

Hidrología subterránea del entorno de la presa de Bellús (Alicante)

ANTONIO PLATA BEDMAR (*), LUIS ARAGUÁS ARAGUÁS (**),
ELENA PÉREZ ZABALETA (***) ; M^o FE DÍAZ TEJEIRO (***)

RESUMEN El presente trabajo contiene los resultados obtenidos en un estudio hidrogeológico realizado durante los años 1995 a 2000 para evaluar el riesgo de fugas de agua del embalse de Bellús y la influencia de las mismas en la eventual contaminación de las aguas de los manantiales cársticos situados aguas abajo de la presa. Algunos de estos manantiales son utilizados para abastecimiento humano. El estudio se ha basado en la determinación de las composiciones química (componentes mayoritarios y elementos pesados) e isotópicas (deuterio, ¹⁸O, tritio, ¹⁴C y ¹³C) de las diferentes aguas involucradas, así como en la localización y medida de los flujos subterráneos mediante técnicas basadas en el marcado con un trazador salino (sal común) del agua contenida en el interior de los sondeos existentes y perforados con esta finalidad. Paralelamente, el estudio ha permitido la identificación y la caracterización química e isotópica de las aguas de origen cárstico que afloran en diversos manantiales situados en las proximidades del lecho del río Albaida entre la presa y una distancia a ésta de 4,3 km, con un caudal total próximo a 1 m³/s. Los análisis isotópicos han proporcionado información sobre el tiempo de renovación de las aguas dentro del acuífero y sobre el volumen del agua almacenada en el mismo.

GROUNWATER HYDROLOGY IN THE BELLÚS BASIN AREA (ALICANTE)

ABSTRACT *This paper presents the results obtained in an hydrogeological study carried out during the period 1995 to 2000. The aim of the study was the assessment of the risk of leakage of the Bellús reservoir and its relevance in the eventual contamination of the karstic springs located downstream the dam. Some of the studied springs are used for human consumption. The study was mainly based on the determination of the chemical composition (major components and heavy metals), and the isotopic composition (deuterium, ¹⁸O, tritium, ¹⁴C and ¹³C), of the involved waters, as well as on the localization and measurement of groundwater flows using the techniques based on the labelling with a saline tracer (common salt) of groundwater of the existing boreholes and boreholes drilled for this purpose. At the same time, the study allowed the identification and chemical and isotopic characterization of the karstic waters emerging at many springs located in a stretch between the dam and 4.3 km downstream, with a total flow-rate of about 1 m³/s. The isotopic analyses have provided information on the turnover time of groundwater in the karstic aquifer and on its storage capacity.*

Palabras clave: Fugas de presas, Acuífero cárstico, Hidrogeoquímica, Isótopos ambientales.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el período comprendido entre 1995 y 2000, el CEDEX realizó un estudio hidrogeológico en el entorno de la presa de Bellús, sobre el río Albaida, en el marco de varios convenios con la C. H. del Júcar y la D.G.O.H. Este estudio tuvo la finalidad de evaluar la influencia del embalse en las aguas subterráneas de la zona, principalmente, del agua que aflora por el manantial explotado para el abastecimiento de la población de Játiva, el cual se

encuentra situado unos 3 kilómetros aguas abajo de la presa. Debido a la mala calidad previsible de las aguas embalsadas por causa del vertido al río de aguas residuales de origen industrial y doméstico, las fugas del embalse podían producir la contaminación de los acuíferos situados aguas abajo. El estudio se basó en el reconocimiento exhaustivo de las aguas que afloraban en los manantiales existentes en el entorno de la presa y en las márgenes y el cauce del río Albaida, en un tramo de 9 kilómetros, así como en muestras tomadas en unos 20 sondeos perforados con diferentes finalidades dentro de la galería de la presa, a pie de presa y aguas abajo de ésta. Las técnicas utilizadas en el estudio incluyeron, entre otras, la realización de análisis químicos (componentes mayoritarios y metales pesados) e isotópicos (deuterio, oxígeno-18, tritio, carbono-14 y carbono-13), ensayos con trazadores para la medida de flujos subterráneos en el interior de los sondeos y la realización de aforos a lo largo del río Albaida con el fin de detectar y evaluar afloramientos no visibles dentro de su cauce.

(*) Licenciado en Ciencias Químicas, CEDEX (actualmente jubilado).

(**) Doctor en Ciencias Químicas y Licenciado en Ciencias Geológicas, IGME.

(***) Director de Programa. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, Ministerio de Fomento.

