

MEMORIA  
del  
**INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO  
DE ESPAÑA**

---

Mapa hidrogeológico nacional

Explicación de los mapas de lluvia útil,  
de reconocimiento hidrogeológico y de  
síntesis de los sistemas acuíferos.

DIVISION DE AGUAS SUBTERRANEAS

---

TOMO 81

---

M A D R I D  
1 9 7 2

Editado  
por el  
Departamento de Publicaciones  
del  
Instituto Geológico y Minero  
de España  
Ríos Rosas, 23 - Madrid - 3

Depósito Legal: M - 4.908 - 1972

---

Imprenta IDEAL - Chile, 27 - Teléfono 259 57 55 - Madrid-16

# MAPA HIDROGEOLOGICO NACIONAL

Explicación de los mapas de lluvia útil,  
de reconocimiento hidrogeológico y de  
síntesis de los sistemas acuíferos.

Esta Memoria ha sido redactada por

**C. Alvarez Fernández**

**J. E. Coma Guillén**

**C. Lucena Bonny**

**J. Porrás Martín**

**M. A. San José Lancha**

**N. Quang Trac**

bajo la dirección de

**J. E. COMA GUILLEN**

---

CONTRIBUCION AL DECENIO  
HIDROLOGICO NACIONAL



## INDICE

	<u>Páginas</u>
Preámbulo ... ..	7
Introducción ... ..	9
Mapa de lluvia útil o de escorrentía total ... ..	13
— Método de cálculo ... ..	14
— Métodos propuestos para el cálculo de la evapotranspiración real ... ..	14
— Método utilizado ... ..	16
— Cálculo de $\gamma$ ... ..	17
— Descripción del trabajo realizado ... ..	18
— Extrapolación de los valores de $\gamma$ ... ..	20
— Dibujo del Mapa Nacional de lluvia útil ... ..	21
— Crítica del sistema ... ..	22
— Alcance del Mapa de lluvia útil ... ..	23
— Datos de base ... ..	24
Mapa de reconocimiento hidrogeológico ... ..	25
— Criterio de representación ... ..	26
— Realización práctica de la cartografía ... ..	31
Mapa de síntesis y de potencialidad de los sistemas acuíferos.	35
— Metodología empleada ... ..	36

## **PREAMBULO**

Las demandas crecientes de agua y los problemas de cantidad y calidad que la economía española en plena transformación plantea, hace urgente y necesario el establecimiento de una política global hidráulica de todos nuestros recursos, lo que obliga, en una primera etapa, a tener un conocimiento general de las posibilidades superficiales y subterráneas de la Nación y, en una segunda, a la gestión coordinada de dichos recursos.

Ante ello y dada la falta de una infraestructura hidrogeológica general, el Instituto Geológico y Minero de España, Organismo con vocación investigadora de los recursos naturales del país, ha concebido y realizado el Programa «Mapa Hidrogeológico Nacional» que, abarcando todo el ámbito nacional, diese, por primera vez, una visión global, cualitativa y cuantitativa de las aguas subterráneas, y mostrase la manera de investigarlas, Programa que habiéndose realizado dentro del marco del Plan Nacional de la Minería, supone al mismo tiempo una contribución de España al Decenio Hidrológico Internacional y cumple las recomendaciones séptima y octava de la Carta del Agua, firmada en 1968 por la mayoría de los gobiernos europeos.

Los objetivos del Programa han sido:

De una parte, mostrar el lugar que ocupan las aguas subterráneas en el conjunto de los recursos hidráulicos, definiendo y delimitando los grandes sistemas acuíferos existentes en el país, cuantificándolos, en una

primera evaluación de sus potencialidades (Creación de infraestructura hidrogeológica general).

Y de otra, preparar un Programa Previo de Investigación del País, en donde se contendrían las líneas directrices de la investigación futura y los medios necesarios para realizarla (Programación y planificación de la investigación).

En definitiva, se ha intentado crear la base necesaria para poder integrar en el futuro las aguas subterráneas con el suficiente conocimiento científico y técnico, dentro de la política global de gestión de los recursos hidráulicos de la Nación.

La presente Memoria explica la metodología empleada para realizar la primera parte del Programa y los resultados obtenidos: Mapas de Lluvia Util, Hidrogeológico de Reconocimiento y de Síntesis de Sistemas Acuíferos.

La segunda parte de este Programa, consistente en un conjunto de programas previos de investigación de los principales acuíferos del país, podrá encontrarse junto con el trabajo completo, en el correspondiente tomo del Plan Nacional de la Minería (Apartado Programa Nacional de Investigaciones Mineras, Sector Aguas Subterráneas).

El establecimiento de la citada metodología ha sido el resultado de una labor de equipo, donde han intervenido los ingenieros señores C. ALVAREZ, J. E. COMA, C. LUCENA, J. PORRAS, TRAC, Licenciado en Ciencias Geológicas señor SAN JOSE, con la colaboración especial de J. MARGAT y F. MORTIER.

El Mapa de Lluvia Util ha sido realizado por C. LUCENA. La síntesis de representación y síntesis gráfica del Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico, lo han efectuado J. PORRAS y M. A. de SAN JOSE, respectivamente, utilizando los trabajos del equipo de hidrogeólogos que figuran en la correspondiente leyenda de dicho Mapa.

El tratamiento de los datos de hidrología superficial y cálculo de los caudales de base ha sido realizado por el ingeniero señor ALVAREZ. El Mapa de Síntesis de Sistemas Acuíferos y la dirección y coordinación del Programa ha correspondido a J. E. COMA, Jefe de la División de Aguas Subterráneas de este Instituto.

El conjunto del Programa «Mapa Hidrogeológico Nacional», realizado en el plazo de un año, ha supuesto el manejo de 60.000 datos, 360.000 kilómetros de recorridos para cartografiar el territorio nacional, 52.000 horas de técnicos superiores y medios —36 técnicos españoles y 5 extranjeros—, cuya relación detallada se puede encontrar en el citado tomo del Plan Nacional de la Minería.

## INTRODUCCION

La metodología hidrogeológica puesta a punto y aplicada por el Instituto Geológico y Minero de España para preparar el Programa «Mapa Hidrogeológico Nacional», ha partido de unas nociones y principios bien definidos, a fin de alcanzar objetivos precisos y perfectamente determinados.

Dichos objetivos se pueden resumir de la siguiente forma:

1.º Ofrecer una visión general y sintética de la distribución espacial de los acuíferos subterráneos del territorio nacional, sus condiciones de ubicación y las características generales supuestas o formuladas mediante hipótesis bien claras del funcionamiento de estos acuíferos, así como las de sus eventuales interrelaciones.

2.º Presentar una evaluación de la potencialidad de los recursos subterráneos del territorio nacional; evaluación en valores absolutos sin olvidar la importancia relativa tanto entre ellas como en relación con los recursos hídricos totales.

3.º Mediante estos datos de partida y los resultados de un estudio socio-económico, preparar una serie de Programas previos de investigación de aguas subterráneas, planificados a escala nacional.

En líneas generales, la metodología empleada corresponde a la que se aplica de manera clásica en toda fase de reconocimiento en la investigación hidrogeológica.

Sin embargo, teniendo en cuenta los ambiciosos objetivos perseguidos, se ha adoptado una manera completamente nueva de abordar el problema.

La metodología aplicada reúne las siguientes características:

a) La mayor precisión posible para la escala de trabajo elegida, sin caer en el error de suponer una exactitud inexistente.

b) Una coherencia y homogeneidad en los datos utilizados y en los resultados obtenidos.

c) Los problemas que comporta la fase de reconocimiento en su aspecto de evaluación cuantitativa son bien conocidos. Para resolverlos se ha empleado el principio de obtención de valores por varios caminos independientes, ajustándolos luego mediante aproximaciones sucesivas.

El organigrama adjunto sintetiza la metodología empleada.

La realización práctica del trabajo ha tenido dos vías de actuación convergentes, y una síntesis final, que se resumen a continuación.

#### **El Mapa Hidrogeológico**

A partir de una recopilación bibliográfica y cartográfica, tanto geológica como hidrogeológica, de un reconocimiento sobre el terreno y de un inventario de los principales puntos de aguas (pozos, sondeos, manantiales, etc.) que son los mejores indicadores de la existencia de acuíferos subterráneos, se ha preparado un Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico a escala 1/500.000 —publicado a 1:1.000.000—, cuya formación se explicará en detalle más adelante.

A este respecto se señalan las dificultades que presentaba la realización de un mapa a esta escala: peligro de perderse en el detalle, necesidad de homogeneizar los diversos mapas y trabajos consultados y el breve período de tiempo que se disponía para realizar la labor de campo.

#### **El tratamiento de datos**

Se han utilizado, como base, tres grupos de datos:

- El mapa pluviométrico, a escala 1/500.000, del Centro de Estudios Hidrográficos.
- Los valores de la evapotranspiración potencial calculada según el método de Thornthwaite, publicados por el Ministerio de Obras Públicas.

