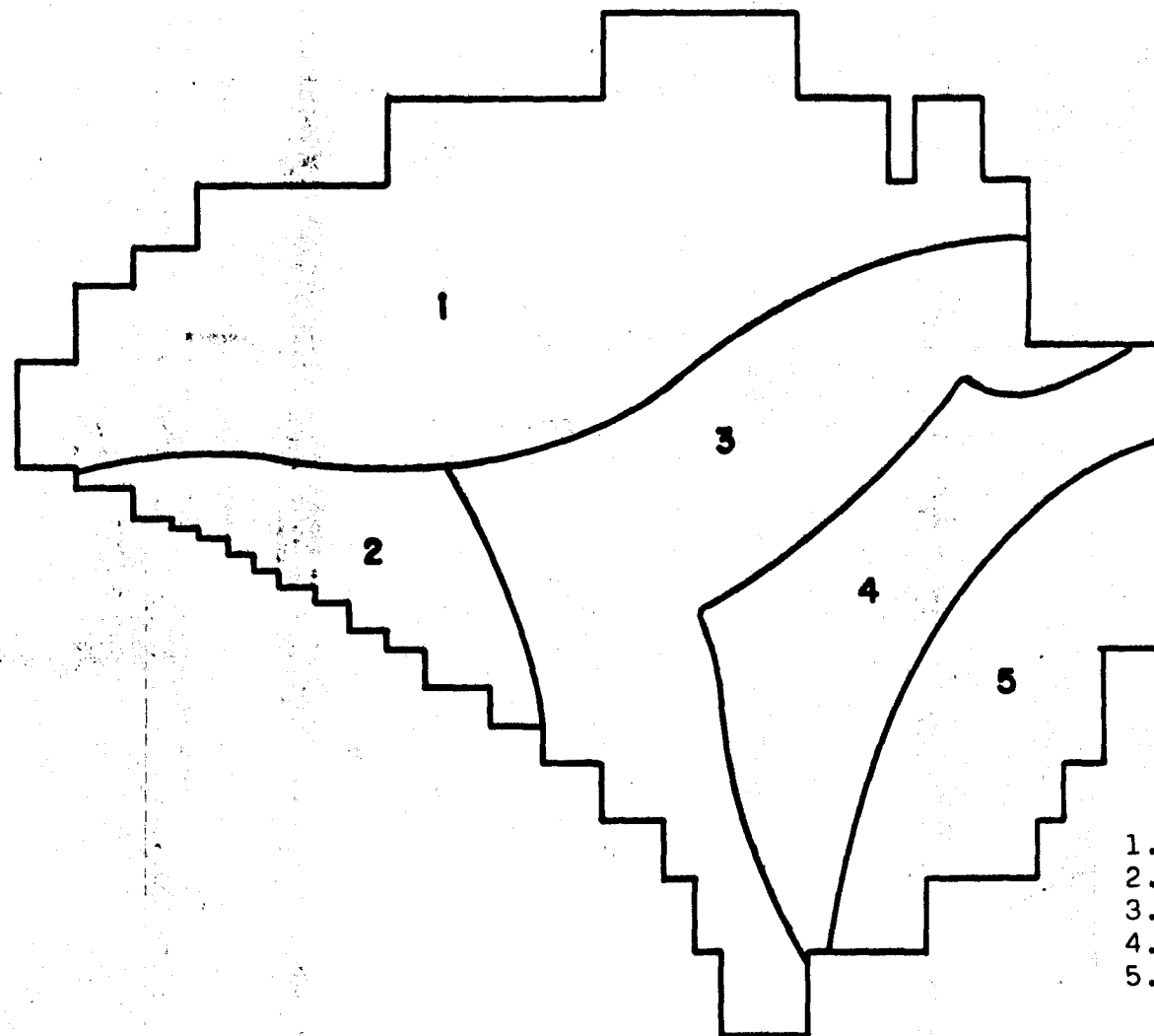


FIG. 8.- CORTE ESQUEMATICO DEL ACUIFERO MOSTRANDO LA POSICION DE LA INTERFASE EN PROFUNDIDAD



- 1.- Zona libre de menor transmisividad
- 2.- Zona libre de transmisividad intermedia
- 3.- Zona libre de mayor transmisividad
- 4.- Zona confinada con agua dulce
- 5.- Zona foncinada con agua salada

FIG. 9.- ZONAS DE DIFERENTE COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DEL ACUIFERO

MAPAS



INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

MAPA HIDROGEOLOGICO DEL SUBSISTEMA ACUIFERO ALMONTE-MARISMAS

LEYENDA

I.- FORMACIONES NORMALMENTE SIN CONSOLIDAR CUATERNARIOS-PLIOCENARIOS

- Akuviales: Conglomerados, gravas, arenas, limos, arcillas, margas PERMEABLES-SEMIPERMEABLES
- Terrazas, manto edico, dunas antiguas y formación roja: Conglomerados, gravas, arenas, limos, arcillas y margas o turbas. PERMEABLE
- Playas, dunas actuales o barra costera: Arenas. MUY PERMEABLE
- Arenas basales: Arenas. MUY PERMEABLE

PLIOCENO

- Limos basales: Arenas, limos arenosos, limos, margas arenosas, margas. SEMIPERMEABLE-PERMEABLE

II.- FORMACIONES CON LENTEJONES ACUIFEROS SAL OBRES CUATERNARIO

- Marismas: Limos, arcillas, arenas y evaporitas. Diferenciación en función de la duración del tiempo de inundación. IMPERMEABLE

PLIOCENO INFERIOR-MIOCENO SUPERIOR

- Margas azules: Margas, limos, arenas. IMPERMEABLE

III.- INDICACIONES RELATIVAS A LAS AGUAS SUBTERRANEAS

- 30 Curva isopiezométrica (Junio-Julio 1982)
- Dirección del flujo subterráneo
- ○ ○ ○ Línea divisoria de las aguas subterráneas
- Límite de la zona con artesianismo (1982)

IV.- INDICACIONES RELATIVAS A LAS AGUAS SUPERFICIALES

- Ojos de Marismas
- Curso de agua principal
- Curso de agua secundario
- Lagunas, lucios
- Curvas de igual salinidad en gr/l

