

RELACION HIDROGEOLOGICA ENTRE EMBALSES CONSTRUIDOS EN CALIZAS Y ACUIFEROS EN LA CUENCA DEL JUCAR

Por JUAN M. ARAGONES

Ingeniero de C., C. y P.
Servicio Geológico de Obras Públicas.
Sección de Estudios Hidrográficos.

A. SAHUQUILLO

Doctor Ingeniero de C., C. y P.
Servicio Geológico de Obras Públicas.
Sección de Estudios Hidrográficos.

De los 39 embalses construidos o en construcción en la cuenca del Júcar (España), 36 están total o parcialmente en contacto con terrenos calcáreos. Se han analizado desde el punto de vista hidrogeológico las relaciones entre los embalses y los acuíferos próximos conectados con ellos, utilizando la metodología seguida en los estudios de aguas subterráneas.

El volumen anual de filtraciones en los embalses estudiados es relativamente reducido y representa apenas un 5 por 100 de las aportaciones anuales reguladas por dichos embalses. Las filtraciones más importantes se producen en los embalses que se encuentran temporal o permanentemente colgados respecto a los acuíferos.

La explotación mediante pozos, de los acuíferos conectados hidráulicamente con los embalses, puede provocar un aumento de las pérdidas por filtración en ellos. En otros casos la explotación conjunta de embalses y acuíferos presenta ventajas tales como aumentar la capacidad útil de embalse, facilitar la distribución del agua, etc., que podrían reducir, e incluso trocar en mejoras, los problemas planteados por las pérdidas, ahorrando cuantiosas inversiones en tratar de impermeabilizar los embalses. Por último, los embalses permeables pueden ser un elemento eficaz de recarga artificial de acuíferos, además de servir para laminación de avenidas.

1. INTRODUCCION

El elevado número de embalses en terrenos calcáreos existentes en España, unos 150, y la relación que hay entre muchos embalses superficiales y acuíferos explotados o susceptibles de explotación, hizo que el Servicio Geológico de Obras Públicas se interesase en estudiar estas relaciones en los embalses ya construidos, de tal forma que permitiese desarrollar una metodología aplicada a ellos y a los que estuviesen en fase de proyecto.

La finalidad del estudio es doble:

- Conocer los efectos que la explotación de los acuíferos relacionados con un embalse puede ocasionar en las posibles filtraciones de éste.
- Estudiar las ventajas que podría proporcionar la explotación conjunta del embalse superficial y el acuífero.

La primera etapa del estudio, terminada recientemente, ha sido de inventario y análisis de los datos existentes acerca de los embalses en la cuenca del Júcar (SGOP-1974). El comenzar por esta cuenca se justifica por el elevado número de embalses en terrenos calcáreos —36 de los 39 embalses existentes en ella— y por la intensa demanda de agua en esta cuenca mediterránea, que ha de-

terminado un aprovechamiento muy intenso de las aguas superficiales y los acuíferos de la región.

4

2. PROBLEMATICA DE LOS EMBALSES PERMEABLES

La metodología sobre los reconocimientos y estudios geológicos previos y durante la construcción y puesta en explotación de un embalse, con objeto de definir la razonable estanqueidad de la cerrada y el vaso, así como las zonas con posibles pérdidas y el proyecto y ejecución, en su caso, de las obras de corrección del terreno, vienen siendo aplicadas intensamente desde hace ya muchos años.

El objetivo del estudio que presentamos no es el de hacer un análisis de las particularidades geológicas de los embalses en terrenos calcáreos de la cuenca del Júcar, que está hecho con suficiente detalle en la mayoría de los embalses existentes; tampoco hemos abordado los problemas geotécnicos que presenta la creación de estos embalses, cuyo estudio figura en el proyecto particular de cada uno de ellos. Lo que se pretende es analizar las relaciones entre los embalses y los acuíferos relacionados con ellos desde el punto de vista hidrogeológico, y con la metodología utilizada en los estudios de aguas subterráneas.

Los problemas que plantea un embalse permeable desde el punto de vista del proyectista y usuario, fueron desarrollados hace ya más de cuarenta y cinco años por un ilustre profesor e ingeniero español (Sáenz García, 1929). Ante los temores y recelos que la construcción de embalses en calizas provocaba en los ingenieros hidráulicos españoles, que tenían presentes nombres como Santa María de Belsué, Foix Montejaque, Camarasa, etc., y que en muchos casos llevaba al rechazo de obras cuya ejecución hubiera producido indudables beneficios, el autor abogaba por el análisis detallado de cada caso particular, estimando en la medida de lo posible la importancia de la filtración hipotética y el coste probable de evitarla.

El desarrollo mucho más reciente de la Hidrogeología, que permite el estudio y evaluación de las características geométricas, hidráulicas y de funcionamiento de los acuíferos, puede ayudar a la resolución de los problemas que plantean los embalses permeables. La explotación conjunta de estos embalses y los acuíferos recargados por ellos puede presentar ventajas tales como aumentar la capacidad útil de embalse; aprovechar los acuíferos como elementos de transporte, haciendo pozos en las zonas de consumo del agua y ahorrando conducciones y canales de distribución; obtener agua potable, que no necesita tratamiento por el efecto de filtrado de los acuíferos, etc. Estos aspectos beneficiosos pueden reducir los problemas planteados tradicionalmente por las pérdidas de agua en los embalses permeables y ahorrar cuantiosas inversiones en tratar de evitarlas.

De otro lado, el enorme desarrollo que ha experimentado el aprovechamiento de aguas subterráneas, plantea problemas legales y técnicos respecto a posibles sustracciones de agua embalsada mediante pozos, situados a veces lejos del embalse permeable, que explotan acuíferos recargados por las infiltraciones que se producen en estos embalses.