# METODOLOGIA HIDROGEOLOGICA

## CARACTERISTICAS BASICAS

HOMOGENEIDAD

COHERENCIA

PRECISION

Espacial

Metodológica

## ORGANIZACION DE LA INVESTIGACION

Organización horizontal:  
Control mutuo y aproximación sucesiva inter-cuencas, inter-sistemas

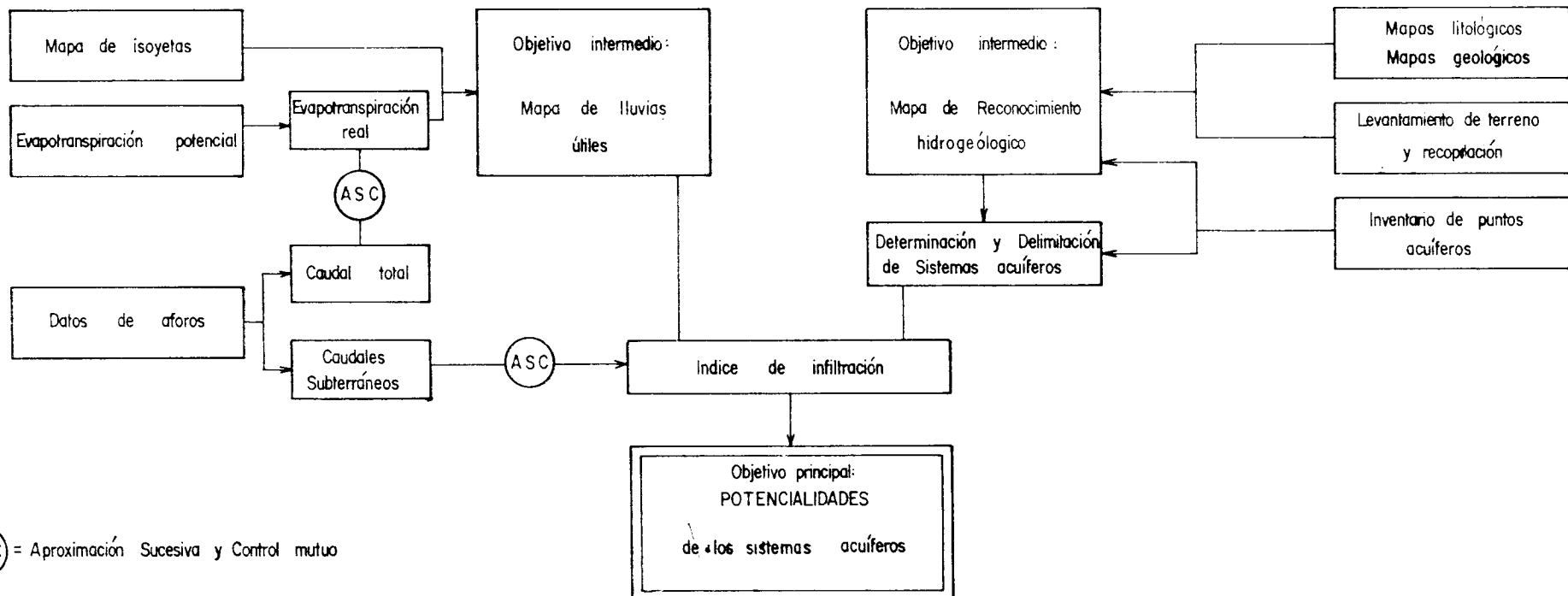
Organización vertical:  
Convergencia de métodos, control y aproximación sucesiva inter-métodos.

## APLICACION DE LA METODOLOGIA A LA INVESTIGACION

### TRATAMIENTO DE DATOS

### OBJETIVOS

### MAPA HIDROGEOLOGICO



ASC = Aproximación Sucesiva y Control mutuo

-- Caudales mensuales medios naturales para un período de veinte años de las 135 estaciones de aforo, con valores restituidos, preparados por el Centro de Estudios Hidrográficos para el II Plan de Desarrollo Económico y Social.

A base de estos datos se ha obtenido un mapa de lluvia útil, es decir, de la parte de lluvia total que escapa a la evapotranspiración y que puede transformarse en parte en escorrentía puramente superficial, y en parte infiltrarse hacia los acuíferos subterráneos, para alimentar la escorrentía subterránea.

Para realizar el Mapa de Lluvia Útil, que, junto al Mapa Hidrogeológico constituían los dos objetivos intermedios, se ha calculado, en primer lugar, y a partir de datos teóricos de evapotranspiración potencial, los valores de la evapotranspiración real, transformando estos valores puntuales en un mapa de isolíneas. La obtención de los valores reales de la evapotranspiración se ha hecho, como se verá detalladamente en el apartado correspondiente, mediante aproximaciones sucesivas, empleando como base el caudal restituido de la estación de aforos, dato que se considera como el más fiable para realizar la comprobación del método.

Asimismo, se han analizado las curvas de caudales medios mensuales, suministradas por las estaciones de aforo de nuestros principales ríos, con la finalidad de obtener los caudales de base de ellos, que representan en una primera aproximación y en la mayor parte de los casos, los caudales suministrados por la escorrentía subterránea de nuestros embalses subterráneos.

La búsqueda constante de una coherencia espacial, que ha supuesto un control mutuo y una comparación de resultados en las diferentes cuencas, ha permitido aclarar el concepto de caudal de base y darle su verdadera significación en relación con la escorrentía subterránea.

El Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico de una parte y, de otra, el tratamiento de datos en su doble vertiente de cálculo de la lluvia útil y de la escorrentía subterránea han posibilitado la definición y evaluación, en una síntesis final, de la potencialidad de nuestros grandes sistemas acuíferos.

#### **La Síntesis y potencialidades de los Sistemas acuíferos**

La planificación de la investigación, objetivo último del Programa, requería la realización de un trabajo de síntesis en donde se delimitaran,

definiesen y evaluaran la potencialidad de nuestros principales acuíferos. Ello ha requerido el establecimiento de un concepto nuevo, el de «Sistema acuífero» como «Dominio espacial, limitado en superficie y en profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación».

La potencialidad en agua subterránea de los Sistemas se hubiera podido obtener directamente a partir de la superposición del Mapa de Lluvia Útil sobre la parte permeable de los sistemas acuíferos, afectando cada una de ellas de un coeficiente de infiltración; ahora bien, estos índices, aunque fuesen homogéneos para el conjunto de los sistemas, hubieran sido puramente subjetivos y, por lo tanto, relativamente fiables.

Por otro lado, los caudales subterráneos obtenidos a partir del análisis de los caudales de base, aunque más seguros, eran valores puntuales.

La conjunción de los dos procedimientos, lluvia útil-coeficiente de infiltración y valores de caudales subterráneos ha permitido por aproximaciones sucesivas repartir éstos espacialmente y evaluar más exactamente la potencialidad en agua subterránea de cada sistema acuífero, objetivo técnico previo a cualquier planificación general.

## MAPA DE LLUVIA UTIL O DE ESCORRENTIA TOTAL

La lluvia útil, conceptualmente equivalente a escorrentía total, o, en las nomenclaturas inglesa y francesa, respectivamente, «run off» y «ecoulement de pluies», representa el agua de precipitación que escapa a la evapotranspiración y que escurre sobre el terreno o se infiltra en él.

Esto es:

$$P = ETR + L_u$$

$$L_u = E + I$$

siendo:

- P : Precipitación.
- ETR: Evapotranspiración real.
- $L_u$  : Lluvia útil.
- E : Escorrentía superficial.
- I : Infiltración.

Este agua que escapa a la evapotranspiración, es la única de que en principio se dispone para satisfacer las necesidades humanas, y de ello el nombre de lluvia útil que, utilizado por primera vez en el marco del presente trabajo, da una visión exacta de su significado.

Hasta el momento presente, en España no se había intentado realizar un Mapa de este tipo que representara la realidad hidráulica de nuestra nación, indicando su distribución espacial debido, sin duda, a las dificultades que entraña el cálculo de la evapotranspiración real.

En este trabajo se dibuja el Mapa de Lluvia Útil apoyándose en un método de cálculo que permite ajustarle a las condiciones climáticas de cada zona del País, valiéndose de datos objetivos suministrados por estaciones de aforo.

#### METODO DE CALCULO

Se describe a continuación, siendo una exposición simplificada de él, el organigrama que se incluye.

Es evidente, a nivel puntual, que existen zonas de evapotranspiración excepcionalmente baja o elevada dependiendo de factores litológicos o de vegetación.

Pero en el conjunto y a la escala de trabajo elegida (1:500.000), el suelo y la vegetación están condicionados por el clima de manera que debido a ello la lluvia útil se puede considerar, en primera aproximación, independiente de la naturaleza litológica del terreno y de la cubierta vegetal, no siendo preciso en consecuencia tener en cuenta estos factores al calcular la lluvia útil.

Por lo tanto, la lluvia útil se puede determinar restando de la pluviosidad la evapotranspiración, haciendo depender a ésta únicamente de factores climáticos y calculándola por medio de una fórmula racional comprobada en un número suficiente de puntos.

#### METODOS PROPUESTOS PARA EL CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL

Diversos autores han propuesto, entre otras, las siguientes directrices para su cálculo.

- 1) Coeficiente de escorrentía supuesto constante.
- 2) Ley  $L_u = a \cdot P^b$ , siendo  $P$  la pluviosidad y  $a$  y  $b$  coeficientes dependientes de las características climáticas, resultando  $b$  siempre superior a 1.





3) Método de Blaney y Criddle.  $ETR = K \cdot \sum f$ , siendo:

K: coeficiente de consumo, dependiente del estado de crecimiento de las plantas.

f: factores mensuales de consumo, producto de las temperaturas medias mensuales y los porcentajes de horas de luz con relación al año.

4) Método de Penman.

En función de la velocidad media del aire y la diferencia de las tensiones de vapor en dos niveles prefijados se obtiene una expresión de la evapotranspiración, obtenida como una solución simultánea de las ecuaciones de balance de energía y de difusión turbulenta de vapor.

5) Método de Turc.

a) Cálculo de la evapotranspiración potencial:

Turc obtiene una fórmula para el cálculo de ésta, función de la pluviometría, el factor del suelo (altura de agua susceptible de evaporarse en diez días a partir de las reservas de agua del suelo), la humedad disponible para la transpiración de las plantas y el poder evaporante del aire.

b) Cálculo de la evapotranspiración real.

Por medio de la expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Siendo:

P: Pluviosidad media anual.

L:  $300 + 25 T + 0,05 T^3$ .

T: Temperatura media anual.

6) Método de Thornthwaite.