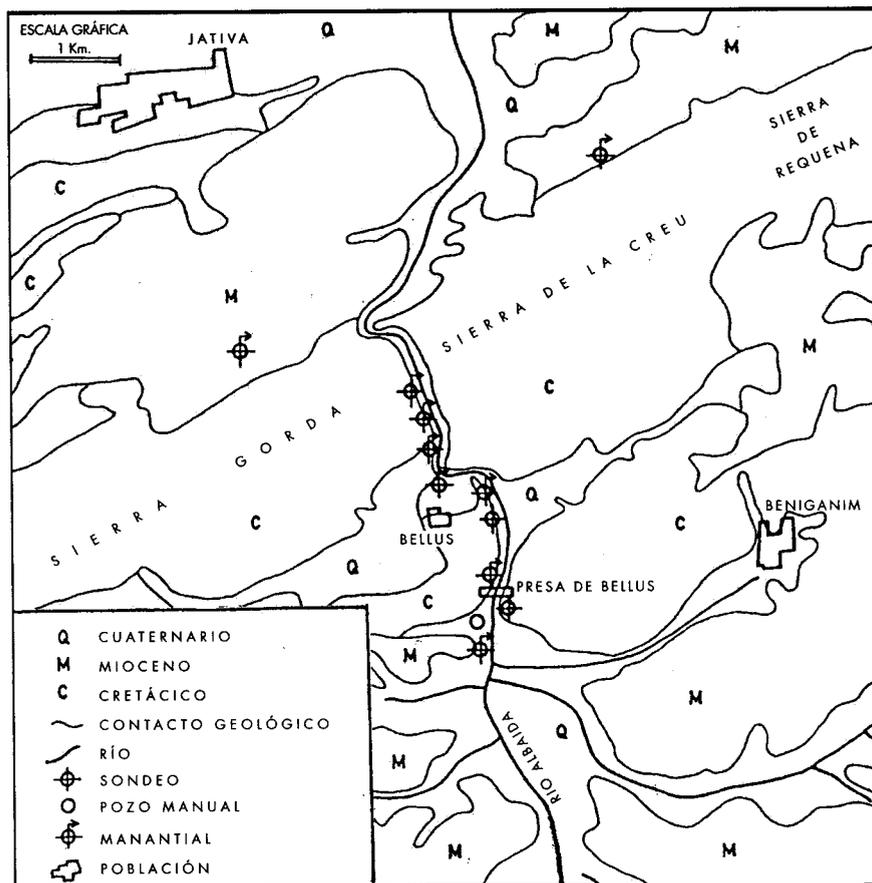


FIGURA 1. Geología de superficie y puntos de afloramientos de aguas subterráneas en las inmediaciones del embalse de Bellús.

2. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

La geología de superficie de la zona objeto del estudio se presenta de una forma simplificada en la figura 1, donde se indica también la situación de algunos de los puntos de muestreo de aguas subterráneas y superficiales. La mayor parte del vaso del embalse está constituido por una potente capa de margas depositadas en un ambiente marino de edad miocena con una estructura de anticlinal. Estas margas se encuentran cubiertas, en las zonas por donde discurre el río Albaida y sus afluentes (pequeños arroyos), por materiales aluviales de escaso espesor, formados por materiales limosos y arenosos. El conjunto constituye un vaso que se supone de baja permeabilidad. El espesor de los materiales impermeables puede alcanzar, en el centro de la cuenca, varios centenares de metros y disminuye a medida que nos acercamos a la zona de la cerrada.

Los materiales de la cerrada corresponden a calizas blancas del Cretácico Superior, que son del mismo tipo que las que forman la mayor parte de los macizos calcáreos de la Sierra Gorda, Sierra de la Creu y Sierra de Requena, los cuales fueron cortados por el río Albaida formando un profundo desfiladero. Es posible, por tanto, que exista una conexión hidráulica entre los afloramientos cretácicos de la cerrada y los macizos mencionados por debajo de los materiales miocenos. Estos macizos calcáreos constituyen los principales acuíferos de la zona. El acuífero de Sierra Gorda tiene una forma rectangular con una longitud aproximada de unos 50 km y una anchura de unos 10 km. El acuífero está formado por formaciones calizodolomíticas, que tienen un espesor medio de unos 900 m. Estas formaciones se encuentran cubiertas, en parte, por arcillas y margas, respectivamente, del Maestrichtiense y del Paleoceno.

La zona de afloramiento de los materiales calcáreos asciende a unos 195 km². El Sinclinal de Bellús, así como el de Salem en el macizo de la Sierra de la Creu, constituyen estructuras que favorecen la infiltración del agua.

Los dos alineamientos calcáreos antes mencionados se encuentran delimitados en el borde NO por una gran falla longitudinal que hace que aparezca el Triás diapírico en la zona de Genovés-La Barcheta. Esta gran falla aísla hidráulicamente a la Sierra Gorda del macizo de Caroch situado al Norte y determina la existencia de una barrera impermeable formada por el Sinclinal del río Cañoles. En realidad, la Sierra Gorda se encuentra cabalgando sobre el macizo de Caroch. Es posible que la falla mencionada juegue un papel importante en la conducción del agua de recarga en dirección SO-NE hasta la zona de afloramiento situada, principalmente, en la margen izquierda del río Albaida (manantiales de Bellús). El substrato del acuífero lo constituyen los materiales margosos del Neocomiense-Barremiense.