Por último, la creciente necesidad de aprovechamiento integral de los recursos hidráulicos, sobre todo en zonas áridas y semiáridas cercanas al mar, con regímenes hidráulicos de tipo torrencial, lleva cada día con mayor urgencia a la construcción de elementos de recarga artificial. Estos elementos pueden ser embalses cuya característica esencial es que sean permeables. Al mismo tiempo que alimentan los acuíferos, aumentando su recarga natural y aprovechando recursos que se pierden en el mar, producen el efecto de laminación de avenidas, disminuyendo los daños que ocasionan en las fértiles y pobladas llanuras costeras.

La doble finalidad de estos embalses podría justificar técnica y económicamente la construcción de algunos de los que fueron rechazados en el pasado, por existir dudas en cuanto a la estanqueidad de su vaso.

3. RELACIONES EMBALSE-ACUIFERO

Para el problema que nos ocupa, nos interesa conocer la cantidad de agua que se intercambia entre un em-

balse y el, o los, acuíferos relacionados con él. Además, es necesario conocer el flujo dentro del acuífero y la variación en el espacio y en el tiempo, de los niveles piezométricos del mismo.

Otro aspecto que está adquiriendo cada vez más importancia, es el de la calidad y contaminación del agua. En algunos embalses en terrenos calcáreos, la recarga puede alterar la calidad del agua en los acuíferos, mejorándola o empeorándola según los casos (Compte y Custodio, 1969). En alguna ocasión, el aumento de recarga en acuíferos costeros ha evitado o atenuado los problemas de intrusión marina (Martin y Moussu, 1968).

En un plano extremo se podría decir que para llegar a prever el comportamiento del sistema embalse-acuífero, habría que conocer la geometría y disposición de los terrenos; sus condiciones en los límites (límites impermeables o de nivel constante o de descarga); la distribución y valor de sus características hidrodinámicas (permeabilidad o transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.) y recarga y descarga naturales y artificiales. Con el conocimiento de todas estas propiedades geométricas y físicas no existirían problemas para poder determinar el comportamiento del sistema. La disponibilidad de métodos de cálculo numéricos y físicos, hace posible para la técnica actual a través de los modelos matemáticos y analógicos, la solución de problemas que hace algunos años eran inabordables.

Por consiguiente, el problema más grave con que nos encontramos, y que es un problema típico en la geología del ingeniero, es un problema de identificación. ¿Cuáles son las propiedades hidrodinámicas y cómo están distribuidas en el medio? ¿Cómo extrapolar los datos, a veces escasos, que poseemos? ¿Cuál es la situación y disposición de una formación en zonas que no ha sido posible alcanzar con nuestros trabajos de reconocimiento...?, etc.

Sin embargo, en gran número de casos, unas consideraciones hidrogeológicas, unidas a la experiencia en terrenos o casos similares, pueden simplificar el problema de las filtraciones en un embalse.

El problema de las pérdidas se soslaya totalmente cuando el terreno tiene niveles piezométricos por encima del nivel de máximo embalse, ya que en ese caso el agua circula hacia él.

En el caso de que los niveles piezométricos del terreno se mantengan en posición intermedia entre los niveles de máximo y mínimo embalse, las pérdidas se producirían únicamente a partir de una cierta cota de llenado (figura 1).

En los dos casos que acabamos de citar se produce almacenamiento de agua en las laderas, que puede ser importante en algunos casos, pudiendo aumentar significativamente la capacidad real del embalse (Coffin, 1970; Simons y Rorabaugh, 1971).

Si los niveles piezométricos del terreno están siempre por debajo del nivel del embalse, los gradientes hidráulicos se mantienen permanentemente hacia las laderas. Puede haber dos situaciones diferentes: la primera es

la de embalse permanentemente conectado con el acuífero (fig. 2), en cuyo caso los gradientes pueden oscilar entre amplios límites, 10^{-3} a 10^{-1} .

La segunda es la de embalse totalmente "colgado" (según terminología de Valdés, 1961), es decir, que los niveles de agua en el embalse están desconectados del acuífero y por encima del mismo (fig. 3). Los gradientes son próximos a la unidad, siempre por encima, y las pérdidas de agua son independiente de las oscilaciones de nivel en el acuífero (Aisenstein, 1959). Es el clásico efecto "ducha". Evidentemente, es la situación en la que las filtraciones son más importantes, debido a los altos gradientes hidráulicos en juego.

Una situación intermedia entre las dos anteriores es aquella en que el embalse está temporalmente "colgado" y temporalmente conectado con el acuífero, puesto que al ascender los niveles de éste llega a producirse la conexión hidráulica entre el acuífero y el embalse (fig. 4). El caso del embalse de María Cristina es típico de esta situación (figs. 5 y 6).

Los embalses colgados son los que pueden tener caudales de filtración más importantes. El valor de éstas (Sahuquillo, 1975) es aproximadamente:

$$a \times A \times K,$$

en donde:

- a es un coeficiente que varía entre 1 y 2.
- A es la superficie permeable mojada,
- K es la permeabilidad.

Aun con valores de A y K relativamente pequeños, se pueden tener caudales importantes.

Las situaciones de embalses conectados con el acuífero son menos peligrosas con respecto a los caudales de filtración.

En efecto, el valor de éstos sería:

$$K \times h \times L \times i \quad \text{ó} \quad T \times L \times i$$

siendo:

- h el espesor saturado en la zona de flujo.
- T transmisividad.
- L la anchura de la zona a través de la que se produce el flujo.
- i gradiente hidráulico.

Para valores de i "normales", es decir, del orden de 10^{-3} , los valores que se obtienen son siempre muy pequeños, a no ser que se tengan permeabilidades extraordinariamente grandes.

Para valores mayores de i , del orden de 10^{-1} , con transmisividades pequeñas o medias, se obtienen valores relativamente pequeños del caudal de filtración. Sólo con permeabilidades grandes se pueden tener filtraciones importantes. Estos valores del gradiente se pueden producir en zonas relativamente próximas a la cerrada o en collados estrechos.