La evapotranspiración potencial ETP se calcula mes por mes, utilizando los datos de temperatura conocidos, en la forma siguiente:

Se determina un índice mensual  $i_n$ :

$$i_n = \left( \frac{T_n}{5} \right)^{1,514}$$

Siendo  $T_n$  la temperatura media del mes considerado.

La evapotranspiración potencial mensual  $EP_n$  es:

$$EP_n = 1,6 \left( 10 \frac{T_n}{I} \right)^a$$

Donde  $I$  es igual a la suma de los  $i_n$ ,  $I = \sum i_n$  y  $a$  es función de  $I$ .

$$a = 75 \cdot I^3 \cdot 10^{-9} - 771 \cdot I^2 \cdot 10^{-7} + 1792 \cdot I \cdot 10^{-5} + 49239 \cdot 10^{-5}$$

Los valores de  $EP_n$  se corrigen en función del número de horas entre la salida y la puesta del sol.

Para el cálculo de la evapotranspiración real se admite que ésta es igual a la potencial, mientras esté alimentada por las precipitaciones y por la reserva de agua del suelo. La reserva de agua máxima del suelo, que corresponde a la de un suelo saturado, se cifra generalmente en 100 milímetros.

Esta fórmula se aplica generalmente a los valores mensuales medios, bien en zonas o bien puntualmente.

Cada uno de estos métodos tiene los siguientes inconvenientes:

El 1) es sólo válido para zonas climáticamente iguales.

El 2) no es útil cuando la pluviosidad es elevada, de forma que la diferencia  $P - L_u$ , equivalente a la evapotranspiración, llega a hacerse negativa, lo que es absurdo.

Los 3), 4) y 5 a) exigen el conocimiento de parámetros que no son medidos actualmente en un número suficiente de estaciones.

El 5 b), al no poderse ajustar a condiciones particulares, introduce un error sistemático.

El 6) si bien responde a las condiciones climáticas al considerar la ETP, no se adapta a ellas al tomar apriorísticamente un valor determinado para la reserva de agua máxima del suelo, usualmente 100 mm.

#### METODO UTILIZADO

En la crítica de los diferentes métodos, expuesta en los párrafos anteriores, se observa que el método 6), método de Thornthwaite, se ajusta a las condiciones climáticas de cada punto si no fuese por la generalización que supone utilizar un valor de la reserva de agua máxima del suelo previamente fijado.

Por todo esto, se ha hecho compatible en este trabajo las indudables ventajas de la fórmula de Thornthwaite con la diversidad climática de la geografía española, sustituyendo el valor de 100 mm., por otros contrastados para las distintas condiciones climáticas de España, considerando cada una de las 10 cuencas hidrográficas como independientes a efectos de cálculo y subdividiéndolas tanto como sea necesario para que, en cada zona, el valor tomado represente los valores reales de aquél para toda ella.

Es preciso advertir, sin embargo, que los valores calculados no responden conceptualmente a la expresión «reserva de agua máxima del suelo», aunque su valor numérico coincida para una gran parte de España. Los valores calculados representan el «Cambio de humedad del suelo a lo largo de un año», que depende de la «reserva de agua máxima del suelo» y de las condiciones climáticas, y expresa la suma de las cantidades de agua que, formando parte de la reserva de agua del suelo, se evapotranspiran desde él. A este cambio de humedad del suelo anual se le llama  $\gamma$ .

#### CALCULO DE $\gamma$

Como se apunta en el apartado anterior, la esencia de este método estriba en obtener un valor del cambio de humedad del suelo en cada punto.

Para ello se calculan los valores reales medios de  $\gamma$ , según se explica más adelante, en subcuencas de bordes impermeables y consumos despreciables; extrapolándolos a continuación al resto de las subcuencas de la cuenca considerada.

La lluvia útil para una subcuenca determinada es igual al volumen de agua que lleva el río que la drena, siempre que la subcuenca tenga bordes impermeables (esto es, no exista interconexión subterránea con las limítrofes) y el aprovechamiento, agropecuario o industrial, de sus aguas sea despreciable, o conocidos.

En este caso, el balance hídrico se puede escribir:

$$P = ETR + Q_i$$

P: Precipitación media anual.

ETR: Evapotranspiración real media anual.

$Q_i$ : Media anual de los volúmenes aforados, equivalente en este caso a la lluvia útil.

Conocidos los valores de P y de  $Q_t$ , se puede ajustar el valor del cambio de humedad en el suelo ( $\gamma$ ) para que la evapotranspiración real obtenida mediante la fórmula de Thornthwaite sea igual a la diferencia  $P - Q_t$ .

Como se dijo en el apartado «Métodos propuestos para el cálculo de la evapotranspiración real», se admite que ésta es igual a la potencial, mientras esté alimentada por las precipitaciones y por la humedad del suelo. Esto es, para meses de evapotranspiración potencial (ETP) menor que la precipitación se evapotranspira todo lo que señala ETP, mientras que para meses de ETP superior a la pluviosidad se evapotranspira todo lo que llueve, más la cantidad necesaria del agua contenida en el suelo, si es que la hubiese.

Por ello se ha dibujado el mapa de  $\Sigma$  (P ó ETP) teniendo en cuenta los datos suministrados por las estaciones termopluviométricas de cada subcuenca, y añadiendo a cada isolínea el valor  $\gamma$  buscado de tal manera que la planimetría del nuevo mapa dé el valor de  $P - Q_t$  para la subcuenca.

#### DESCRIPCION DEL TRABAJO REALIZADO

El cálculo de  $\gamma$ , y en consecuencia el de la lluvia útil, se realizó cuenca por cuenca eligiendo en cada una de ellas un número suficiente de subcuencas con bordes impermeables y aprovechamientos despreciables o conocidos como para que fuesen representativas de las distintas zonas climáticas que existen en cada cuenca.

Para cada una de ellas se eligieron las subcuencas siguientes, determinadas por el número de la estación de aforo que las define\*:

Norte: 6, 21.

Duero: 31, 85, 92.

Tajo: 70, 111, 127.

Guadiana: 203, 211.

Guadalquivir: 50, 73.

Sur: 1, 3, 5, 6, 8, 11, 14, 19, 21, 23, 24, 26, 33.

Segura: 32.

Júcar: 36, 107, 107-32, 112-90.

Ebro: 1, 3, 28-121.

Pirineo Oriental: 2, 23, 31.

\* Según la numeración del Centro de Estudios Hidrográficos.

La cuenca del Sur es un caso excepcional, ya que, debido a lo cambiante de su climatología y a la poca fiabilidad de los datos suministrados por las estaciones de aforo, exige una división muy fina en zonas, siendo necesario tomar muchas subcuencas de comparación para la determinación de  $\gamma$ , habiéndose incluido por ello algunas que no cumplen totalmente las condiciones mencionadas anteriormente como necesarias.

Para las estaciones termopluviométricas de cada subcuenca se halló  $\Sigma$  (P ó ETP).

Se dibujaron los mapas  $\Sigma$  (P ó ETP) afectando a cada isolínea del valor correspondiente.

Se añadieron a cada isolínea del mapa un valor  $\gamma$ , desconocido «a priori», tal que se cumpla:

$$P - Q_t = ETR$$

o, expresado numéricamente:

$$\frac{1000}{25} (P - Q_t) = \Sigma \left( \frac{E_i + \gamma + E_{i+1} + \gamma}{2} \right) S_i$$

Siendo:

P y  $Q_t$ : los valores de las medias pluviométricas y de los volúmenes aforados medios, expresados en  $Hm^3/año$ .

$\frac{1000}{25}$ : Factor de escala.

$E_i + \gamma$ : El valor de una isolínea genérica del mapa de  $\Sigma$  (P ó ETP) +  $\gamma$ .

$S_i$ : La superficie entre las líneas  $E_i + \gamma$  y  $E_{i+1} + \gamma$ , expresada en centímetros cuadrados para un mapa a escala 1 : 500.000.

La resolución de esta ecuación permitió obtener el valor de  $\gamma$  para cada subcuenca.

Para las subcuencas utilizadas, si ha sido correcta su elección, esto es, si sus bordes son impermeables y su aprovechamiento agropecuario o industrial despreciable, es válido suponer que el cambio de humedad del suelo es de  $\gamma$  mm.

Es necesario ahora su extrapolación a las subcuencas próximas y a la totalidad de la cuenca hidrográfica.

EXTRAPOLACION DE LOS VALORES DE  $\gamma$ 

Con las operaciones anteriormente descritas se han hallado unos valores de  $\gamma$  reales para determinadas subcuencas. Esta serie discreta de valores es toda la base del sistema, por lo que hay que extrapolarla no ya a subcuencas vecinas, sino a cada punto de la geografía nacional.

Puesto que al comenzar el trabajo se define que  $\gamma$  sólo es función fundamentalmente de las condiciones climáticas del lugar, esto nos da una pauta para la extrapolación, basada únicamente en criterios climatológicos.

Cabe destacar el caso de algunas zonas, en particular costeras, de muy baja pluviosidad y de elevada evapotranspiración, en las que por dificultades de medida no se pudo tomar ninguna subcuenca de este tipo como patrón, por lo que se acepta, a falta de una mejor determinación de  $\gamma$ , tomar como lluvia útil la deducida de los datos de aforo en los ríos que drenan la zona.

Con la aplicación de todos los criterios anteriores se llega a la siguiente relación de los valores de  $\gamma$

<i>CUENCA</i>	<i>Valores medios de <math>\gamma</math></i>
Norte ... ..	50 mm.
Duero ... ..	120 mm.
Tajo ... ..	125 mm.
Guadiana ... ..	160 mm.
Guadalquivir ... ..	160 mm.
Sur, parte oriental ... ..	10, 100, 160, 260 mm.
parte occidental ... ..	10, 50, 100 mm.
Segura ... ..	40 mm.
Júcar ... ..	50, 150 mm.
Ebro ... ..	10, 100 mm.
Pirineo Oriental ... ..	150 mm.