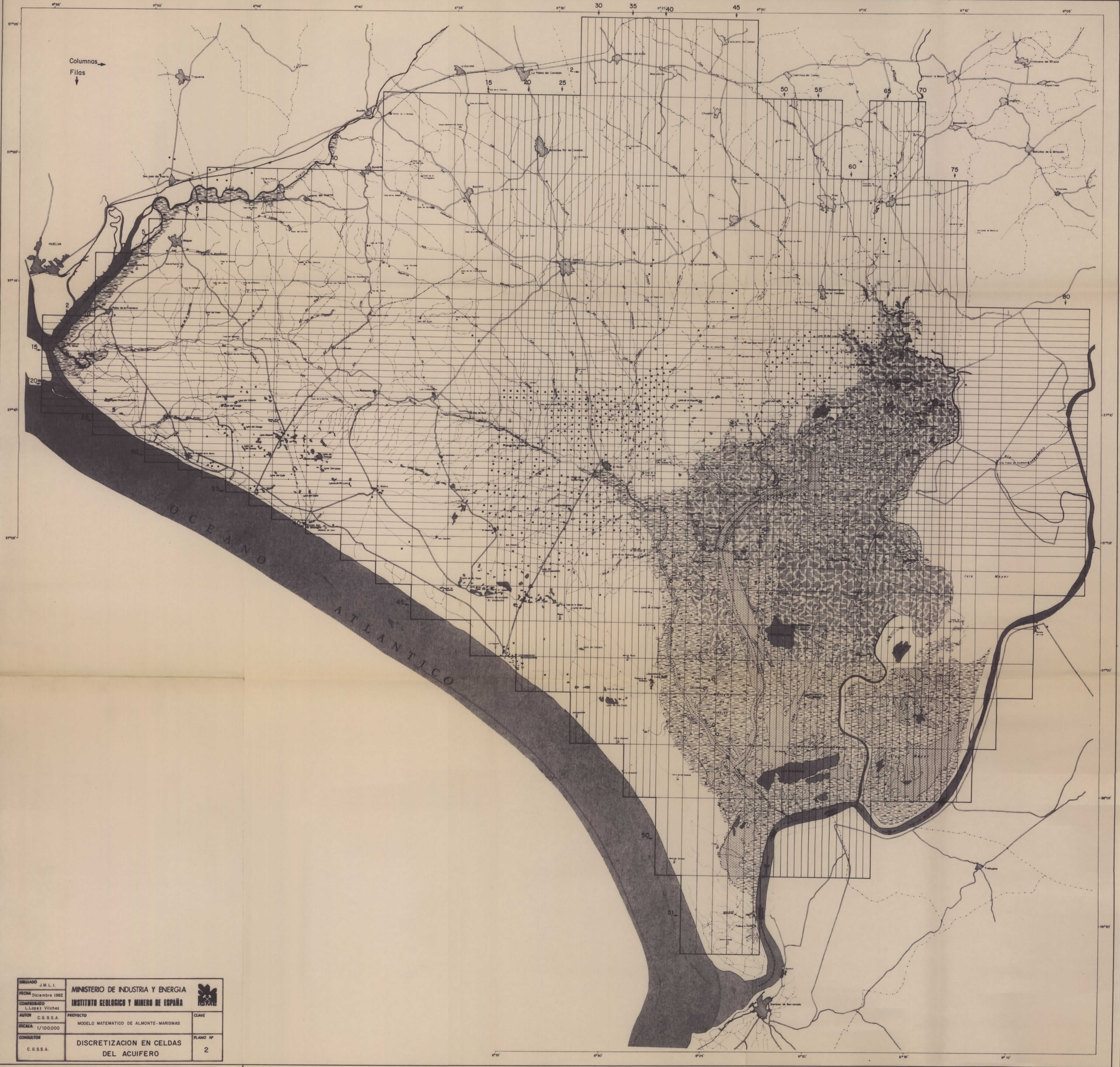
V.- OBRAS ARTIFICIALES

- ⊕ Sonda, sondeo piezométrico
- Pozo, pozo piezométrico
- Canal de drenaje principal y secundario
- Muro de contención o encauzamiento de aguas superficiales
- Estación de bombeo de aguas superficiales