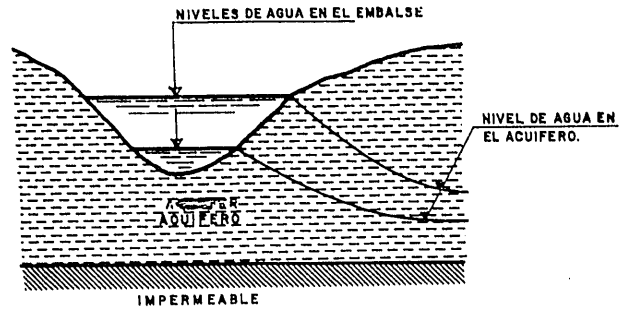


Fig. 1.—Existencia o no de pérdidas según el nivel del embalse.

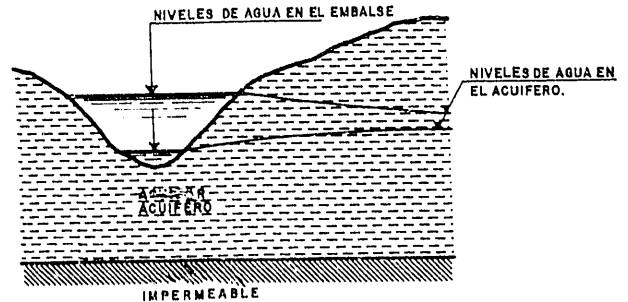


Fig. 2.—Embalse conectado permanente con el acuífero.

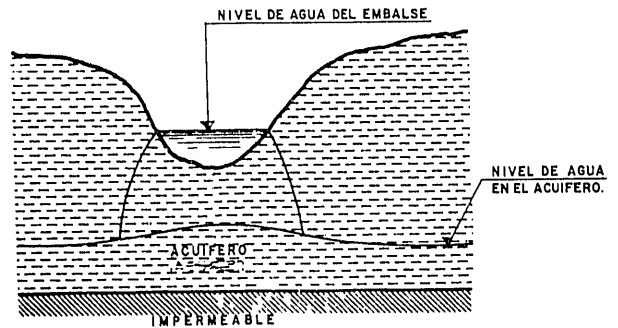


Fig. 3.—Elbalse "colgado" permanentemente.

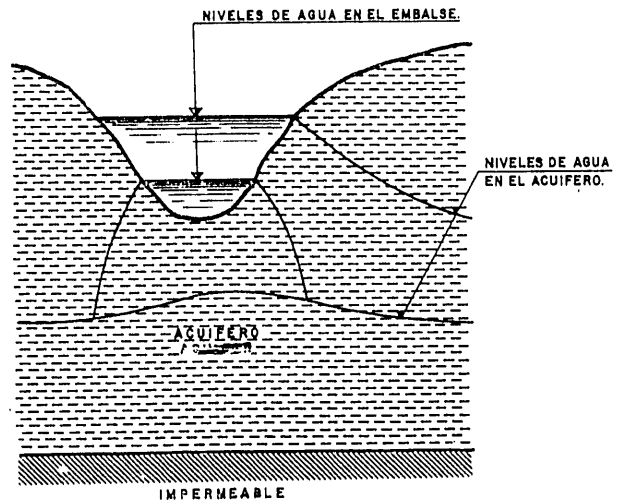
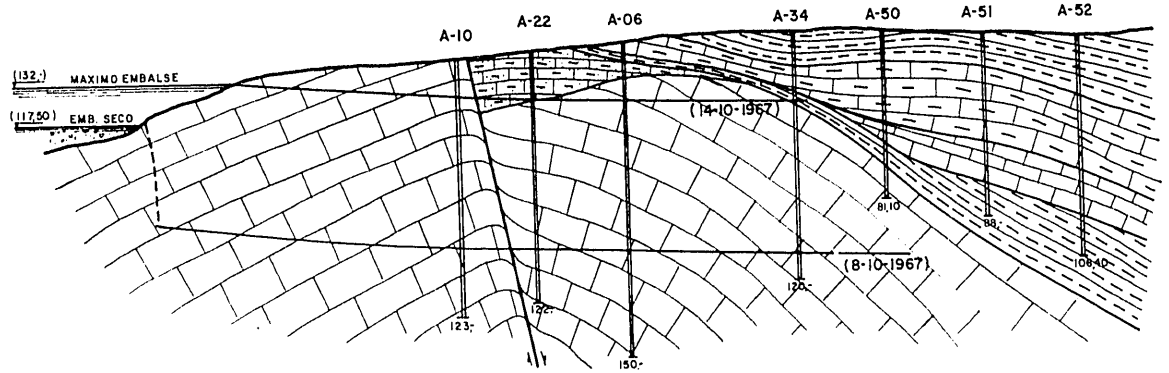
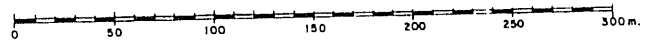


Fig. 4.—Embalse temporalmente "colgado" y temporalmente conectado con el acuífero.

COTAS ABSOLUTAS
S.N.M. en m.



LEYENDA.



- | | | | |
|----------------|-----------------|------------------------------|----------------------------------|
| | | LIMOS DEL EMBALSE | |
| CRETACICO | Indiferenciado. | | MARGAS VERDES |
| | | | CALIZAS MARGOSAS Y MARGAS AZULES |
| | APTENSE | | CALIZAS. |
| FACIES Weddica | | MARGAS AMARILLAS | |
| | | ARENISCAS Y CALIZAS ARENOSAS | |
| JURASICO | Superior. | | CALIZAS. |
| | | | NIVELES DE AGUA. |

Fig. 5.—Corte hidrogeológico en el embalse de María Cristina.