Y un valor medio de  $\gamma$  para toda España de 130 mm.

En las cuencas con varios valores medios de  $\gamma$ , corresponden, en general, los valores más altos a las zonas de mayor pluviometría.

Como se ve en este cuadro, la idea de tomar un valor  $\gamma$  constante para un país de tan variada climatología como España carece de toda base práctica, ya que los valores hallados experimentalmente oscilan entre 10 y 260 mm., que integrados en toda la superficie darían unos márgenes de error no admisibles.

## DIBUJO DEL MAPA NACIONAL DE LLUVIA UTIL

Una vez elegidos los valores de  $\gamma$  a utilizar, se halla para cada estación termoplumiométrica  $\Sigma (P \text{ ó ETP}) + \gamma$ .

Se obtiene la diferencia  $P - \text{ETR}$  equivalente a la lluvia útil, dibujándose con ello el mapa correspondiente para toda la cuenca hidrográfica y utilizando como base el mapa pluviométrico para tener en cuenta la corrección altimétrica que éste lleva implícita.

Antes de dar por definitivo el resultado hay que comprobar que los valores de  $\gamma$  elegidos para cada estación responden a la realidad del conjunto de la cuenca.

A este nivel es posible despreciar las influencias subterráneas de las cuencas limítrofes, suponiendo que son equivalentes las cantidades de agua que subterráneamente pasan de una cuenca a las adyacentes y de éstas a la primera.

Por otra parte, son conocidos «grosso modo» los consumos de aguas subterráneas (únicos a tener en cuenta, ya que los datos de las estaciones de aforo están corregidos de forma a incluir en ellos los consumos de aguas superficiales) a nivel de cuenca, por lo que la ecuación del balance hídrico global queda:

$$P = Q_t + \text{ETR} + B$$

Siendo  $B$  los consumos reales de aguas subterráneas, esto es: la parte del agua utilizada que no vuelve a los cursos de agua o a los acuíferos, ya que se evapotranspira o retiene de cualquier forma.

La extrapolación será correcta cuando, para los valores de  $\gamma$  utilizados, se cumple esta ecuación. En el caso de que ésta no se verifique, es preciso comenzar nuevamente todo el proceso, procurando obtener nuevos valores de  $\gamma$  en subcuencas más representativas del total de la cuenca.

Como resultado de lo anteriormente expuesto se obtienen 10 mapas de lluvia útil, uno por cada cuenca hidrográfica, a escala 1 : 500.000. El

mapa que se presenta es la reducción fotográfica a escala 1 : 1.000.000 de los mapas de lluvia útil de las cuencas una vez ensamblados.

### CRITICA DEL SISTEMA

En la base de todo el sistema se encuentran la fórmula de Thornthwaite y los datos de pluviometría y aforos, por lo que son éstos y aquélla las fuentes principales del método.

En la fórmula de Thornthwaite (según se ha visto en apartados anteriores) el clima está representado por la temperatura sin hacer mención de otros factores, tales como, por ejemplo, la velocidad del aire o la tensión de vapor de éste, lo que podría introducir errores sistemáticos en el cálculo de la ETP, extremo éste que, por otra parte, no está comprobado.

Sin embargo, estos posibles errores sistemáticos en los valores de la ETP quedarían atenuados o anulados en el cálculo de la ETR, ya que éste se realiza ajustándola a los valores de pluviometría y aforos, siendo por tanto éstos en definitiva los que fijan la precisión del mapa a escala de subcuenca y, por lo tanto, a cualquier otra escala mayor; ahora bien, aunque en la metodología se distinguen dos tipos de subcuencas, las empleadas para el cálculo de  $\gamma$  y aquellas en que éste se extrapola, a efectos de fiabilidad son similares, ya que en todas las subcuencas se comparan los valores de la lluvia útil con los de los datos de aforo.

En cuanto a la fiabilidad a nivel zonal o puntual se ha visto que  $\gamma$  se extiende en el interior de cada subcuenca como una constante, dependiendo el valor utilizado del clima («Método de cálculo», «Extrapolación de los valores de  $\gamma$ ») y de la ulterior comparación con los datos de aforos de forma que teóricamente, y de acuerdo con la hipótesis establecida en este trabajo, en una subcuenca de clima uniforme, el valor de  $\gamma$  utilizado sería válido tanto a nivel de subcuenca como a nivel puntual o zonal.

Sin embargo, existen factores naturales, tales como suelo y vegetación, que influyen realmente en los valores de  $\gamma$  y que están condicionados no sólo por el clima, sino por características tales como la litología del substrato y la «vocación» del suelo hacia un tipo de vegetación u otro. Estos factores naturales introducen modificaciones en los valores reales de  $\gamma$  a nivel zonal o puntual.

Estas variaciones locales del valor de  $\gamma$  son función de la conjunción

vegetación-suelo, pudiendo estimarse, desde un punto de vista puramente subjetivo, en algunas decenas de milímetros.

Es, por tanto, con esta limitación como hay que tomar los valores puntuales de la lluvia útil suministrados por el Mapa. A medida que la zona en estudio aumenta y entran en juego nuevos tipos de vegetación y suelo, las diferencias en más o en menos del valor real de  $\gamma$  respecto a su valor medio se compensan de forma tal que, para una superficie del orden de la centena de kilómetro cuadrado el error desciende por debajo de límites aceptables, tal como se ha comprobado en diversas subcuencas de reducida extensión.

De la misma forma, la influencia relativa de las variaciones de  $\gamma$  disminuye para lluvias útiles crecientes, pudiéndose considerar por ello como más fiables los datos puntuales del Mapa en aquellas áreas de lluvia útil más elevada y, recíprocamente, los datos puntuales disminuyen en precisión a medida que se trate de zonas de menor lluvia útil.

No obstante, se ha incluido en el Mapa como curvas de menor lluvia útil la de 50 mm., en un intento de suministrar información en zonas donde las pequeñas disponibilidades de agua las hacen más preciadas.

Respecto a la fiabilidad de los datos de base pluviométricos y de aforo, se han utilizado los suministrados por los centros oficiales a quienes corresponden, sin someterlos a ningún proceso de corrección, dando, eso sí, más peso a aquellos datos que «a priori» merecían más confianza.

No obstante, se indica la poca exactitud de algunos datos de aforos en zonas de las cuencas del Sur y del Ebro, como consecuencia de la cual se produce una fuerte discontinuidad en los valores de  $\gamma$  hallados.

### ALCANCE DEL MAPA DE LLUVIA UTIL

Podría pensarse en que, para el total conocimiento de los recursos hídricos de la nación y de su distribución, bastaría el conocimiento de las escorrentías totales a partir de un plano de aforos suficientemente completo; sin embargo, esto no es posible si se tiene en cuenta la escorrentía subterránea que comunica cuencas aparentemente independientes desde un punto de vista geográfico.

Por otra parte, de un mapa de aforos sólo sería posible deducir la lluvia útil de una subcuenca como una media para toda ella.

Vemos, por tanto, que de un mapa de lluvia útil realizado exclusiva-

mente con datos de aforo no se podría deducir la distribución espacial de ésta.

El mapa de lluvia útil que se comenta, a pesar de sus inevitables errores de detalle, da una visión realista de la repartición de las disponibilidades potenciales de agua, representando un primer paso para la estimación de la distribución de la evapotranspiración real.

Dentro del Programa de Investigación de Aguas Subterráneas (Plan Nacional de la Minería) ha sido una pieza fundamental utilizada para:

— Calcular la recarga de los sistemas acuíferos subterráneos a partir de coeficientes de infiltración de la lluvia útil, coeficientes comprobados a su vez por los datos suministrados por las estaciones de aforos.

— En las zonas drenadas directamente por el mar o por ríos agua abajo de las estaciones de aforo, calcular los recursos hidráulicos totales.

— Por la diferencia con los volúmenes medidos en las estaciones de aforo, estimar los transvases subterráneos entre cuencas.

#### DATOS DE BASE

En síntesis, los datos utilizados han sido:

— De la publicación «Balance hídrico»\*, las evapotranspiraciones potenciales calculadas por el método de Thornthwaite para 1.153 estaciones con períodos de observación comprendidos entre cinco y veinte años.

Los diferentes períodos de observación para las diversas estaciones han obligado a dar un distinto peso a los datos, dependiendo del número de años de observación, de forma a utilizar como más fiables las estaciones con series más largas.

— Los datos de aforos dados por la publicación de la Comisión de Recursos Hidráulicos (II Plan de Desarrollo Económico y Social).

— Archivo pluviométrico del I. G. M. E. (procedente de las publicaciones del Servicio Meteorológico Nacional) y el Mapa Pluviométrico 1 : 500.000 (1942-43/1962-63).

— Mapa Hidrogeológico Nacional 1 : 500.000 realizado por el I. G. M. E.

\* Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales, Dirección de Materiales. Septiembre, 1967, Madrid.

## MAPA DE RECONOCIMIENTO HIDROGEOLOGICO

Hasta el momento presente no existía en España una cartografía hidrogeológica general que pudiese servir como infraestructura para trabajos de mayor detalle y planificación.

El Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico a escala 1 : 1.000.000 ha intentado llenar esta laguna y aunque habiendo sido realizado dentro de un marco de actuación general, con objetivos más ambiciosos que la creación de una simple cartografía, se la puede utilizar aisladamente, ya que en realidad representa un objetivo final de sí mismo.

En esencia, el Mapa indica la distribución espacial de los materiales potencialmente acuíferos de nuestro país, clasificados con arreglo a cinco grandes grupos. Debido a esto, el carácter del mapa es fundamentalmente cualitativo, aunque la incorporación a él de las principales surgencias naturales aporta un aspecto cuantitativo que permite confirmar «a priori» la existencia de acuíferos allí donde están situados y su importancia relativa.