VI.- SIMBOLOS GEOLOGICOS


- Contacto entre formaciones geológicas
- Falla
- Situación Cortes

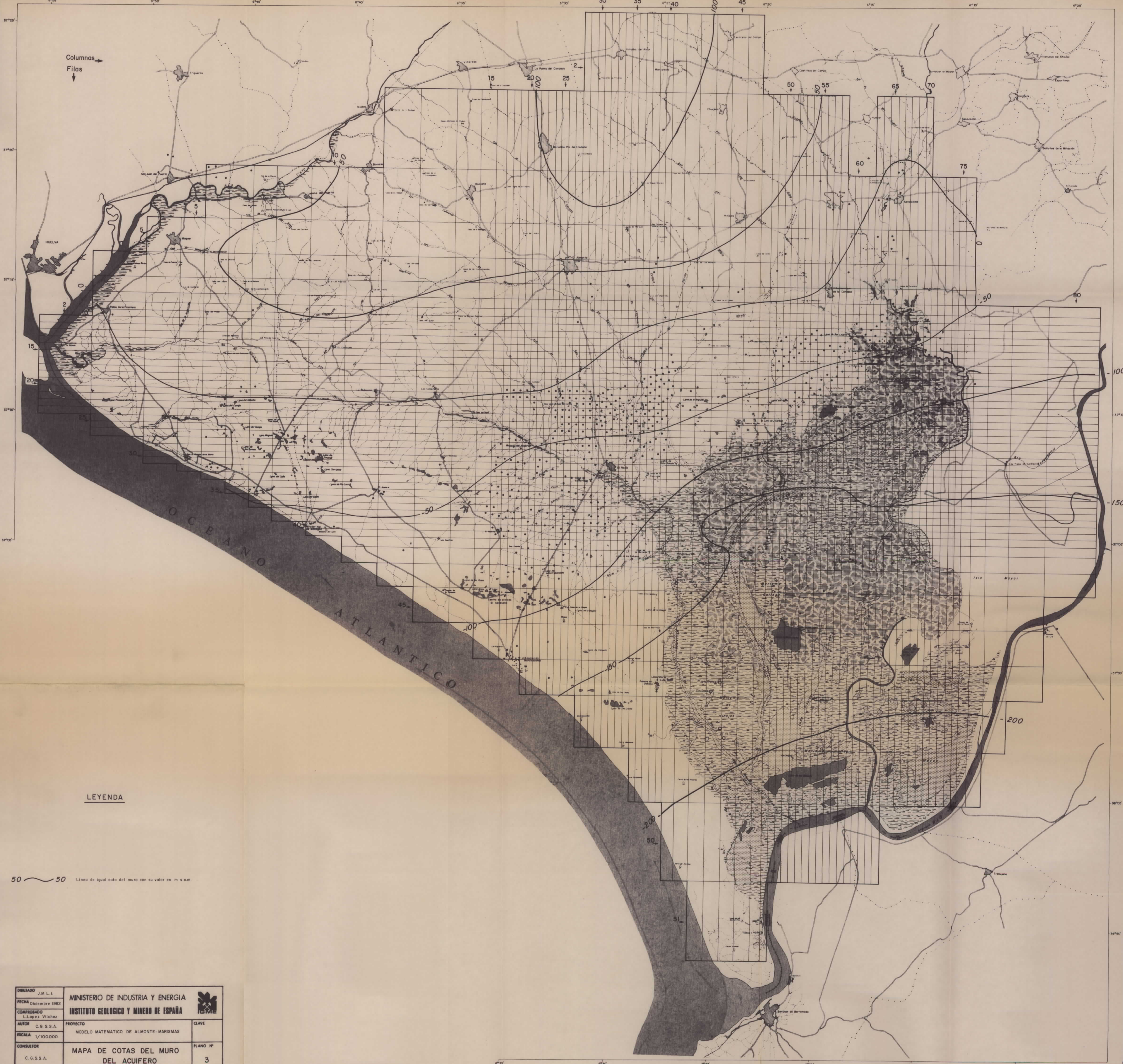
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Km
ESCALA 1:100.000



Columnas
Filas

OCEANO ATLANTICO

DIRIGIDO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L.Lopez Vilchez	PROYECTO	CLAVE
AUTOR C.G.S.S.A.	MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	
ESCALA 1/100,000	DISCRETIZACION EN CELDAS DEL ACUIFERO	PLANO Nº
CONSULTOR C.G.S.S.A.		2



LEYENDA

50 ~~~~~ 50 Línea de igual cota del muro con su valor en m s.n.m.

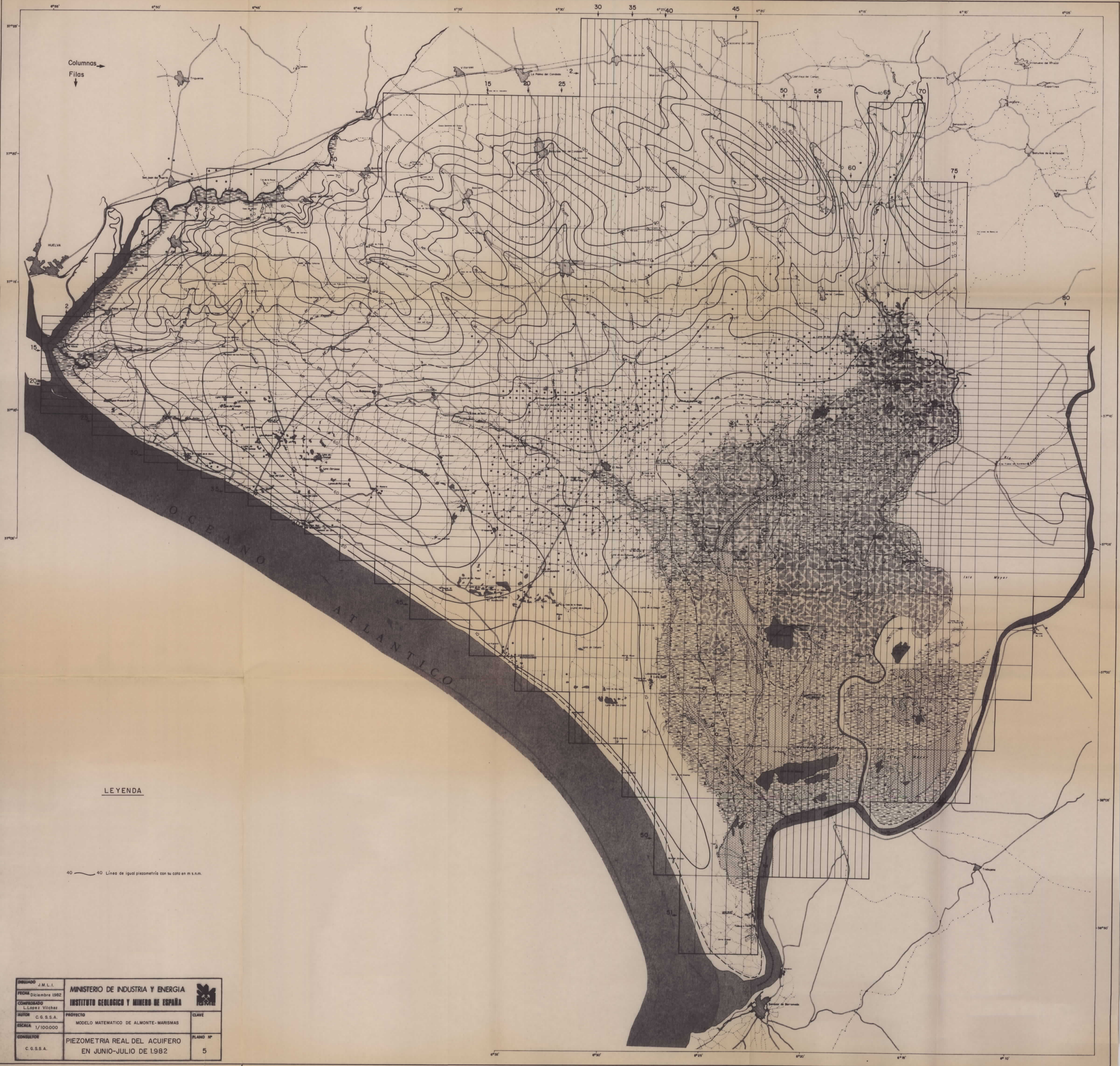
DIBUJADO J. M. L. I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L. López Vilchez	PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	CLAVE
AUTOR C. G. S. S. A.	MAPA DE COTAS DEL MURO DEL ACUIFERO	PLANO Nº
ESCALA 1/100.000		3
CONSULTOR C. G. S. S. A.		