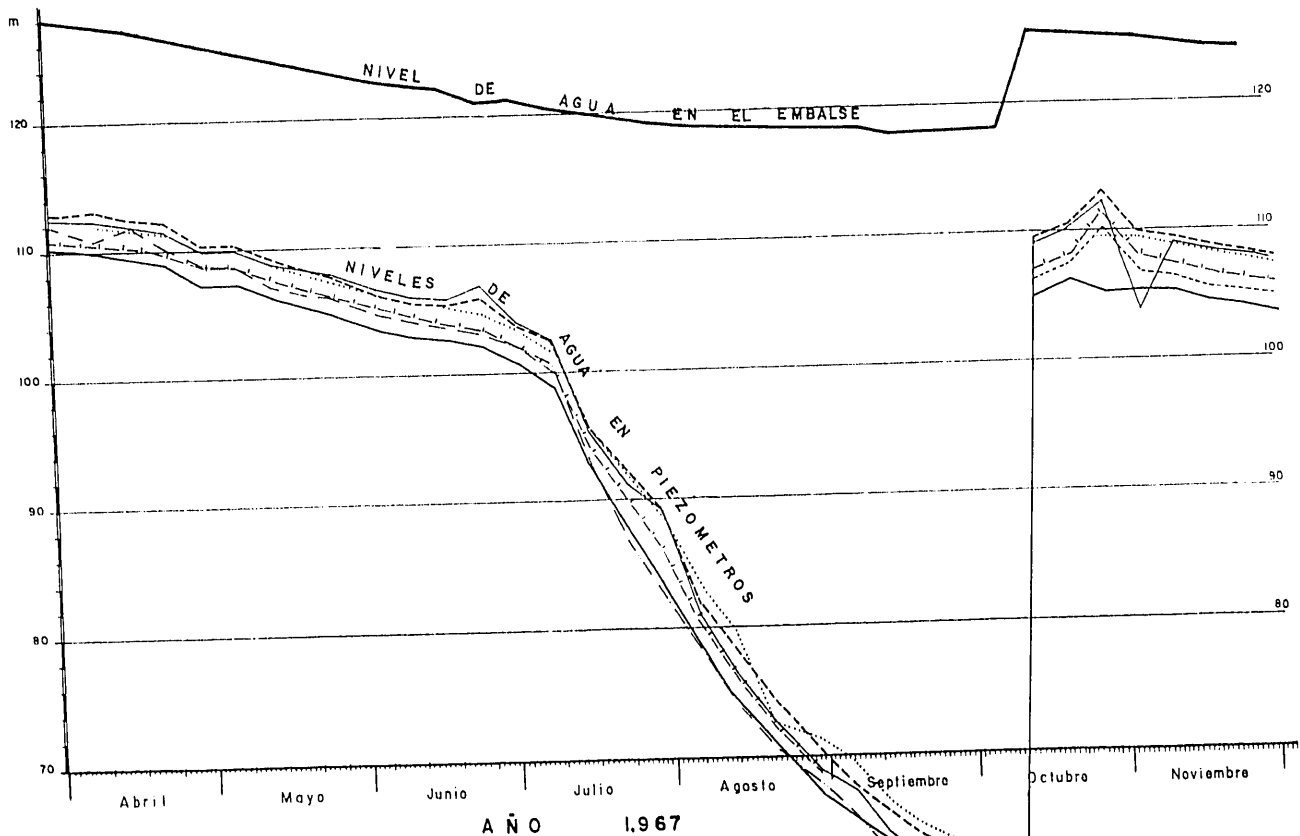


Fig. 6.—Oscilación de niveles en piezómetros de María Cristina.

3.1. La particularidad de los terrenos kársticos.

En zonas calcáreas tenemos un problema adicional, dada la heterogeneidad habitual en estos medios de las propiedades hidrodinámicas. ¿Hasta qué punto podemos utilizar en estos medios los conceptos y las formulaciones analíticas corrientes en hidrodinámica subterránea? ¿Cómo se puede abordar el problema del flujo cuando existen cuevas y conductos de permeabilidad prácticamente infinita, conjuntamente con un medio con permeabilidades prácticamente nulas o al menos mucho menores?

Este problema se ha resuelto de dos maneras distintas: una, la de considerar el medio como continuo (Borelli y Pavlin, 1967), aunque heterogéneo y anisótropo, asignando características hidrodinámicas a cada uno de sus puntos. Este es el enfoque que podemos denominar hidrodinámico, generalmente dado en los trabajos de hidrología subterránea (aunque no siempre). Este enfoque parece justificarse en el hecho de que la mayor parte de los ensayos de bombeo de pozos en estas formaciones se puede analizar con las teorías del flujo en medios porosos. Igualmente, son ya muchos los acuíferos kársticos en todo el mundo en los que se ha podido reproducir o predecir su comportamiento por el uso de modelos analógicos o matemáticos que, en definitiva, resuelven las ecuaciones de flujo en medios porosos.

El otro enfoque es radicalmente distinto y es el que hasta ahora se ha dado en gran parte de los trabajos de geología de presas y a algunos estudios de hidrogeología. El agua se mueve fundamentalmente a través de algunos conductos o zonas de permeabilidad mucho más alta. Su justificación está en el hecho de la presencia real de esos conductos o zonas de permeabilidad muy elevada, aunque también es un hecho la ausencia de una red de conductos de permeabilidad preferencial en gran parte de las formaciones calcáreas. Es el enfoque que podemos llamar espeleológico.

En cierta medida, la diferencia de enfoque es un problema de escala. De ningún modo podemos considerar homogéneo un acuífero de gravas cuando la escala de medida es el centímetro cúbico, pudiendo ser perfectamente homogéneo a la escala del metro cúbico. Generalmente, los estudios hidrogeológicos se hacen a escalas mucho más grandes que los de geología de presas, lo que justifica la diferencia de enfoque.