En las siguientes líneas se explica la metodología seguida en la preparación del Mapa como complemento a la leyenda que en él figura, remitiendo al lector interesado a la descripción detallada de las diversas unidades hidrogeológicas de las distintas cuencas que existen en el correspondiente volumen de las publicaciones del Plan Nacional de la Minería, en su apartado «Programa Nacional de Investigaciones Mineras», Sector Aguas Subterráneas.

## CRITERIO DE REPRESENTACION

Se comprende, y aun más después de realizado el trabajo, que una representación cartográfica de este tipo y a la escala elegida necesita un gran espíritu de simplificación y síntesis y un amplio criterio cartográfico.

Para tratar de agrupar de una manera racional los diversos tipos de unidades hidrogeológicas frente a su distribución geográfica y funcionamiento hidráulico subterráneo, se ha partido del establecimiento de una diferenciación, en superficie, de los materiales acuíferos, la cual ha respondido a los siguientes principios:

- 1.º Los mantos acuíferos subterráneos se ubican en materiales con permeabilidad de diversos tipos, según los cuales varía su comportamiento, posibilidades y métodos de investigación y explotación; por lo tanto, se hace necesario diferenciarlos. Además, un mismo tipo de permeabilidad puede presentar valores muy altos o muy bajos, y por ello se hace necesario hacer una distinción, «grosso modo», de este hecho.
- 2.º La existencia de una formación geológica permeable en superficie no significa necesariamente la existencia de mantos acuíferos en su interior. Asimismo, un acuífero subterráneo no tiene necesariamente los límites de la formación permeable que lo contiene.  
Sin embargo, teniendo en cuenta la escala, es necesario representar, en realidad, los afloramientos de formaciones acuíferas en las que se compruebe la existencia, con más o menos seguridad y precisión, de mantos acuíferos.
- 3.º La comprobación del carácter acuífero de una formación supuesta permeable «a priori» se efectúa observando las salidas naturales o artificiales del agua a través de dicha formación. Por ello, una premisa indispensable para realizar una cartografía adecuada es la observación de pozos, sondeos, manantiales y demás puntos acuíferos.
- 4.º En muchos casos, se conoce la existencia de acuíferos subterráneos cautivos bajo formaciones impermeables, de los que es necesario indicar su extensión horizontal bajo la superficie. En este caso no es la formación acuífera la que se representa, sino la

extensión real del manto artesiano, comprobada mediante sondeos o supuesta de acuerdo con las condiciones geológicas.

- 5.º En muchas zonas de España se acusa la existencia de una serie de acuíferos aislados de pequeña entidad, que sin poder agruparse en forma de unidades extensas pueden resolver algún problema local. No obstante, constituyen un conjunto cuya representación cartográfica no puede ser omitida.

A partir de los principios generales establecidos en estos cinco puntos, se ha preparado una leyenda general, sobre la que se han basado todos los trabajos de campo.

Dicha leyenda establece, en un principio, la diferenciación superficial del territorio nacional en cuatro grandes grupos:

A) Afloramientos de formaciones poco consolidadas, permeables por porosidad intergranular.

Esta denominación agrupa aquellas formaciones cuyos elementos constitutivos dejan entre sí una serie de huecos; dichos elementos son generalmente granulares y normalmente se encuentran muy poco consolidados, aunque en algunos casos puedan estar más o menos cementados.

En este grupo se incluyen aluviones, arenas, areniscas poco consolidadas, conglomerados poco cementados, algunos tipos de molasas, etcétera.

B) Afloramientos de formaciones consolidadas con permeabilidad por fisuración, disolución, karstificación, en ocasiones con porosidad primaria, o efectos mixtos. (Se define como porosidad primaria aquella que se ha producido en el mismo proceso de la formación de la roca, sin que hayan intervenido incidentes tectónicos posteriores. La porosidad intergranular es uno de los tipos de porosidad primaria.)

Se han englobado en este apartado todas aquellas formaciones consolidadas (calizas, dolomías, basaltos, areniscas consolidadas, etc.) cuya permeabilidad responde a las características indicadas.

El caso de las areniscas no fracturadas y permeables se ha incluido en el grupo anterior.

C) Zonas complejas donde afloran conjuntos de materiales de comportamiento hidrogeológico dudoso.

Se trata de áreas en las que existen, aisladas y con recursos y reser-



vas restringidos, una serie de formaciones con mantos acuíferos sin conexión, de poca importancia en general. Ello ocurre concretamente en zonas altamente trastornadas geológicamente, y en otras donde los cambios laterales de facies hacen muy difícil establecer los niveles permeables con precisión.

**D) Zonas donde afloran materiales prácticamente impermeables.**

La denominación no excluye la existencia, dentro de estas áreas, de algún pequeño manto acuífero. Por supuesto, al hablar de afloramientos es necesario aclarar que dentro de cualquiera de los tipos A), B), C) y D) pueden existir acuíferos en profundidad, generalmente de tipo cautivo o artesiano, surgente o no.

Como se comprende, esta división es muy amplia y necesita una mayor especificación, sobre todo en lo que se refiere a las formaciones permeables. También es necesario representar los mantos cautivos, que en muchas ocasiones se encuentran bajo formaciones superficialmente impermeables. Por lo tanto, se ha establecido la siguiente clasificación definitiva, que es la que figura como leyenda en el Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico:

**A) Afloramientos de formaciones poco consolidadas, permeables por porosidad intergranular.**

A<sub>1</sub>) Formaciones que sustentan mantos acuíferos de elevada transmisividad: aluviones fluviales con buen espesor, y alimentación asegurada, con captaciones importantes. Arenas poco cementadas muy permeables, etc.

A<sub>2</sub>) Formaciones del mismo tipo, pero con valores menores de transmisividad, bien sea por falta de permeabilidad o por falta de espesor. Areniscas no fisuradas, arenas arcillosas, formaciones detríticas no fisuradas (algunas molasas), aluviones de poco espesor o con arcilla, fanglomerados arcillosos, etc.

**B) Formaciones consolidadas permeables por fisuración, disolución, karstificación o efecto mixto.**

B<sub>1</sub>) Elevada permeabilidad. Calizas o dolomías muy fisuradas o karstificadas (a veces con porosidad primaria). Manantiales importantes. Grupos de afloramientos alternantes calcá-

reo margosos, pero que, a efectos de captación, pueden comportarse como un conjunto con elevados valores de transmisividad.

B<sub>2</sub>) Permeabilidad restringida, alternancia de calizas y margas, calizas o dolomías poco fisuradas, calizas margosas fisuradas con permeabilidad media-baja. Conglomerados fisurados y cementados con muy débil permeabilidad primaria. Algunos tipos de molasas, calizas del páramo, etc.

B<sub>3</sub>) Rocas cristalinas, metamórficas y volcánicas fisuradas. Cuarzitas, basaltos, coladas de lava, etc., con manantiales. La transmisividad de los acuíferos en estas formaciones es muy variable, pero normalmente no llega a alcanzar los valores más bajos del grupo B.

**C) Zonas complejas donde afloran conjuntos de materiales de comportamiento hidrogeológico dudoso.**

En este apartado no se hace ninguna diferenciación especial, aunque como se verá inmediatamente, las zonas de extensos afloramientos graníticos podrían incluirse tanto en este grupo como en el siguiente.

**D) Regiones prácticamente impermeables.**

Para diferenciar de alguna manera las diversas formaciones impermeables, algunas de las cuales tiene un significado especial, se ha establecido la siguiente clasificación:

D: Formaciones impermeables en general (mesozoicas y terciarias).

P: Formaciones paleozóicas y precámbricas impermeables, incluidas las rocas metamórficas y cristalinas intrusivas, excepto granitos.

K: Trías arcilloso, salino o yesífero impermeable.

G: Zonas donde afloran extensamente granitos. (En general, rocas intrusivas ácidas o intermedias.)

Es necesario indicar que en estas zonas graníticas pueden existir pequeños acuíferos libres sobre zonas arenosas de alteración superficial. Los recursos, en la inmensa mayoría de los casos, son muy restringidos, mucho más que en las zonas que se han clasi-

ficado como de mantos aislados, en las que en algún punto, y en circunstancias muy favorables, sería posible la captación de algún caudal interesante.

También debe resaltarse el importante papel que juega el keuper salino y yesífero, como barrera hidrogeológica, lo que ha impulsado a darle personalidad en la representación, facilitando la comprensión del mapa.

#### E) *Mantos cautivos.*

Hasta el momento, la leyenda orientativa se ha referido a afloramientos superficiales de diversos tipos de formaciones. Pero como ya se ha dicho, en muchas ocasiones existen mantos acuíferos en carga, artesianos o cautivos, surgentes o no, entendiendo bajo estas denominaciones corrientemente empleadas aquellos acuíferos en los que la superficie piezométrica se encuentra por encima de la superficie techo del propio manto.

Se trata, por lo tanto, de un agua confinada a presión entre dos niveles, uno superior y otro inferior, más o menos impermeables en comparación con el que sustenta el acuífero.

La existencia de estos acuíferos únicamente puede ser asegurada mediante sondeos y, por tanto, el criterio de representación es relativamente sencillo. Bastaría indicar la zona bajo cuya superficie un sondeo alcanzaría el manto en carga. El tipo de permeabilidad de la formación en la que se asienta el manto cautivo, se indica diferenciando los tipos A) y B) de la leyenda general.

El criterio general de representación se basa, pues, en la cartografía de los afloramientos de formaciones permeables, de zonas complejas y de zonas impermeables, así como la de áreas bajo las que existen probablemente o con toda seguridad mantos en carga.