LEYENDA

-50 ~ -50 Línea de igual cota del techo con su cota en m.s.n.m.

DIBUJADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1962	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L.Lopez Vilchez		
AUTOR C.G.S.S.A.	PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	CLAVE
ESCALA 1/100000		PLANO Nº 4
CONSULTOR C.G.S.S.A.	MAPA DE COTAS DEL TECHO DEL ACUIFERO EN CARGA	



Columnas
Filas

LEYENDA

40 — 40 Línea de igual piezometría con su cota en m.s.n.m.

DISEÑADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
FECHA Diciembre 1982		
COMPROBADO L.Lopez Vilchez	PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	CLAVE
AUTOR C.G.S.S.A.	PIEZOMETRIA REAL DEL ACUIFERO EN JUNIO-JULIO DE 1982	PLANO Nº 5
ESCALA 1/100.000		
CONSULTOR C.G.S.S.A.		



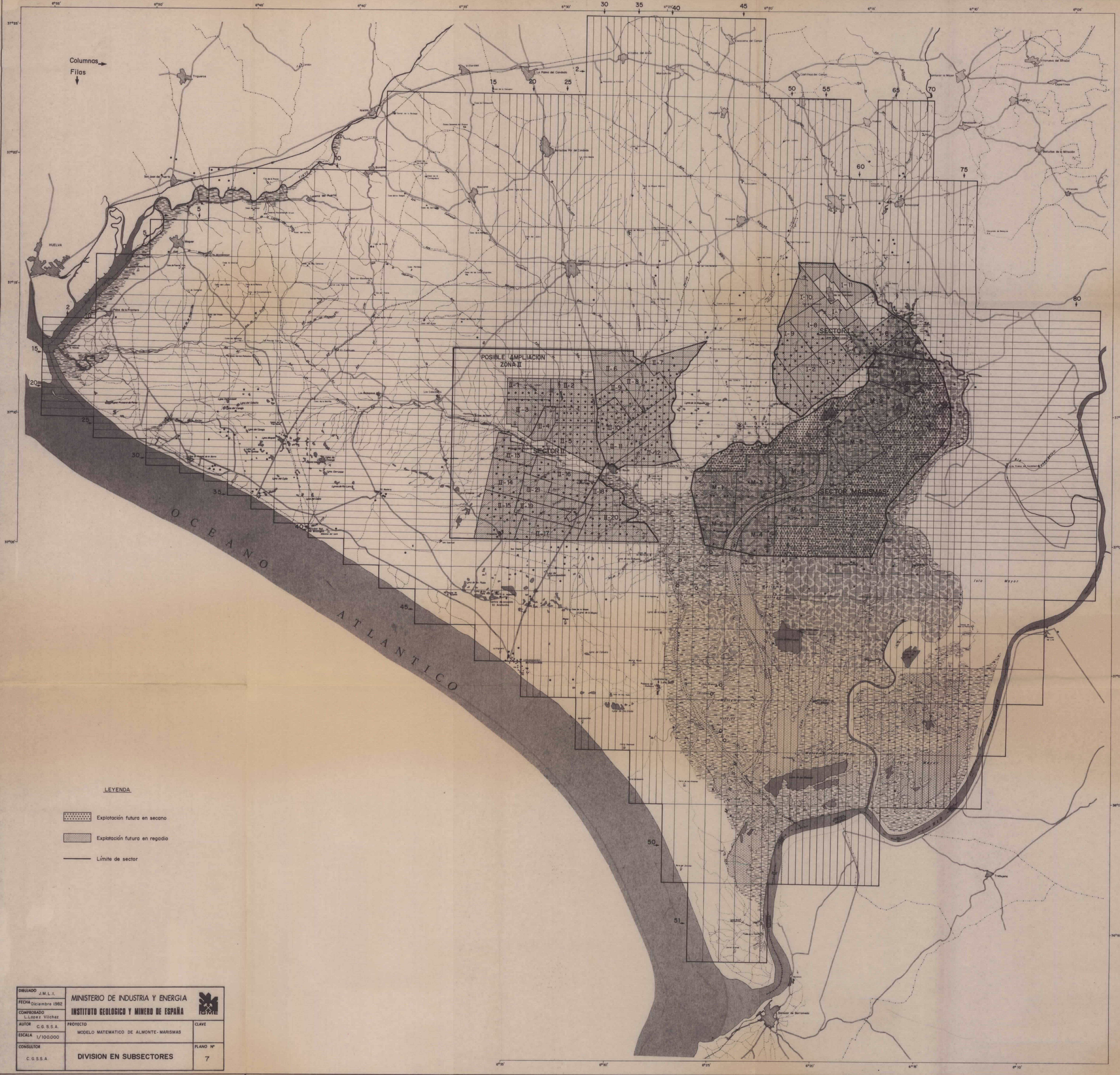
Columnas
Filas

OCEANO ATLANTICO

LEYENDA

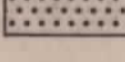
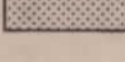
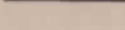
10^{-6} ~ 10^{-6} Línea de igual permeabilidad con su valor en m/s


DIBUJADO J.M.L.I. FECHA Diciembre 1982 COMPROBADO L.Lopez Vilchez AUTOR C.G.S.S.A. ESCALA 1/100.000 CONSULTOR C.G.S.S.A.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS MAPA DE PERMEABILIDADES	 CLAVE PLANO Nº 6
---	--	----------------------------