Es interesante a este respecto el estudio hecho por Trailkill (1972), en el que compara los resultados de la simulación del flujo del acuífero kárstico de la región de la cueva Mammoth, en Kentucky, por medio de dos modelos matemáticos, uno con flujo laminar y otro con flujo a través de una serie de conductos diferenciados. En ambos casos se obtiene una aproximación satisfactoria de los niveles conocidos del acuífero.

Nuestro punto de vista es que, en gran parte de los casos, las relaciones entre un embalse y un acuífero kárstico pueden ser tratadas con el enfoque que hemos llamado hidrodinámico.

4. INVENTARIO DE EMBALSES EN LA CUENCA DEL JUCAR

4

4.1. Metodología utilizada en su realización.

Los datos que hemos manejado en el estudio proceden de una recopilación de los existentes en los archivos de diversos organismos oficiales, entre los que destaca la Asesoría Geológica y el Servicio Geológico de Obras Públicas.

Todos los datos obtenidos se han reunido en fichas, una para cada embalse, y figuran agrupados en cinco apartados:

1. Datos geográficos que tienen por objeto la identificación y localización del embalse.
2. Datos hidrológicos de la cuenca, donde se resumen algunos parámetros que definen las principales características hidrológicas de la cuenca.
3. Datos del embalse. Se resumen sus características y finalidad.
4. Datos geológicos y geotécnicos. Se resumen las características geológicas, en forma gráfica preferentemente, de los alrededores del embalse y los principales trabajos geotécnicos y de corrección del terreno llevados a cabo en el proyecto y construcción de la presa, sondeos y galerías de reconocimiento e inyecciones.
5. Datos hidrogeológicos. En este apartado se resumen las características hidrogeológicas necesarias para definir las relaciones hidráulicas existentes entre el embalse y los acuíferos: pérdidas de embalse, piezómetros, pozos, ensayos con trazadores, características geométricas e hidráulicas de los acuíferos relacionados con el embalse, situación relativa de niveles entre el embalse y el acuífero, extracciones y caudal de los manantiales.

Cada ficha forma un *dossier* que contiene una serie de intercalares que complementan la información obtenida, difícil de resumir en la propia ficha.

Unos intercalares son comunes a todas las fichas, así como el resumen hidrogeológico donde se explica brevemente la obtención de los datos que figuran en el apartado 5 de la ficha, la bibliografía consultada y las referencias donde se cita el origen de cada dato incluido en la ficha. Los restantes intercalares son variables y dependen de la cantidad de datos existentes de cada embalse. Entre éstos figuran planos geológicos, situación de los sondeos, perfiles hidrogeológicos, gráficos de pérdidas, relación de niveles de embalse, niveles piezométricos o caudales de manantiales, situación de tragantes, entradas y salidas de agua en el embalse, resumen de ensayos realizados con trazadores, etc.

Respecto a la estimación de las pérdidas por infiltración en la cerrada o en el vaso del embalse hemos recogido los datos existentes en aquellos embalses en que se hubieran estudiado con anterioridad. En los embalses en que no se tenían datos de pérdidas se han estimado por los procedimientos siguientes:

a) Realizando el balance del funcionamiento en períodos en que se disponía de los datos de caudales entrados en el embalse, de los desembalsados, de la variación del agua almacenada y de datos evaporimétricos fiables. En la aplicación de este procedimiento hemos encontrado dificultades debido a la imprecisión de los datos de aforo, a la estimación de la evaporación total y la variación del volumen de agua embalsada, y a que los errores de medida de estas magnitudes en los ríos importantes y/o los embalses de gran extensión son superiores a las pérdidas que se pretendían evaluar. Además, en la realización del balance intervienen el volumen de agua almacenada en las laderas y su variación con las oscilaciones de nivel en el embalse. En los casos en que el volumen de agua almacenada en las laderas es significativo respecto a los otros términos del balance (por ser grande el volumen y porosidad eficaz de los materiales que las constituyen) los resultados obtenidos, sin tener en cuenta este almacenamiento, pueden pecar de incoherentes, ya que no es correcto evaluar como pérdidas los volúmenes de agua almacenados en las laderas y que vuelven al embalse al descender los niveles del mismo, si bien con un cierto retraso.

b) Utilizando la fórmula de Darcy en función de la superficie de contacto entre las calizas y el agua en el embalse, la permeabilidad media de estos materiales y los gradientes hidráulicos. Este método presenta el inconveniente de que la distribución de permeabilidades de unas zonas a otras varía enormemente en los terrenos calcáreos. Sin embargo, normalmente, se podrá tener una idea del orden de magnitud de la permeabilidad media y, además, podremos delimitar y tratar de definir mejor las características de la permeabilidad en las zonas que interesen (Borelli y Pavlin, 1967). Respecto a los gradientes hidráulicos hay que tener en cuenta la posición relativa del embalse y el acuífero, según se encuentre colgado o no, como se ha explicado anteriormente.

En la mayoría de los casos es evidente que no se han logrado determinar exactamente las pérdidas por infiltración; no obstante, se han acotado con suficiente aproximación, y ha sido posible el hacerse una idea sobre su importancia y la conveniencia de evitarlas o aconsejar su utilización explotando los acuíferos relacionados con el embalse.

4.2. Análisis del inventario.

De los 39 embalses construidos o en construcción en la cuenca del Júcar se han inventariado 36 embalses, situados en toda su extensión o en parte, sobre terrenos calcáreos que, prácticamente, representan todos los de la cuenca (su situación puede verse en la figura 7).

Del total de embalses inventariados 14 son propiedad del Estado, con una capacidad total de embalse de 2.779 Hm³. Destacan los de Alarcón, de 1.120 Hm³ de capacidad, sobre el río Júcar; Contreras, de 984 Hm³, sobre el río Cabriel; Generalísimo, de 228 Hm³, sobre el río Turia, y Arenós, de 130 Hm³, sobre el río Mijares, que

representan el 87 por 100 del total. El resto de embalses, 22 en total, son explotados por particulares (empresas hidroeléctricas o pequeñas sociedades de riegos), con una capacidad total de embalse de 43,6 Hm³.