Se consigue de esta manera una imagen de la distribución superficial (y subterránea en muchos casos) de las formaciones acuíferas.

Podría alegarse que un simple Mapa Litológico es suficiente para este objeto, aunque ello es, evidentemente, incorrecto.

Según se indica en el principio 2.º, la existencia de una litología determinada no implica automáticamente la de mantos acuíferos en su interior. La existencia de pozos, sondeos, manantiales o cualquier otro tipo de surgencia de agua subterránea es la única confirmación posible.

Por lo tanto, el Mapa realizado bajo estos principios es un tipo especial de Mapa Hidrogeológico (no un simple Mapa Litológico transformado) que, basándole en un reconocimiento de campo de las características permeables de los materiales, y de los manantiales que de ellos surgen, confirma su carácter acuífero. Así, al no indicar la morfología de los mantos acuíferos, sino sólo su posible existencia, referida a los límites de las formaciones que los contienen, no deberá considerársele como un Mapa de Mantos, sino exclusivamente como un Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico. De aquí el título con que figura.

El criterio de representar afloramientos es doblemente valioso, pues permite trabajar sobre superficies de infiltración directa del agua de lluvia, fundamento de los cálculos para balances y estimación de caudales subterráneos.

#### REALIZACION PRACTICA DE LA CARTOGRAFIA

La aplicación práctica del criterio elegido basado en los principios expuestos ha requerido fundamentalmente una recopilación zonal de la cartografía geológica e hidrogeológica existente a diversas escalas y un reconocimiento de campo basado en la observación directa y en los datos aportados por manantiales, pozos y sondeos.

La realización simultánea, dentro del Instituto Geológico y Minero de España, de la síntesis geológica de conocimientos existentes a escala 1 : 200.000 ha facilitado el trabajo de cartografía permitiendo una mayor precisión en la delimitación de las formaciones, dejando más tiempo para la observación en campo de las características hidrogeológicas.

El trabajo concreto, tanto de cartografía como de ubicación de puntos de agua (manantiales, pozos, sondeos, etc.) presenta las siguientes características:

##### a) *Escalas:*

Cada zona ha sido representada finalmente a escala 1 : 500.000, empleando como base topográfica de referencia las Hojas a dicha escala del Atlas Geográfico de España formado por el Instituto Geográfico y Catastral.

El «Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico», a escala 1 : 1.000.000, se ha obtenido por reducción directa de cada una de las zonas, con ligeras

simplificaciones debidas tan sólo a dificultades técnicas de dibujo e impresión.

Para el trabajo de reconocimiento de campo se ha empleado, en la mayor parte de las ocasiones, las Hojas de síntesis geológica 1 : 200.000.

La escala 1 : 50.000 se ha empleado, casi exclusivamente, para la ubicación de puntos acuíferos.

En muchas ocasiones se han empleado, sobre todo para encuadre general, Mapas a escalas 1 : 100.000, 1 : 400.000 y 1 : 500.000.

#### b) *Aplicación del criterio hidrogeológico.*

A la vista del reconocimiento de campo y de los datos proporcionados por los puntos acuíferos, se ha decidido la clasificación de las diversas formaciones según la leyenda general, transportando esta cartografía a la escala final de presentación, 1 : 500.000, permitiéndose, en favor de una representación más sintética, ciertas simplificaciones en la delimitación de los afloramientos.

Todo ello ha permitido obtener no sólo una visión más o menos detallada, de acuerdo con la escala escogida, de los afloramientos de formaciones acuíferas y la extensión de los mantos cautivos, sino también disponer de la información necesaria para tener una idea aproximada del funcionamiento del agua subterránea a través de los conjuntos de formaciones acuíferas representadas.

#### c) *Puntos acuíferos.*

Para comprobar la existencia de mantos acuíferos, tanto de tipo libre como cautivo, se han utilizado datos de unos 9.500 puntos, entre manantiales, pozos, sondeos y galerías.

Los puntos cuyos datos se han empleado han sido seleccionados con objeto de conseguir la máxima representatividad.

Se han visitado, después de una recopilación previa, los manantiales más interesantes desde el punto de vista de caudal, los sondeos mejor equipados y con altos caudales, las grandes zonas de captación, etc., todo ello sin olvidar los sondeos profundos de petróleo y aquellos que, aunque aislados, pudiesen ofrecer información sobre alguna formación sujeta «a priori» permeable.

Evidentemente, el criterio de observación ha sido variable de unas cuencas a otras, aun siguiendo una normativa general de recopilación previa y posterior selección y visita.

Esta reunión previa de datos ha permitido obtener una visión general

de las necesidades para realizar una estadística correcta total del conjunto del territorio español.

Para complementar el Mapa se han representado sobre él los manantiales naturales, repartidos en cuatro categorías: con caudal próximo a los 10 litros/segundo, con caudal medio entre 10 y 100 litros/segundo, entre 100 y 1.000 litros/segundo y superior a 1.000 litros/segundo. En esta representación, y con objeto de simplificar zonas recargadas, o resaltar otras que serían anuladas por la escala, se han reunido a veces grupos de manantiales bajo un sólo signo, indicando el caudal suma del de todos ellos.

La información sobre puntos acuíferos ha sido facilitada por:

- Archivos del Instituto Geológico y Minero de España y del Instituto Nacional de Colonización.
- Ayuntamientos, Diputaciones Provinciales y Gobiernos Civiles.
- Delegaciones del Ministerio de Industria (Sección de Minas) y del Instituto Nacional de Colonización.
- Hermandades de Labradores y Ganaderos, Comunidades de Regantes.
- Empresas de sondeos, empresas petrolíferas, empresas particulares de estudio y gran número de Entidades y personas particulares.

## **MAPA DE SINTESIS Y DE POTENCIALIDAD DE LOS SISTEMAS ACUIFEROS**

Los objetivos perseguidos por el Programa «Mapa Hidrogeológico Nacional» hacían necesaria una labor de síntesis, a escala nacional, que definiera, delimitara y cuantificase los grandes acuíferos españoles; una vez realizada se podría ya establecer los programas de investigación de ellos para integrarlos, finalmente, dentro de una planificación general.

Este trabajo ha constituido, pues, el resumen y resultado final, eminentemente cuantitativo, de esta primera etapa de creación de infraestructura hidrogeológica.

Para llevarla a cabo era preciso, previamente, definir el propio concepto de sistema, concepto que tal como se ha concebido hace referencia, simultáneamente, a dos criterios distintos: uno, espacial y, otro, al de investigación y planificación.

En efecto, estos criterios responden a dos necesidades:

- La primera, al hecho de que, en general, un grupo de mantos acuíferos, superpuestos en el espacio, se diferencian y son independientes de otros conjuntos contiguos o próximos, lo que obliga a agruparlos.
- La segunda, que para poder programar la investigación es necesario también reunir los acuíferos de manera que constituyan unidades prácticas de estudio.

Ambos criterios llevaron a definir el sistema acuífero como «el conjunto de uno o varios acuíferos relacionados o no entre sí, que extendiéndose sobre un mismo territorio, constituyen una unidad práctica de investigación o de explotación».

Se han delimitado y cuantificado 75 sistemas acuíferos en la Península y 12 en la España Insular, que representan las principales acumulaciones de aguas subterráneas del país; ahora bien, aparte de ellos, existen pequeños acuíferos diseminados por toda la geografía española representados por las superficies amarillas y grises del Mapa que no pueden, a esta escala, ser objeto de una definición ni, por consiguiente, programarse su investigación, pero que, integradas sus potencialidades, arrojan unas cifras verdaderamente importantes, quizá del orden del 35-40 por 100 del total de la escorrentía subterránea española. Estos acuíferos diseminados sirven en la actualidad, o pueden servir en el futuro, para resolver problemas y satisfacer demandas locales o zonales.

#### METODOLOGIA EMPLEADA

El Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico obtenido según las directrices explicadas en el apartado correspondiente, representaba una distribución de afloramientos de formaciones potencialmente acuíferas y mantos en carga en profundidad. Constituía, pues, una base apropiada, junto con el Mapa de Lluvia Útil y el resultado de los análisis de los hidrogramas de las estaciones de aforos, para lograr el objetivo perseguido.

El Mapa de Síntesis y de Potencialidad de los sistemas acuíferos, realizado a escala 1 : 500.000 y que se presenta a 1 : 1.166.000 para su más fácil manejo, es el resultado de dos tipos de trabajo:

- Síntesis hidrogeológica de los sistemas acuíferos.
- Evaluación de la potencialidad de dichos sistemas, que en la mayor parte de los casos, viene representada por la cifra de volumen medio anual de agua que circula a través de ellos (escorrentía subterránea).

Por consiguiente, el trabajo ha tenido dos aspectos, netamente diferenciados pero dependientes uno de otro, que a continuación se analizan:

#### Síntesis hidrogeológica de los sistemas acuíferos

En una primera fase se dividió el territorio nacional en tres categorías:

- Zonas en donde existen unidades hidrogeológicas definidas e importantes.
- Zonas con acuíferos aislados, de pequeña extensión, con interés preferentemente local (amarillo en el Mapa).
- Zonas en las que prácticamente no aparecen acuíferos (gris en el Mapa).

Partiendo de esta diferenciación, se obtuvo una primera distribución espacial, donde la delimitación de las zonas segunda y tercera —que no se pueden tener en cuenta en una planificación general del país— no presentó dificultades especiales.

Para agrupar y sintetizar las distintas unidades hidrogeológicas existentes en la zona primera, en una segunda fase se tuvo que apelar al concepto de Sistema de la manera definida precedentemente y que hace referencia a dos criterios: espacial y el de investigación y planificación.

Es evidente que para la delimitación de los sistemas ha sido necesario basarse especialmente en la cartografía hidrogeológica realizada; las formaciones impermeables que definen límites precisos, la litología, la tectónica y los drenajes naturales han sido criterios guías.