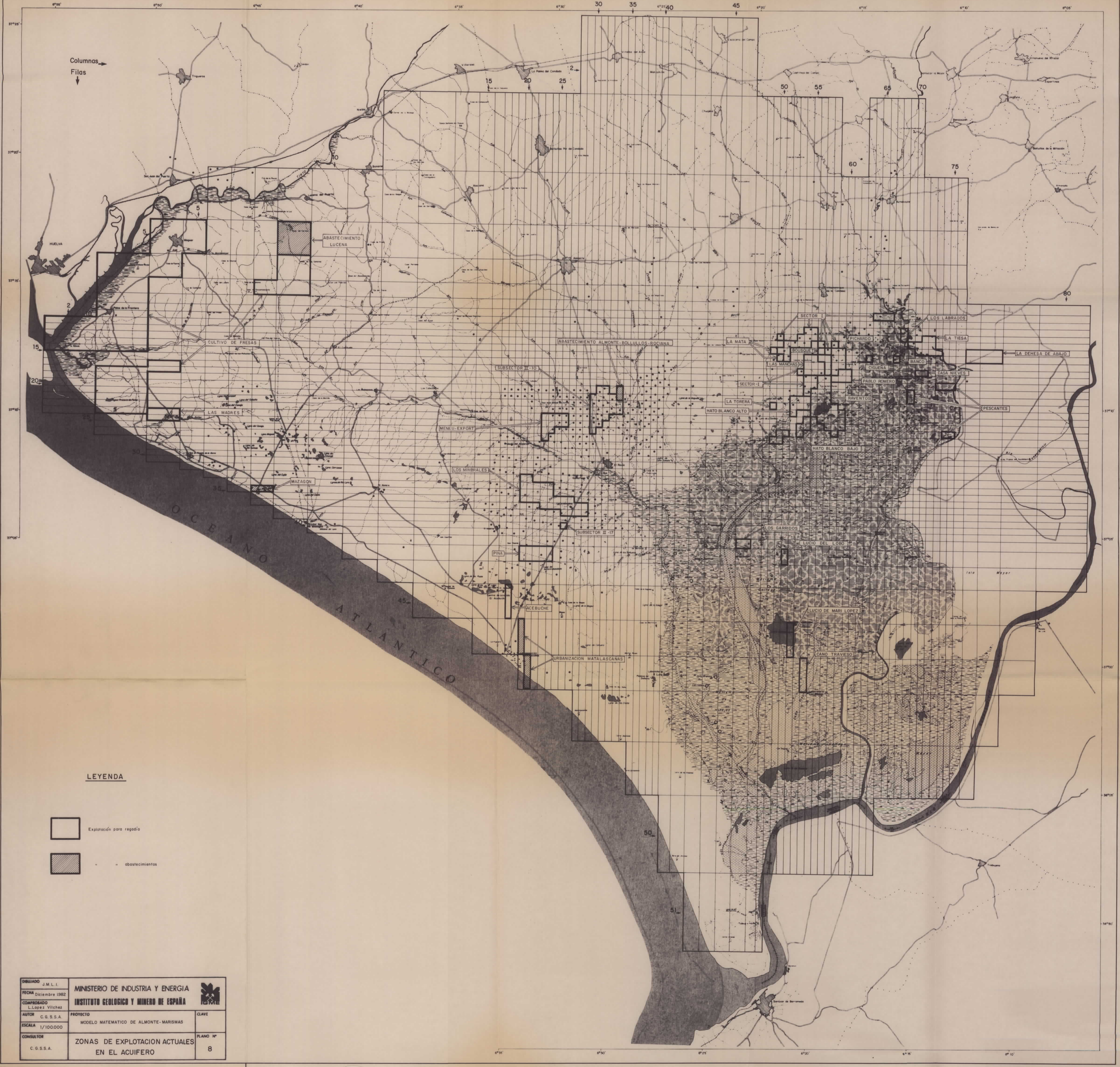


Columnas
Filas


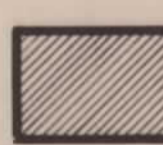
LEYENDA


-  Explotación futura en secano
-  Explotación futura en regadío
-  Límite de sector

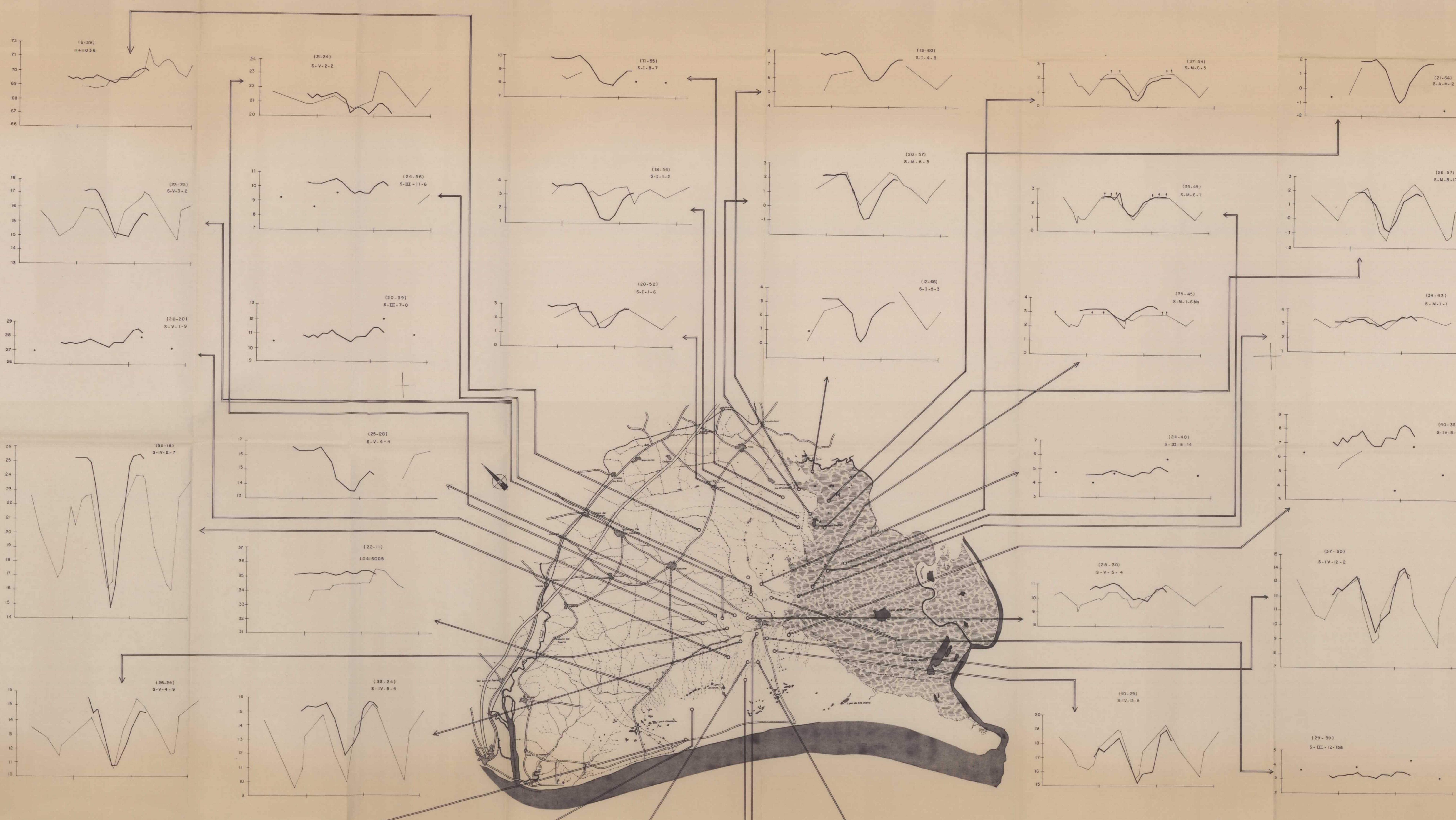
DIBUJADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L.L. Lopez Vilchez	PROYECTO	CLAVE
AUTOR C.G.S.S.A.	MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	PLANO Nº
ESCALA 1/100.000	DIVISION EN SUBSECTORES	7
CONSULTOR C.G.S.S.A.		