En el entorno de la presa existen numerosos manantiales de origen cárstico situados, principalmente, en la margen izquierda del río (véase figura 1). El más importante de estos es el conocido como manantial de Bellús utilizado, como se ha indicado anteriormente, para el abastecimiento de la población de Játiva con un caudal medio próximo a 150 l/s. Sin embargo, los afloramientos más importantes se localizan en el lecho del propio río Albaida, mezclándose con las aguas que circulan por éste. Aparte de estos manantiales cársticos, existe un pequeño manantial de aguas termales, con 28°C de temperatura, localizado en la zona del estribo izquierdo aguas arriba de la presa, el cual fue explotado como balneario en tiempo pasado (Balneario de Bellús). El flujo termal que aflora por este manantial

ha sido interceptado por los sondeos del fondo de la galería de la presa más cercanos al estribo mencionado. Adicionalmente, dos sondeos de la zona perforados con más de 150 metros de profundidad son surgentes.

3. AFLORAMIENTOS A LO LARGO DEL RÍO ALBAIDA

Los caudales que afloran a lo largo del cauce del río Albaida fueron determinados por los dos métodos que se indican a continuación:

- 1) Mediante aforos directos con el método de integración de la nube de trazador, utilizando como tal el colorante químico, rodamina WT. Para aplicar este método, se inyecta una masa M de trazador en un punto de la corriente y se determina la curva de paso de la nube de trazador (variación de la concentración C en función del tiempo t) en otro punto situado a una distancia suficiente para que se cumpla la condición de buena mezcla. El caudal Q viene dado por la ecuación siguiente (1):

$$Q = \frac{M}{\int Cdt} \quad (1)$$

El valor de la integral se determina mezclando en un recipiente muestras de agua de igual volumen tomadas de la corriente a intervalos de tiempo iguales durante todo el tiempo que dura el paso de la nube de trazador. La concentración de trazador medida en el volumen total de agua multiplicada por el tiempo de muestreo proporciona el valor de la integral del denominador de la ecuación (1).

- 2) Debido a la gran diferencia de la conductividad eléctrica del agua del embalse con respecto al agua de los afloramientos cársticos (1.316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ frente a 507 $\mu\text{S}/\text{cm}$), la fracción f de agua subterránea que aflora

entre dos puntos de control del río representados por los subíndices 1 y 2 puede calcularse por la expresión:

$$507 \cdot f + K_1(1-f) = K_2(K = \text{conductividad}) \quad (2)$$

El producto de la fracción f por el caudal del río en el punto 1 proporciona el caudal de agua subterránea aflorado entre los puntos 1 y 2. Por tanto, basta con conocer el caudal del río en la descarga de la presa para determinar los caudales aflorados a lo largo de su curso aguas abajo de ésta. Este método fue el único utilizado para determinar los afloramientos aguas arriba de la presa donde no podía aplicarse el método anterior de aforo directo. En el tramo de aguas abajo de la presa se utilizaron los dos procedimientos, los cuales proporcionaron, como era de esperar, valores muy parecidos debido a la constancia de la conductividad eléctrica de los diferentes afloramientos.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 2. La figura 2A muestra los caudales que afloraban referidos a tramos del río de 100 metros. La figura 2B indica los caudales acumulados de todos los afloramientos existentes aguas abajo de la presa. Se observa que entre esta última y el punto situado a 4400 metros de distancia de la misma, el caudal total de los afloramientos ascendía a unos 830 l/s. A este valor habría que sumar el caudal captado en el manantial de Bellús próximo a 150 l/s a efectos de computar el caudal total de descarga de los sistemas cársticos en esta zona. En el tramo comprendido entre este punto del río y el cruce del río con la carretera que conecta Játiva con Gandía (tramo estudiado) no se detectaron afloramientos significativos. A efectos de evaluar el riesgo de fugas de agua por debajo de la presa, es importante resaltar el hecho de que existan afloramientos en el entorno de la cerrada tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa. Estos mismos circuitos cársticos pueden ser utilizados por el agua embalsada para escapar del embalse.