Las superficies de contacto a embalse lleno entre el agua embalsada y los terrenos calcáreos permeables oscilan entre unos 2.000 m² en el embalse de Elda y 8 millones de m² en el de Tous, predominando en general las superficies relativamente reducidas. En efecto, un 6 por 100 de los embalses tienen superficies de contacto inferiores o iguales a 0,1 Km², el 69 por 100 inferior a 0,2 Km² y el 86 por 100 inferior a 0,5 Km². Sin embargo, 14 embalses se encuentran ubicados totalmente sobre calizas, mientras que otros 13 tienen únicamente en ellas la cerrada, ya que su vaso se encuentra en arcillas y margas. Entre estos últimos se encuentran los cuatro embalses de mayor capacidad ya citados (Alarcón, Contreras, Generalísimo y Arenós).

Los materiales calcáreos más permeables son los correspondientes a calizas del Cretácico superior (en Beniarrés e Isbert) y dolomías del Jurásico (en Contreras, María Cristina y Sichar) donde las transmisividades se estiman superiores a 1.000 m²/día.

Respecto a los gradientes hidráulicos entre el nivel del agua en el embalse y el nivel piezométrico del acuífero la situación de los embalses inventariados es la siguiente:

— Los embalses conectados permanentemente con el acuífero, con gradientes hidráulicos normalmente comprendidos entre 10⁻³ y 10⁻¹, son un total de 30. De ellos 25 tienen el gradiente normalmente hacia el acuífero y solamente cinco tienen un gradiente en general hacia el embalse, salvo en zonas próximas a la cerrada.

— Los embalses desconectados durante algunos períodos, o embalses colgados temporalmente, son solamente tres (Guadalest, María Cristina y Sichar). En ellos, cuando están colgados, el gradiente hidráulico es próximo a la unidad.

Los embalses desconectados constantemente, es decir, colgados permanentemente, son también tres (Isbert, Tibi y Relleu). En ellos el gradiente hidráulico es siempre próximo a la unidad.

4.3. Pérdidas.

En el cuadro número 1 figuran los embalses cuyo volumen de pérdidas es superior a 1 Hm³/año. El volumen total de pérdidas se estima del orden de 100 Hm³/año. No figuran los embalses de Tous y Contreras, por estar en fase de construcción. Sin embargo, en ellos las pérdidas máximas instantáneas se estiman del orden de 0,5-1 m³/seg. De los 36 embalses inventariados únicamente se estima que se producen (o se producirán cuando estén terminados) pérdidas en 23 embalses, de los que solamente 13 tienen pérdidas superiores a 1 Hm³/año. En el resto las pérdidas se estima que son inferiores a 15 l/seg. Entre estos últimos se incluye el embalse de