LEYENDA

-  Explotación para riego
-  abastecimientos

DIBUJADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L.Lopez Vilchez		
AUTOR C.G.S.S.A.		
ESCALA 1/100000	PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	CLAVE
CONSULTOR C.G.S.S.A.	ZONAS DE EXPLOTACION ACTUALES EN EL ACUIFERO	PLANO Nº 8



LEYENDA

- NUDO (40-29) Nudo del maldito a que corresponde
- Nº INV S-IV-13-8 Identificativo del Piezometro
- CURVA REAL
- CURVA SIMULADA
- PIEZOMETRO
- * VALOR PUNTUAL DEL NIVEL PIEZOMETRICO

1975 1976 1977


DIBUJADO	J. M. L. I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA
FECHA	NOVIEMBRE 1980		
COMPROBADO	LOPEZ VILCHEZ	PROYECTO	MODELO MATEMATICO DE ALMIRANTE - MARISMAS
AUTOR	C. G. S. S. A.	CLAVE	
ESCALA	1:100.000	CONSULTOR	EVOLUCIONES REALES Y SIMULADAS EN LOS PIEZOMETROS DE CONTROL
CONSULTOR	C. G. S. S. A.	PLANO Nº	9



Columnas
Filas

LEYENDA

5 5 Curva de iguales descensos con su valor en metros

DISEÑADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L.Lopez Vilchez	PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	CLAVE
AUTOR C.G.S.S.A.	ESCALA 1/100.000	PLANO N� 10
CONSULTOR C.G.S.S.A.	MAPA DE ISODESCENSOS AL CABO DE UN AÑO CON LOS BOMBEO ACTUALES	



Columnas
Filas

LEYENDA

60 ~~~~~ 60 Línea isopiezométrica con cota en m.s.n.m.

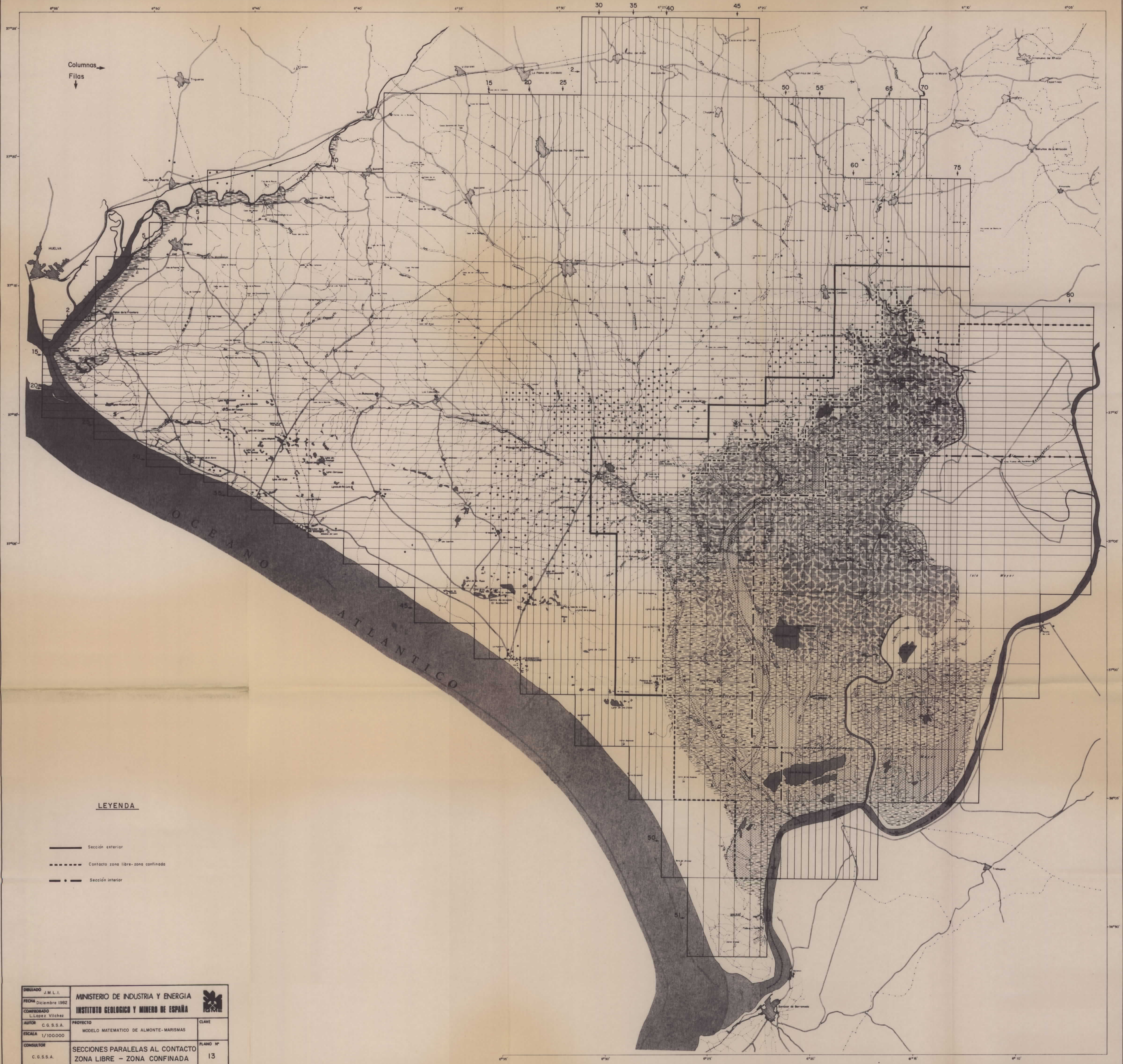
DIBUJADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO L.Lopez Vilchez	PROYECTO	CLAVE
AUTOR C.G.S.S.A.	MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	
ESCALA 1/100.000	MAPA DE ISOPIEZAS EN REGIMEN PERMANENTE	PLANO Nº 11