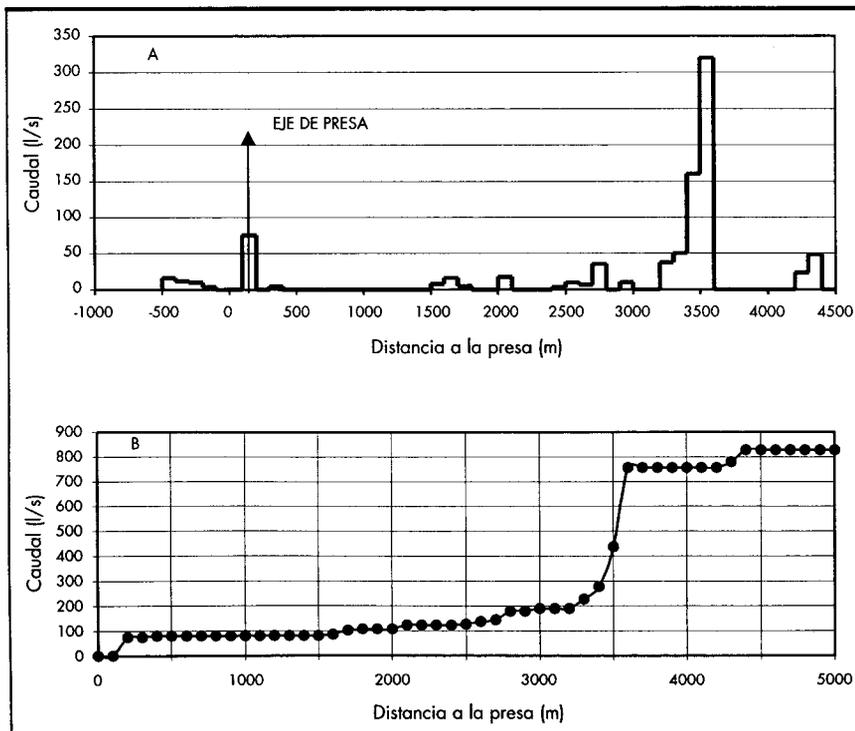


FIGURA 2. Afloramientos de agua existentes dentro del lecho del río Albaida. A) Situación y caudal de los afloramientos detectados. B) Caudal acumulado a partir de los afloramientos aguas abajo de la presa de Bellús.

Tipo de agua		pH	K	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl	NO ₃	SO ₄ ⁻	CO ₃ H
Manantiales cársticos	Nov.2000	8,1	507	58	24	17	1,2	29	4,0	18	287
	Nov.1995	8,0	475	32	25	17	1,4	35	3,9	21	281
Agua del embalse	Nov.2000	8,2	1056	96	27	107	12	114	4,5	95	415
	Nov.1995	8,2	1175	64	21	120	12	156	18	103	293
Man. termal	Nov.1995	7,4	673	59	32	39	2,6	62	3,5	39	277

TABLA 1. Composición química típica de los tres tipos de aguas característicos de la zona. Las concentraciones iónicas se expresan en mg/l y la conductividad (K) en µS/cm.

4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E ISOTÓPICAS

4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

En líneas generales, las aguas de la zona pueden clasificarse en tres grupos diferentes: aguas contaminadas del embalse, cuya composición química puede variar dentro de amplios límites dependiendo de su origen, aguas de los acuíferos cársticos y agua del manantial termal del antiguo Balneario de Bellús, estas dos últimas con una composición química bastante uniforme. La tabla 1 recoge la composición química típica de estos tres tipos de aguas. En los casos de los manantiales cársticos y embalse, se analizaron muestras de agua tomadas en Noviembre de 1995 y en Noviembre de 2000. Se observa que la composición química de los manantiales cársticos apenas varió durante el período de 5 años, como era de esperar. Como no podía ser de otra manera, las aguas de origen cárstico son bicarbonatadas cálcicas con contenidos relativamente bajos de los iones Cl⁻ y SO₄⁼. El agua del embalse se caracterizaba por contenidos mucho mayores de los iones

Cl⁻, SO₄⁼, Na⁺ y Ca⁺⁺. Algunos de los puntos muestreados presentaron concentraciones intermedias entre los obtenidos para estos dos tipos de aguas, lo cual se explica por mezclado de las mismas dentro del acuífero. Esta mezcla fue más evidente en el muestreo realizado en Noviembre del año 2000 debido a la intrusión en el acuífero de agua procedente del embalse. El diagrama de Piper obtenido para estos últimos datos muestra un claro alineamiento de los puntos entre los dos polos de mezcla formados, respectivamente, por el agua del embalse y por las aguas cársticas (figura 3). El agua del manantial del Balneario de Bellús era también bicarbonatada cálcica, pero tenía una salinidad mas alta gobernada, principalmente, por el mayor contenido de los cuatro iones indicados anteriormente.

En el agua del embalse fueron analizados también los metales pesados más importantes. Se encontró que esta agua contenía concentraciones significativas de arsénico, cobre, níquel, plomo y vanadio, si bien estas concentraciones eran inferiores a las máximas permisibles para aguas potables según las normas vigentes en España.