CUENCA DEL EBRÓ

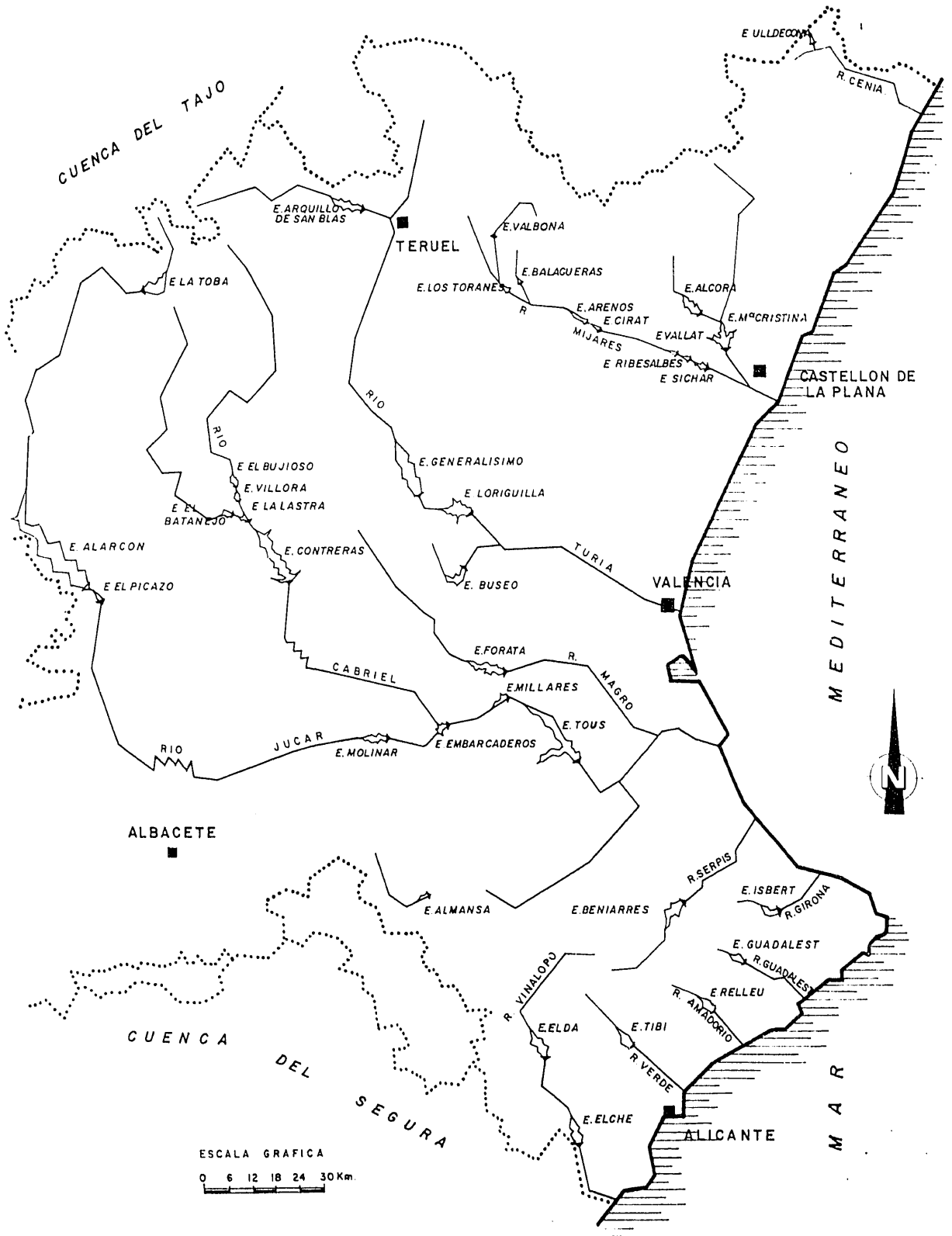


Fig. 7.—Plano de situación de los embalses. (Reservoirs situation MAP.)

CUADRO I. — Pérdidas comparadas con los caudales regulados y capacidad de embalse.

Cuenca	Embalse	Capacidad de embalse (Hm ³)	Caudal regulado (Hm ³ /año)	Pérdidas estimadas (Hm ³ /año)	Relación pérdidas-capacidad útil (%)	Relación pérdidas-caudal regulado (%)
Júcar	Alarcón	1.112,0	419,9	15,0	1,3	3,6
	Forata	33,5	16,2	3,0	9,0	18,0
Mijares	Sichar	52,0	126,4	22,4	43,0	17,5
	María Cristina	27,2	15,0	30,0	110,0	200,0
Turia	Generalísimo	220,0	197,8	3,0	1,0	1,0
	Loriguilla	70,9	76,0	3,0	4,0	3,0
	Buseo	7,5	5,6	4,0	50,0	70,0
Serpis	Beniarrés	31,0	20,3	6,0	19,0	30,0
Guadalest	Guadalest	15,3	7,1	1,0	6,5	13,0
Girona	Isbert	0,6	—	6,0	—	—
Amadorio	Relleu	0,6	0,6	1,8	300,0	300,0

Tibi, que, aunque se encuentra colgado, la permeabilidad de los materiales calcáreos es tan pequeña que las pérdidas se consideran prácticamente nulas. También se incluyen en ellos los cinco embalses en los que los niveles en los acuíferos en contacto con ellos son superiores a los niveles de máximo embalse, salvo, lógicamente, en la zona de la cerrada, y en ella las pérdidas se consideran despreciables una vez se terminaron las pantallas de inyección. En estos embalses podrían provocarse pérdidas si en el futuro se explotan los acuíferos conectados con ellos, ya que puede producirse una inversión del gradiente hidráulico con el descenso de niveles que ocasionarían los bombeos en el acuífero.

Los embalses en que se producen mayores pérdidas, en relación con los caudales regulados, son los de Isbert, Relleu y María Cristina, en los que las pérdidas son mayores que los caudales regulados y que se encuentran temporal o permanentemente colgados. Las pérdidas de los embalses de Buseo, Forata y Alarcón se producen fundamentalmente en la cerrada del embalse, y los caudales revierten al río aguas abajo de la presa. Las pérdidas en el embalse de Sichar, que se encuentra colgado en algunas épocas del año, son importantes en valor absoluto y, aunque representan únicamente un 17,5 por 100 del caudal regulado, alcanzan un 43 por 100 de la capacidad útil de embalse.

Las pérdidas que se indican corresponden a las existentes en la actualidad, luego de haber realizado en los

embalses los trabajos de inyección necesarios para reducir en lo posible las pérdidas iniciales.

El caso de Isbert, sobre el río Girona, es el típico de un embalse colgado. Proyectado hace unos treinta años, con objeto de aprovechar su agua para regadío, funciona como embalse de recarga exclusivamente, ya que desde su construcción ha permanecido en seco, salvo en cortos períodos de tiempo posteriores a lluvias importantes. Tanto la cerrada como el vaso se encuentran en calizas cretácicas muy permeables. El nivel piezométrico regional de las calizas se encuentra probablemente a más de 200 m de profundidad por debajo del embalse. La aportación media anual del río Girona es de unos 6 Hm³/año y se infiltra totalmente. El acuífero calizo es explotado por pozos (20 Hm³/año) en una zona situada 7 Km aguas abajo del embalse.

Las pérdidas por infiltración y que alimentan los acuíferos en contacto con el embalse tienen importancia únicamente en las cuencas del Mijares, Serpis, Guadalest, Girona y Amadorio. En las restantes cuencas son prácticamente insignificantes (en relación a la capacidad útil de embalse y los caudales regulados) a excepción de Buseo, en que, como hemos dicho, revierten al río aguas abajo de la presa.

4.4. Aprovechamiento de las pérdidas.

Comparando las pérdidas de todos los embalses de la cuenca del Júcar (100 Hm³/año) con los recursos su-

periferales regulados (del orden de 2.000 Hm³/año, incluyendo la regulación producida por los embalses y la natural) se observa que representan, aproximadamente, el 5 por 100 de los caudales totales regulados. Si se tiene en cuenta que un 30 por 100 de ellas revierte a los ríos, aguas abajo de las presas, reguladas en cierta forma aunque no adaptadas a la demanda, resulta que las pérdidas reales representan menos de un 4 por 100 de los caudales totales regulados.