Columnas
Filas

OCEANO
ATLANTICO


DIBUJADO J.M.L.L. FECHA Diciembre 1982 COMPROBADO L.Lopez Vilchez AUTOR C.G.S.S.A. ESCALA 1/100.000 CONSULTOR C.G.S.S.A.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS MAPA DE POROSIDADES EFICACES	 CLAVE PLANO Nº 12
---	---	-----------------------------

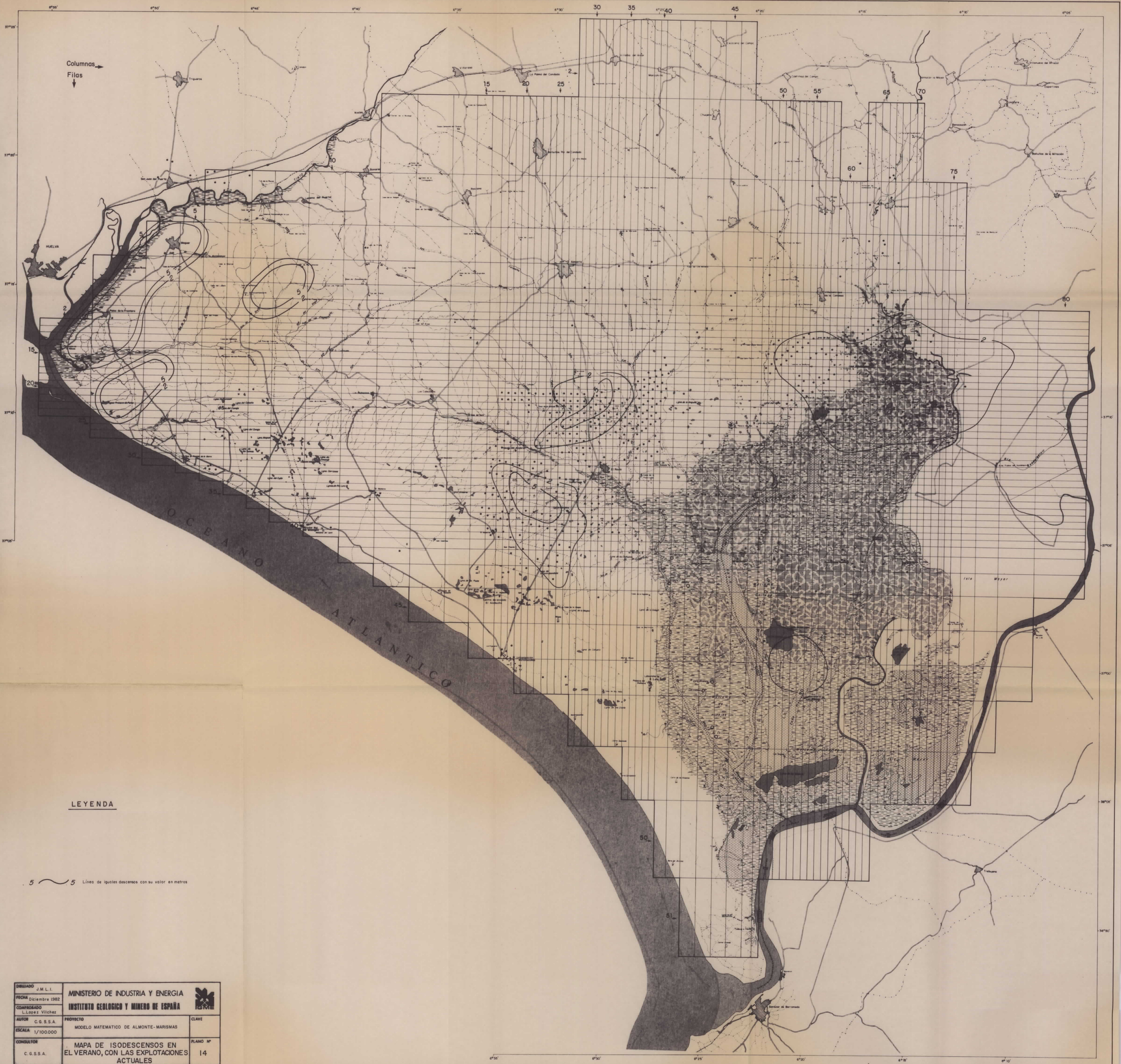


Columnas
Filas

LEYENDA

- Sección exterior
- - - Contacto zona libre-zona confinada
- • • Sección interior