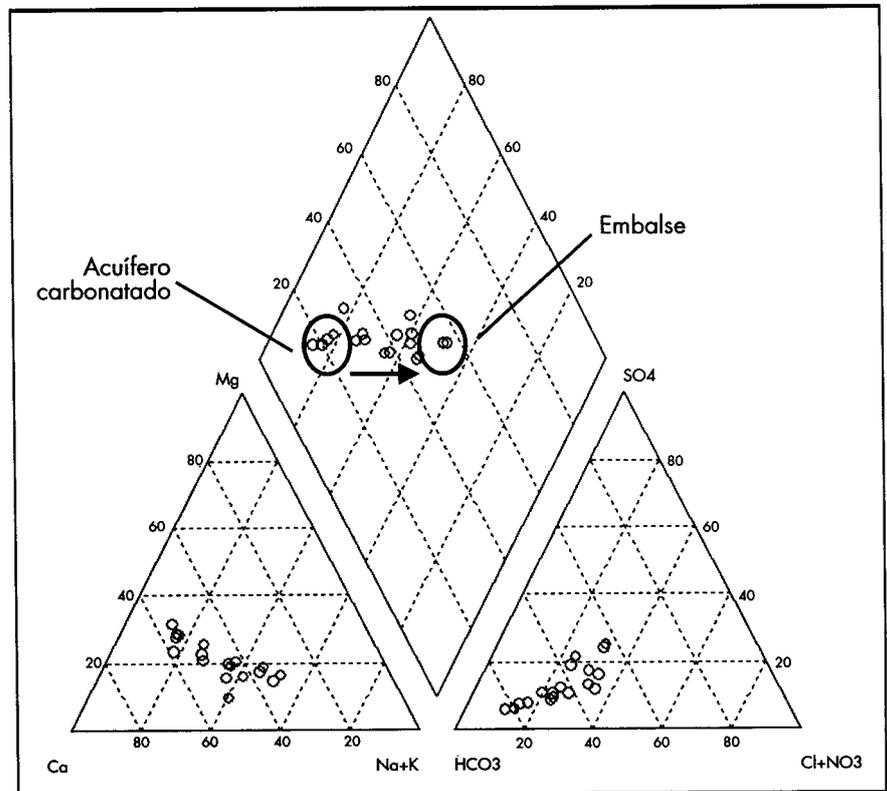


FIGURA 3. Diagrama de Piper obtenido con los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua tomadas en Noviembre de 2000. Se observa que los puntos se alinean a lo largo de líneas de mezcla del agua del embalse con agua del acuífero cárstico.

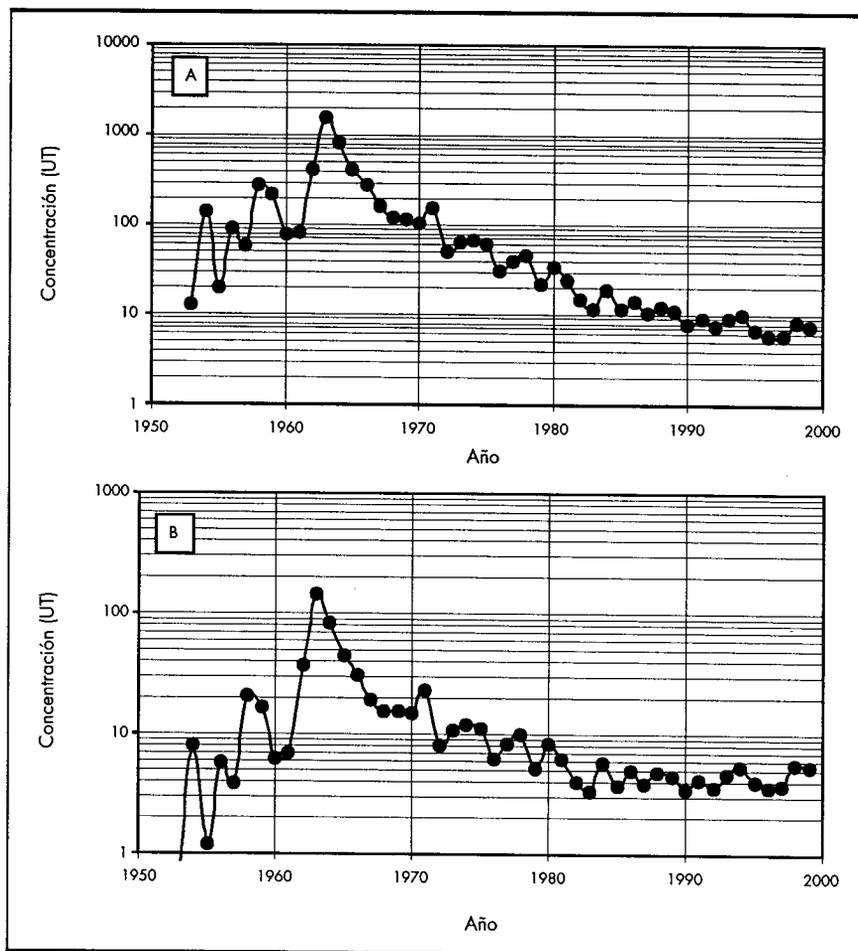


FIGURA 4. Concentraciones de tritio para las precipitaciones medias anuales de la zona del estudio. A) Valores sin corregir por desintegración radiactiva. B) Valores corregidos por desintegración con referencia al año 2000.