Aunque aún no se dispone de datos cuantitativos exactos sobre el funcionamiento en conjunto de los acuíferos calcáreos de la cuenca del Júcar, se estima que la recarga media anual de estos acuíferos es del orden de 1.500 Hm³, representando la infiltración procedente de los embalses solamente un 7 por 100 de la recarga total de los acuíferos, lo cual es lógico si se tiene en cuenta que ninguno de los embalses tiene por finalidad exclusiva la laminación de avenidas, y en todos se ha hecho lo posible para que las pérdidas fuesen mínimas, por lo que el efecto de recarga era un efecto no deseable.

De las cifras anteriores parece deducirse que el aprovechamiento de las pérdidas de los embalses no tiene gran interés a nivel de recursos totales de la cuenca. No obstante, puede ser de gran interés el aprovechamiento de la recarga producida por la infiltración del agua en los embalses en casos como los que se enumeran a continuación:

- Aprovechamientos urbanos en los que resulta ventajosa la utilización de las aguas subterráneas (evitándose depuraciones costosas, transporte del agua, etc.).
- Regadíos deficitarios difíciles de abastecer con aguas superficiales procedentes de un embalse que, al ser permeable, no puede garantizar las dotaciones previstas en el proyecto; tal es el caso de la comunidad de regantes usuarios del embalse de María Cristina, que ha construido pozos para completar, mediante aguas subterráneas, la superficie regable proyectada al construir el embalse.
- Bombeos de zonas costeras, en que el agua infiltrada de los embalses recarga unidades hidrogeológicas deficitarias en la actualidad, o que pueden serlo en un futuro próximo.

5. CONCLUSIONES

El volumen actual de filtraciones en todos los embalses en terrenos calcáreos de la cuenca del Júcar es relativamente reducido, representando apenas el 5 por 100 de los caudales totales regulados por dichos embalses.

Las filtraciones en los embalses colgados, aun con permeabilidades relativamente pequeñas, son, en general, de cierta importancia. Esto hace que siempre sean de estanciedad dudosa los embalses en ramblas o cauces intermitentes, en los que el nivel piezométrico está permanentemente por debajo del nivel del cauce.

En los embalses permanentemente "colgados" la explotación del acuífero al que alimentan no afecta a las pérdidas del embalse, ya que éstas son independientes

de los niveles en el acuífero. Por el contrario, los embalses que están conectados con acuíferos pueden resultar afectados, ya que la explotación de las aguas subterráneas modificará el gradiente hidráulico entre ambos.

Es del máximo interés, a la hora de predecir el comportamiento de un embalse en proyecto, el conocer bien los acuíferos con los que eventualmente pudiera estar relacionado. Esto, en general, es más factible en las zonas de mayor demanda de agua donde los acuíferos están más explotados.

La tendencia actual en los sistemas de recursos hidráulicos de utilizar conjuntamente los embalses superficiales y subterráneos aboga por la no exclusión de los embalses permeables, ya que pueden ser elementos efectivos de recarga artificial, aumentando la infiltración natural de los acuíferos. En muchos casos estos embalses pueden cumplir la función adicional de laminación de avenidas, lo que haría viable económicamente su construcción.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento al director del Servicio Geológico de Obras Públicas, excelentísimo señor don Manuel Gómez de Pablos, por el constante aliento y estímulo en la realización de este trabajo. Asimismo, agradecemos al Servicio de Vigilancia de Presas, Confederación Hidrográfica del Júcar, Comisaría de Aguas del Júcar e Hidroeléctrica Española, S. A., el habernos facilitado el acceso a los datos y documentación acerca de los embalses en la cuenca del Júcar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AISENSTEIN, B.: "Seepage from reservoirs in Limestone Areas in Israel". *International Geological Congress*. México, 1956, Sect. XII, págs. 5-14, 1959.

BORELLI, M., and PAVLIN, B.: "Approach to the problem of the underground water leakage from the storages in karst Regions. Karst Storages Busko Blato, Peruca and Kruscika". *A.I.H.S. Pub. nº 73. Symposium of Dubrovnik*, 1965 (1967).

COFFIN, D. L.: "A preliminary evaluation of bank storage associated with Libby Reservoir in Northwestern Montana". *U.S. Geological Survey. Water-Supply Paper 1899-L.*, 1970.

COMPTE, J. M., and CUSTODIO, E.: "Influence of impounding Reservoirs on the Quality and Quantity of Underground Water". *International Water Supply Association. Congress of Viena. Special Subject nº 3. F-1 a F-18*, 1969.

MARTIN, A., and MOUSSU, H.: "Recharge artificielle de la nappe de Sébikotane (calcaires karstiques) par création d'une retenue d'eau au droit d'une vallée fossile

- quaternaire (sable) en taillant les calcaires". *Á.I.H., Congress of Istanbul*. Tome VIII, págs. 256-264, 1968.
- SAENZ GARCIA, C.: "Posibilidad y conveniencia de embalses permeables". *Conferencia Mundial de la Energía. Barcelona, 1929*. Sección E, págs. 38-1 a 14, 1929.
- SAHUQUILLO, A.: "Estudios hidrogeológicos en relación con los embalses de superficie". Capítulo 3 del tema 22. *Hidrología Subterránea*. M. R. Llamas y E. Custodio. Ed. Omega. Barcelona (en prensa), 1975.
- SERVICIO GEOLOGICO DE OBRAS PUBLICAS: "Estudio previo sobre las relaciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas en los embalses españoles en terrenos calcáreos. Cuenca del Júcar. Inventario de embalses españoles en terrenos calcáreos". (Informe de difusión limitada.) 1974.
- SIMONS, W. D., and RORABAUGH, M. I.: "Hydrology of Hungry Horse Res. Northwestern Montana". *U.S. Geological Survey, Profess. Paper 682*. 1971.
- THRAILKILL, J.: "Digital computer modelling of limestone groundwater systems". *University of Kentucky. Research Report nº 50*. 1972.
- VALDES, J. M.: "Instrumentación geológica en la construcción de presas en España". *Revista de Obras Públicas*, junio 1971, págs. 309-316, 1961.