DIBUJADO J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA 	
FECHA diciembre 1982		
COMPROBADO L.Lopez Vilchez	PROYECTO	CLAVE
AUTOR C.G.S.S.A.	MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	
ESCALA 1/100.000		PLANO Nº
CONSULTOR C.G.S.S.A.	SECCIONES PARALELAS AL CONTACTO ZONA LIBRE - ZONA CONFINADA	13



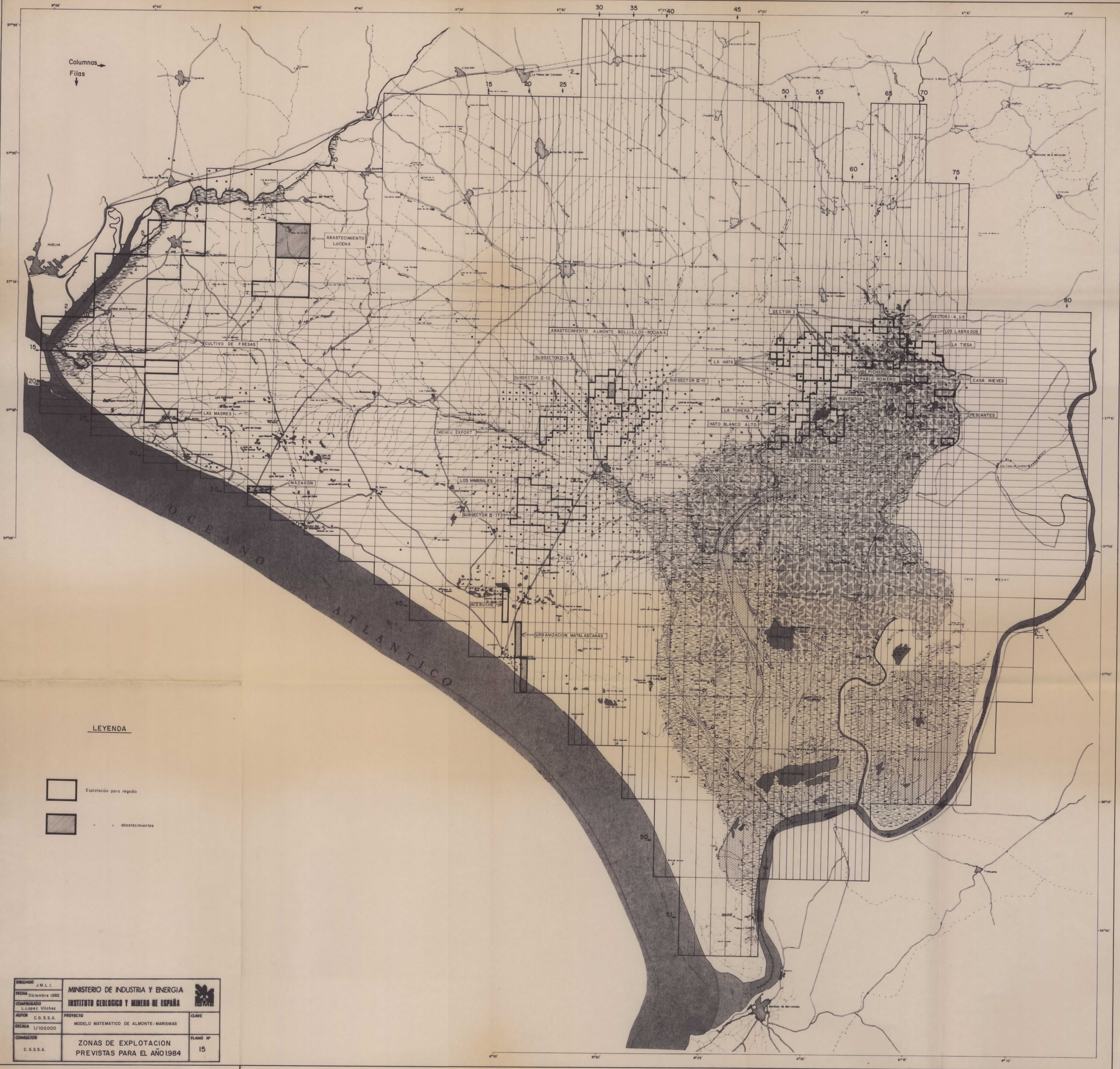
Columnas
Filas

OCEANO ATLANTICO

LEYENDA

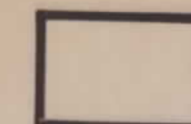

5 ~ 5 Línea de iguales descensos con su valor en metros


DIBUJADO	J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA	Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO	L.Lopez Vilchez		
AUTOR	C.G.S.S.A.	PROYECTO	CLAVE
ESCALA	1/100.000	MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	
CONSULTOR	C.G.S.S.A.	MAPA DE ISODESCENSOS EN EL VERANO, CON LAS EXPLOTACIONES ACTUALES	PLANO Nº 14



Columnas
Filas

LEYENDA

-  Explotación para regadío
-  abastecimientos

DIBUJADO	J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA 
FECHA	Diciembre 1982	
COMPROBADO	L.Lopez Vilchez	PROYECTO MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS
AUTOR	C.G.S.S.A.	
ESCALA	1/100000	CLAVE ZONAS DE EXPLOTACION PREVISTAS PARA EL AÑO 1984
CONSULTOR	C.G.S.S.A.	
		PLANO Nº 15



Columnas
Filas

LEYENDA

- 2 ——— 2 Línea de iguales desensos en metros
- 5 ——— 5 Línea isopiezométrica con su cota en m. s. n. m.

DIBUJADO	J.M.L.I.	MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA	
FECHA	Diciembre 1982	INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA	
COMPROBADO	L.Lopez Vilchez		
AUTOR	C.G.S.S.A.	PROYECTO	CLAVE
ESCALA	1/100000	MODELO MATEMATICO DE ALMONTE-MARISMAS	
CONSULTOR	C.G.S.S.A.	MAPA DE ISOPIEZAS E ISODESCENSOS	PLANO Nº
		AL CABO DE 40 ANOS DE EXPLOTACION	16