4.2. ISÓTOPOS ESTABLES DEUTERIO Y OXÍGENO-18

Tanto las aguas de los manantiales cársticos como la del manantial termal del antiguo Balneario de Bellús presentaron valores de δD y $\delta^{18}O$ muy similares entre sí con los valores medios respectivos de -41‰ y $-7,08\text{‰}$. En cambio, las aguas del embalse dieron los valores medios $\delta D = -36,6\text{‰}$ y $\delta^{18}O = -6,28\text{‰}$ en las muestras tomadas en Noviembre de 1995 y $\delta D = -36,3\text{‰}$ y $\delta^{18}O = -5,47\text{‰}$ en las de Noviembre de 2000. Estos valores menos negativos del agua del embalse se explican por el enriquecimiento inherente a la evaporación del agua. La mayor parte de los afloramientos localizados en el interior de la galería de la presa dieron valores d intermedios, lo cual se interpreta como mezcla de estos dos tipos de aguas. Este mezclado se vio plenamente confirmado por la composición química del agua, como se ha mencionado en el apartado anterior. Los afloramientos localizados en puntos próximos al estribo izquierdo constituyen una excepción, con valores medios $\delta D = -42,3\text{‰}$ y $\delta^{18}O = -7,12\text{‰}$.

Los valores de exceso de deuterio, calculados por la ecuación $\Delta D = \delta D - 8\delta^{18}O$ dieron valores comprendidos entre $+13,1\text{‰}$ y $+17,4\text{‰}$. Estos valores tan elevados son típicos de las precipitaciones de los países mediterráneos y se explican por el mayor déficit de humedad relativa existente en la atmósfera de este mar con respecto a la del océano Atlántico. Ello indica que la mayor parte de las precipitaciones de la zona proceden de masas de vapor de agua generadas en el mar Mediterráneo. La precipitación derivada frentes procedentes del Atlántico llegan a esta zona muy debilitados.

4.3. TRITIO DE ORIGEN TERMONUCLEAR

Como se sabe el tritio contenido en las aguas naturales procede en su mayor parte de las explosiones termonucleares producidas en la atmósfera durante los años 1953 a 1962. Debido a su corto período de semidesintegración (12,32 años), este isótopo del hidrógeno informa sobre la presencia en los acuíferos de aguas infiltradas durante los últimos 50 años. Las concentraciones de tritio para las precipitaciones de la zona del estudio durante las últimas décadas pueden deducirse a partir de los datos obtenidos por el CEDEX para las precipitaciones de Madrid a partir del año 1970, aplicándose un pequeño factor de corrección con concentraciones un 10% más bajas debido a la mayor proximidad al mar de dicha zona. Los valores así obtenidos permiten, a su vez, calcular las concentraciones correspondientes a los años anteriores entre 1953 y 1970 para los cuales no se tienen datos, apoyándose en los modelos conocidos para el Hemisferio Norte (1). Los valores obtenidos expresados como concentraciones medias anuales para las precipitaciones de la zona se muestran en las figuras 4A y 4B. La primera de estas figuras muestra las concentraciones habidas en el momento del muestreo, mientras que la segunda refleja estas concentraciones corregidas hasta el año 2000, cuando fue realizado el último muestreo. Se observa en esta figura que las precipitaciones del período 1956 a 2000 se mantuvieron con valores superiores a unas 4,5 UT (unidades de tritio) y que durante el período 1978 a 2000 las concentraciones corregidas se mantuvieron casi constantes con un valor medio próximo al valor anterior.

Muestra	Año 1995	Año 2000
Manantiales cársticos	1,9±0,30 (*)	1,3±0,17
Agua del embalse	6,0±0,30	3,8±0,18
Manantial termal de Bellús	1,0±0,32	

(*) Valor medio de los resultados obtenidos en siete manantiales cársticos que dieron los valores 1,3-2,4-1,6-2,3-2,0-1,8 y 2,0 UT.

TABLA 2. Resultados obtenidos para las concentraciones de tritio en las aguas más representativas de la zona.