El concepto de sistema tal como se ha establecido lleva aparejada la noción de que dentro de él los acuíferos, aunque pudiendo ser independientes unos de otros, funcionan como un todo desde el punto de vista de la alimentación y del drenaje: ello no excluye la posibilidad de que varios sistemas estén relacionados entre sí, como ocurre, entre otros, con algunos de la provincia de Almería y en los números 19, 23 y 24 de la Cuenca del Guadiana, pero conservando cada uno de ellos personalidad definida en relación con su recarga.

Se ha intentado que este Mapa sea la expresión sintética, basada tanto en datos de campo como hidrodinámicos cuantificados, de las grandes unidades hidrogeológicas españolas agrupadas en forma que su estudio pudiera realizarse coherentemente.

La leyenda del Mapa, que recoge lo expresado y en donde se ha querido resaltar la importancia que dentro de cada sistema tienen los dis-

tintos materiales donde se almacenan los principales acuíferos, ha quedado establecida de la siguiente manera:

1. Sistemas acuíferos en los que predominan mantos en formaciones no consolidadas, permeables por permeabilidad intergranular.
2. Sistemas acuíferos en los que predominan los mantos en formaciones fisuradas.
3. Sistemas acuíferos en los que los mantos con permeabilidad por fracturación y por porosidad intergranular se encuentran en relación y deben estudiarse en conjunto.
4. Zonas con mantos aislados.  
De importancia secundaria desde el punto de vista de planificación, ya que no forman unidades concretas. Se incluyen en este grupo una serie de territorios con pequeños acuíferos de tipos muy diversos, repartidos irregularmente.
5. Zonas, en general, sin mantos acuíferos.  
Esta denominación no implica la inexistencia absoluta de pequeños acuíferos.

En el Mapa (que lleva un número de identificación para cada uno de los sistemas acuíferos) se ha representado, una vez realizado el proceso de tratamiento de datos, la cifra de su potencialidad en aguas subterráneas, obtenida según se explica en el apartado siguiente.

#### Evaluación de la potencialidad de los sistemas

El trabajo ha tenido dos aspectos diferentes, aunque uno ha sido consecuencia del otro. El primero ha consistido en la evaluación de la escorrentía subterránea de las aportaciones de los ríos, a partir del análisis de los hidrogramas; el segundo, y basado en parte en lo anterior, en la cuantificación propiamente dicha de la alimentación de los sistemas acuíferos.

#### Obtención de la escorrentía subterránea de los ríos.

El valor de la escorrentía subterránea  $Q_b$  está ligado a la noción del caudal de base, que se define como: «la escorrentía del depósito subterráneo que va a parar a los ríos» (U. P. Singh) (\*). La determinación de

este caudal de base es más o menos precisa en función de diversos factores, tales como geológicos, climáticos, morfológicos, etc. La precisión buscada depende del objetivo que se pretende alcanzar.

Generalmente, se relaciona el caudal de base al caudal de estiaje mensual  $Q_e$ , suponiendo que las aportaciones subterráneas son constantes a lo largo del año e iguales a dicho caudal:  $Q_b = 12 Q_e$ .

La evaluación de  $Q_b$  y  $Q_e$  se realizó a partir de los datos suministrados por 135 estaciones de aforo (\*) repartidas por la geografía nacional, de las cuales se tenían datos corregidos en el sentido de restablecer la situación natural de los ríos, alterada por las derivaciones de agua de los canales, presas, etc.

Para cada una de las estaciones se han construido las curvas caudales-tiempo a partir de las medias mensuales de diecisiete años (período 1945-1961). Estos diagramas, aunque no son verdaderos hidrogramas, en la práctica se pueden considerar como tales a los efectos perseguidos. En efecto, la comparación establecida con los resultados obtenidos a partir de hidrogramas elaborados mes por mes a lo largo de diez años arroja cifras que se diferencian entre ellas en no más de 10-15 por 100, diferencia que está dentro del margen de error que originan la precisión de los datos suministrados por las propias estaciones de aforo.

Por ejemplo, para la estación número 24 en el río Segre, en Lérida, cuya superficie era representativa de las dimensiones medias de las subcuencas estudiadas, se obtuvieron los siguientes resultados:

Caudal de base obtenido a partir de hidrograma, 1.486 Hm.<sup>3</sup>; caudal de base sacado de diagramas, 1.380 Hm.<sup>3</sup>

Una vez realizada esta labor se intentó cuantificar el flujo subterráneo de una manera más precisa, elaborando un procedimiento basado en las siguientes hipótesis (referidas a un diagrama tipo, figura número 1):

- El diagrama a partir de  $Q_0$ , punto de inflexión de la curva de descenso, refleja, «grosso modo», la curva de vaciado de un embalse subterráneo, curva que tiene por expresión analítica la de  $Q = Q_0 e^{-\alpha t}$
- El retardo existente entre el momento de estiaje del río  $t_0$  (B) y el de la escorrentía subterránea mínima  $t_0$  (C) es igual al que existe entre la época en que se produce el máximo de aportaciones subterráneas al río,  $t''_0$  ( $Q_0$ ), y el de la escorrentía total,  $t_m$  ( $Q_m$ ).

\* «Some factors effecting base flow. Water Resources Research. Vol. 4, n.º 5, 1968.

\* Comisión de Recursos Hidráulicos. II Plan de Desarrollo Económico y Social.

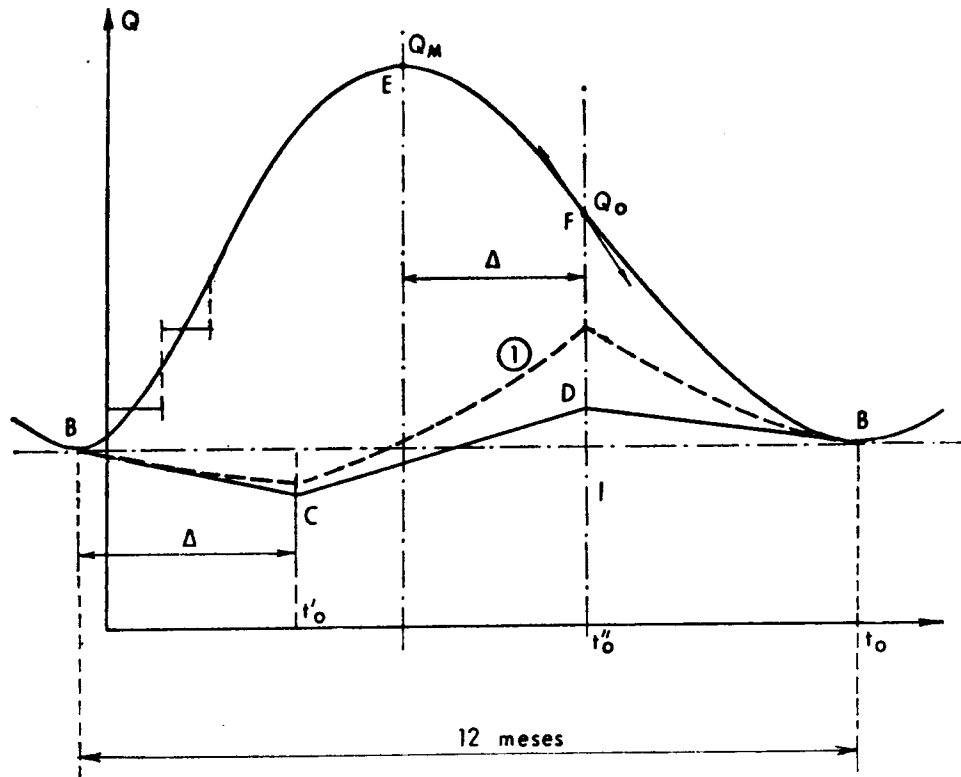


Figura 1

Ambas hipótesis intentan tener en cuenta las características que presentan las circulaciones en régimen superficial y subterráneo, despreciando la inercia propia de los sistemas hidrográficos; dichas hipótesis han permitido suponer que el valor de la escorrentía subterránea, por defecto, viene representada por la poligonal BCDB (figuras números 1 y 2), formada por la tangente en B a la curva de vaciado del embalse subterráneo hasta su intersección con las ordenadas en  $t'_o$  y  $t_o$ , respectivamente. (En la figura número 1 la curva número 1 sería la representación teórica del flujo subterráneo.) El valor de la escorrentía subterránea se obtiene directamente construyendo la poligonal BCDB de la forma definida anteriormente. Para el cálculo analítico se opera a partir de la curva de vaciado  $Q = Q_e \cdot e^{-\alpha t}$ ; la ecuación de la tangente a esta curva, en el punto

to B, tomando como eje de ordenadas la vertical que pasa por  $Q_o$  ( $t''_o = 0$ ), sería:

$$\frac{Q - Q_e}{t - T} = -\alpha Q_e$$

$$Q = -\alpha Q_e \cdot t + \alpha Q_e \cdot T + Q_e$$

$$Q = Q_e (\alpha T + 1) - Q_e \cdot \alpha t$$

$$\text{Para } t = 0, \quad Q = Q_{bo} \text{ (punto D)}$$

$$Q_{bo} = Q_e (1 + \alpha T)$$

$$\text{Para } t = T + \Delta, \quad Q_b = Q'_{bo} \text{ (punto C)}$$

$$Q'_{bo} = Q_e (1 - \alpha \Delta)$$

El volumen total de agua subterránea que se vierte al río se obtiene hallando el área de la superficie rayada en la figura número 2.

$$Q_B = (Q_{bo} + Q'_{bo}) \left( \frac{T + \Delta}{2} + \frac{12 - (T + \Delta)}{2} \right)$$

$$\underline{\underline{Q_B = 12 Q_e + 6 Q_e \cdot \alpha (T - \Delta)}}$$

Expresión analítica de flujo subterráneo drenado por el río y que muestra que, al menos, los siguientes parámetros influyen sobre el volumen de la escorrentía subterránea.