Los resultados obtenidos para las muestras de agua más representativas se indican en la tabla 2. Comparando estos resultados con los de la figura 4B, se observa que el agua del embalse procedía, como era de esperar, de las precipitaciones más recientes de la zona. Las diferencias respecto a un valor medio próximo a 5 UT, indicado anteriormente, se explican por las desviaciones de las concentraciones de las precipitaciones locales que alimentaron al embalse.

En cambio, tanto el manantial termal del antiguo Balneario de Bellús, como los diferentes manantiales cársticos, dieron valores muy inferiores a las concentraciones observadas en las precipitaciones posteriores al año 1954. En el caso de los manantiales cársticos, el descenso de concentración de tritio puede explicarse, básicamente, por la desintegración radiactiva de este isótopo. Los cinco años que transcurrieron entre 1995 y 2000 significan un factor de desintegración del tritio igual a 0,757, de forma que la concentración encontrada en el año 1995 se transformaría en 1,4 UT en el año 2000, es decir, en un valor muy parecido al obtenido.

Las concentraciones tan bajas de tritio encontradas para los manantiales cársticos y el manantial termal de Bellús indican de forma inequívoca que las aguas de estos manantiales proceden en su mayor parte de precipitaciones que tuvieron lugar antes del año 1953. La concentración media de tritio para las precipitaciones locales entre los años 1953 y 2000 asciende a 11,6 UT (valor medio de las concentraciones de la figura 4B). Por tanto, si se acepta que la recarga anual media del acuífero durante este período se ha mantenido constante, puede decirse que solamente una fracción igual a 1,3/11,6=0,112 (11,2%) corresponde al agua infiltrada en el acuífero cárstico con

posterioridad al año 1953. Este dato sugiere, de una forma indicativa, que para una renovación total del agua del acuífero por el agua de las precipitaciones se precisaría un tiempo del orden de 1/0,112=8,9 veces mayor que el transcurrido entre 1953 y 2000, es decir, unos 418 años. Este sería el tiempo medio de renovación del agua del acuífero dado por la relación entre el volumen de agua almacenada en el mismo y la recarga media ($\tau = V/R$).

Por otra parte, para la determinación del tiempo de renovación del agua en acuíferos cársticos a partir de la concentración de tritio se utiliza con frecuencia el método de renovación exponencial o de mezcla total (2). En este método se supone que el agua que penetra en el acuífero en un momento determinado se mezcla con el agua almacenada previamente en un tiempo muy corto comparado con el tiempo de renovación definido anteriormente. Si se admite, además, que tanto la recarga anual media Q como el volumen del acuífero V (recarga igual a descarga) se mantienen constantes a través del tiempo, puede establecerse el siguiente balance para el tritio almacenado en el acuífero:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Variación}$$

$$QC_0(t) - QC(t) = V \frac{dC(t)}{dt} \quad (3)$$

donde $C_0(t)$ es la función de entrada del tritio en el acuífero dada por los valores de la figura 4B, es decir, por los valores de la concentración de tritio corregidos por desintegración radiactiva y $C(t)$ es la función de salida de este radioisótopo.

Introduciendo el tiempo de renovación definido anteriormente, la ecuación diferencial anterior conduce a la expresión siguiente:

$$C_t = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t C_0(t') \exp\left[\frac{(t-t')}{\tau}\right] dt' \quad (4)$$

donde t representa el tiempo presente y t' el tiempo pasado ($t-t'$ es el tiempo transcurrido desde el momento del muestreo hasta el tiempo en que se produjo la infiltración del agua).

Debido a que la función $C_0(t')$ no puede expresarse de una forma analítica, la ecuación anterior se resuelve de una forma discreta transformándola en un sumatorio de 47 términos que indican las contribuciones individuales de las precipitaciones locales durante el período 1953 a 2000 a la

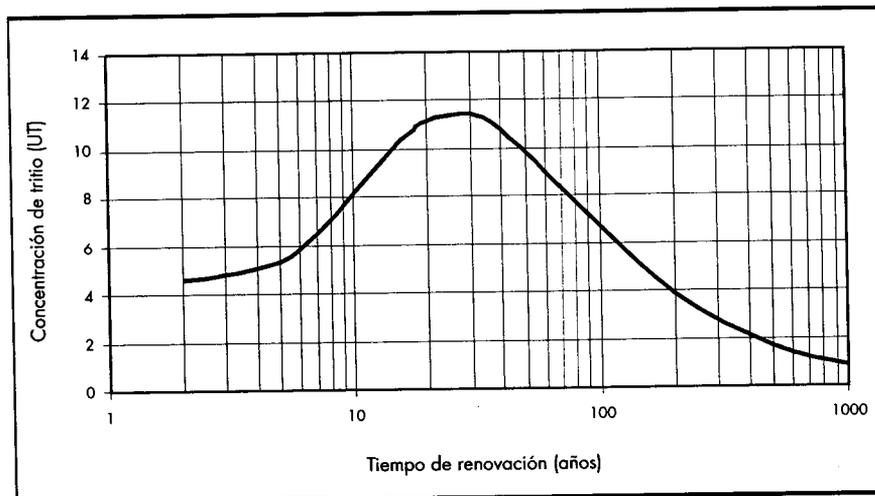


FIGURA 5. Variación de la concentración de tritio en el acuífero cárstico en función del tiempo de renovación del agua según el modelo exponencial. Los valores han sido calculados por medio de la ecuación (4) utilizando los valores de la función $C_0(t')$ definidos en la figura 4B.