$Q_e$ : Caudal de estiaje.

$\Delta$ : Retardo, que depende de las características físicas del terreno: saturación, permeabilidad, etc.

$T$ : Tiempo en que la escorrentía subterránea es preponderante frente a la escorrentía superficial  $Q_s$ .

$\alpha$ : Forma de la curva de descenso del hidrograma, función de las condiciones topográficas, de vegetación y de las variaciones del caudal  $Q$ .

Se observa, pues, que este procedimiento tiene en cuenta muchos más factores que el anterior, cuando solamente se consideraba el caudal de base,  $Q_e$ : por ello, siempre que la forma de los hidrogramas lo han permitido, se ha empleado este método para el cálculo del flujo subterráneo de los ríos.

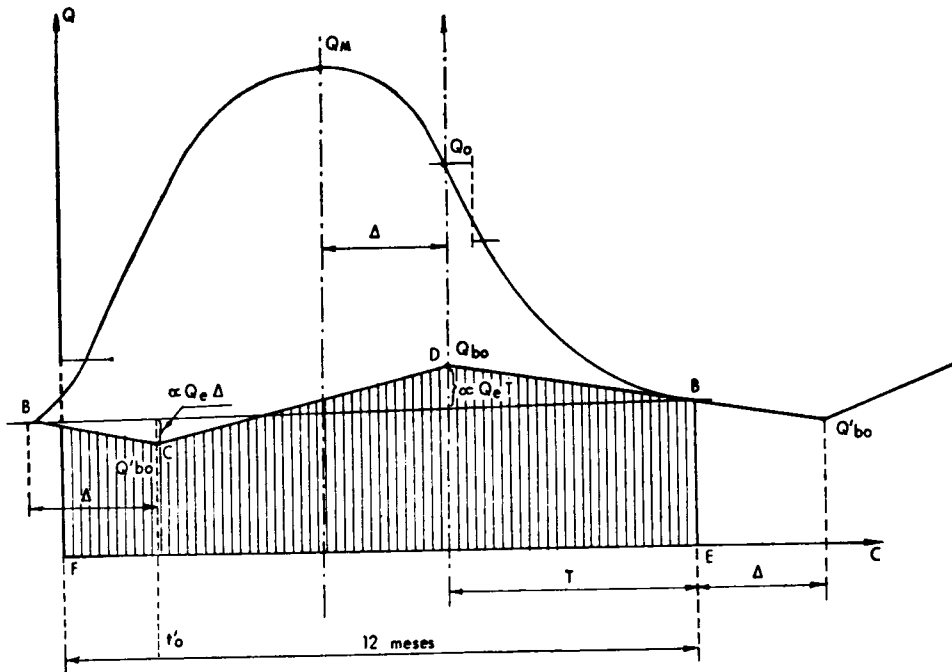


Figura 2

#### Cuantificación de la escorrentía subterránea de los sistemas

Los acuíferos subterráneos, en definitiva, viene condicionados, de una parte, por los factores litológicos y estructurales —geológicos— y de otra, por las precipitaciones y la climatología; al mismo tiempo su existencia se refleja obligatoriamente, salvo casos particulares, en las redes de drenaje superficial. Hay siempre una relación, dejando a salvo problemas concretos de transferencias a otros sistemas hidrográficos o de salida directa al mar, entre la lluvia útil, el coeficiente de infiltración de ésta —que depende fundamentalmente de la litología— y la escorrentía subterránea de los acuíferos que van a parar a los ríos. (De ahí la necesidad previa, para realizar esta etapa, de disponer del Mapa de Reconocimiento Hidrogeológico, del de Lluvia Útil y de los valores de la escorrentía subterránea de los ríos.)

Todo ello ha hecho posible cuantificar la recarga natural de las grandes unidades hidrogeológicas, previamente definidas, a partir de coeficientes de infiltración de la lluvia útil asignadas a las zonas permeables de los acuíferos, coeficientes comprobados y eventualmente corregidos con los valores obtenidos de la escorrentía subterránea de los ríos en las estaciones de aforo.

De un lado se dio a las distintas formaciones permeables de los Sistemas valores máximos y mínimos para los coeficientes de infiltración de la lluvia útil, y a partir de ellos se calcularon los volúmenes infiltrados en las áreas de aquéllas, comprendidas dentro de una misma subcuenca hidrográfica, que tuviese estación de aforo en la que previamente se había calculado la escorrentía subterránea siguiendo los métodos expuestos anteriormente.

La comparación de ambos resultados —los suministrados por las estaciones de aforo y los obtenidos a partir de coeficientes de infiltración supuestos— ha servido para determinar, por aproximaciones sucesivas, los valores más representativos de estos últimos en cada una de las formaciones permeables existentes en los acuíferos; ello ha permitido evaluar la infiltración directa de la lluvia, lo que representa para la mayoría de los sistemas prácticamente la totalidad de su recarga natural, teniendo esta significación los números encerrados dentro de círculos en el Mapa de Síntesis. Cuando no es así, es decir, cuando la alimentación a partir de la lluvia representa solamente parte de la recarga total del sistema, se ha indicado en el referido Mapa enmarcando las cifras dentro de semicírculos.

Tal es el caso de los sistemas número 14, acuíferos detríticos de Madrid; número 23, acuíferos detríticos de La Mancha, y los detríticos de la provincia de Almería, entre otros, donde la infiltración procedente de la escorrentía superficial o de las aportaciones subterráneas procedentes de otros sistemas significan una parte importante de la recarga total.

La metodología puesta a punto y aplicada por el Instituto Geológico y Minero de España —creemos que por primera vez a escala de un país— es similar a la empleada por los ordenadores: llegar a resultados por aproximaciones sucesivas y reiterativas. La estimación de la recarga natural se ha obtenido de esta forma a partir de cifras obtenidas en direcciones diferentes, que van rectificándose hasta hacerlas coincidir.

Ello ha supuesto un trabajo largo y laborioso; ha requerido el manejo de numerosos datos; un esfuerzo de planimetría grande y el análisis ponderado de distintos factores.



Pero gracias a él, se han logrado resultados cuantitativos en un trabajo donde uno de sus aspectos era eminentemente cualitativo, y ha suministrado la base firme y necesaria para poder llegar, en una segunda fase, a la realización del «Programa de Investigación de los Recursos Subterráneos» de nuestra Nación, objetivo final que se había señalado el Instituto Geológico y Minero de España.





**MAPA DE RECONOCIMIENTO HIDROGEOLOGICO DE LA ESPAÑA PENINSULAR, BALEARES Y CANARIAS**

PUBLICADO POR EL INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA

BAJO LA DIRECCION DE D. JUAN ANTONIO GOMEZ ANGULO

FORMADO POR: Barrio, J. M.; Barrio, A.; Benito, C.; Cano, J. E.; D. Rivas, J. M.; G. Carbon, A.; Garcia Rodriguez, J. J.; L. del Campo, E.; de Lencina, A.; Ochoa, J. L.; Pineda, F.; P. Meléndez, M.; Ponce, J.; Ponce, J. J.; R. Cid, C.; Sainza, E.; San José, M. A.; de Yebra, M.

ELABORADO DENTRO DEL PLAN NACIONAL DE LA MINERIA EN EL MARCO DEL PROGRAMA "MAPA HIDROGEOLOGICO NACIONAL" PRIMERA EDICION MADRID, 1971

CONTRIBUCION AL DECENIO HIDROLOGICO INTERNACIONAL

ESCALA 1:1.000.000

**LEYENDA**

- FRONTERAS POLITICAS**
- A-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR PROSPECCION GEOLÓGICA, SISMOLÓGICA O CARBONÍFUGA**
- B-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION O INVESTIGACION DE CUENCA Y ACUÍFERO DE ABASTECIMIENTO DE LAS CIUDADES, FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- C-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- D-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- E-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- F-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- G-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- H-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- I-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- J-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- K-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- L-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- M-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- N-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- O-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- P-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- Q-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- R-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- S-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- T-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- U-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- V-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- W-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- X-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- Y-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**
- Z-CONOCIMIENTO DE FORMACIONES PERMEABLES POR OBSERVACION DE FUENTES, SEQUEOS, ETC.**



**MAPA DE SINTESIS DE SISTEMAS ACUIFEROS  
DE  
ESPAÑA PENINSULAR, BALEARES Y CANARIAS**

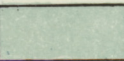
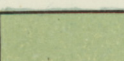
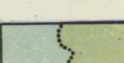
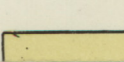
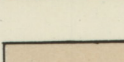




publicado por el  
**INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA**

bajo la Dirección de  
**D. Juan Antonio Gómez Angulo**

Formado por la División de Aguas Subterráneas en el marco del Programa  
"Mapa Hidrogeológico Nacional", elaborado dentro del Plan Nacional  
de la Minería.

**Año 1971**

CONTRIBUCION AL DECENTIO HIDROLOGICO INTERNACIONAL

-  Sistemas en los que predominan acuíferos en formaciones permeables por porosidad intergranular.
-  Sistemas en los que predominan acuíferos en formaciones permeables por fisuración.
-  Sistemas mixtos.
-  Zonas con acuíferos aislados.
-  Zonas prácticamente sin acuíferos.
-  300 Valor en litros/año de la recarga natural subterránea total por sistema acuífero.
-  60 Valor en litros/año de la recarga subterránea parcial del sistema acuífero, exclusivamente a partir de infiltración directa por agua de lluvia.
-  35 Número de orden del sistema acuífero.
-  Límite de cuenca hidrográfica.

ESCALA  
0 1 2 3 4 5 10 15 20 Mm.