Muestra	Tritio (UT)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	^{14}C (% de C moderno)
Manantial termal Balneario de Bellús	1,0±0,30	-10,5	32,6±0,8
Surgencia termal de galería de presa	0,7±0,30	-10,2	34,6±1,3
Manantial de Bellús (abast. de Játiva)	2,0±0,31	-10,8	24,7±1,7
Sondeo profundo surgente	1,0±0,30	-10,6	36,5±1,4

TABLA 3. Concentraciones de tritio, ^{13}C y ^{14}C en cuatro muestras de aguas antiguas.

recarga con tritio del acuífero. El resultado obtenido se muestra en la figura 5, que muestra la variación de la concentración de tritio en el acuífero para diferentes valores del tiempo de renovación (τ). Según esta figura, la concentración de tritio de 1,3 UT correspondería a un tiempo de renovación de unos 600 años, que es algo mayor que el indicado estimado anteriormente a partir de la concentración media de tritio en las precipitaciones (418 años). Debe indicarse que el tiempo de renovación obtenido con el modelo exponencial representa un valor máximo. El valor real es significativamente menor, debido a que una fracción importante del tritio que penetra en el acuífero queda atrapado en la porosidad primaria de la roca, donde el agua se renueva con una lentitud mucho mayor que la del agua que circula por los canales de disolución o por las fracturas de la roca.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, puede estimarse para el tiempo de renovación del agua del acuífero de unos 400 años. Como se supone que la descarga es igual a la recarga y el caudal de descarga de los manantiales es próximo a 980 l/s, el volumen del agua almacenada en el acuífero se obtiene por el producto de estas dos cantidades, dando un valor de $1,24 \times 10^{10} \text{ m}^3$, es decir 12.400 Hm^3 . Suponiendo una superficie del acuífero igual a $500 \times 10^6 \text{ m}^2$ (50 km de largo por 10 km de ancho) y un espesor saturado medio de 300 metros, el volumen de roca saturada sería igual a $15 \times 10^{10} \text{ m}^3$. Dividiendo por este valor el volumen de agua indicado anteriormente, se obtiene una porosidad media de 0,083 (8,3%). Por razones obvias, este dato debe tomarse con muchas reservas debido a las imprecisiones del método. En cualquier caso, si puede decirse que se trata de un acuífero con unas reservas de agua muy importantes, lo cual explica

el hecho de que el caudal del manantial de Bellús, que se encuentra en una cota próxima al nivel piezométrico medio, apenas variara durante el período de extrema sequía acaecido en la zona entre 1993 y 1996.

4.4. CARBONO-14 Y CARBONO-13

Las bajas concentraciones de tritio encontradas en las muestras de agua tomadas de los manantiales cársticos indican la presencia de aguas procedentes de precipitaciones relativamente antiguas. Con el objeto de obtener información complementaria sobre la edad de estas aguas subterráneas, se realizó la medida del ^{14}C y del ^{13}C en cuatro muestras con bajo contenido de tritio. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3, junto con las concentraciones de tritio. La surgencia de la galería de la presa corresponde a un agua termal que tiene el mismo origen que el manantial termal del Balneario de Bellús. El sondeo surgente es un sondeo profundo (unos 150 metros de profundidad) situado unos 200 metros aguas abajo de la presa del embalse.

Como se sabe, el ^{14}C procede, principalmente, del CO_2 del suelo procedente a su vez de los restos de plantas depositados sobre el mismo. A este carbono se llama carbono biogénico y tiene una desviación isotópica $\delta^{13}\text{C}$ igual a -25‰ y una concentración de ^{14}C igual a 13,56 desintegraciones por minuto por gramo de carbono. En cambio, para la roca caliza, estos valores son ambos igual a cero. El CO_2 disuelto por el agua produce la disolución de carbonato cálcico del medio para producir dos moléculas de bicarbonato. Una de estas moléculas procede del carbono biogénico y la otra del carbono de la roca. Por tanto, la desviación $\delta^{13}\text{C}$ en el bicarbonato formado se reduce a $-12,5\text{‰}$. Posterior-

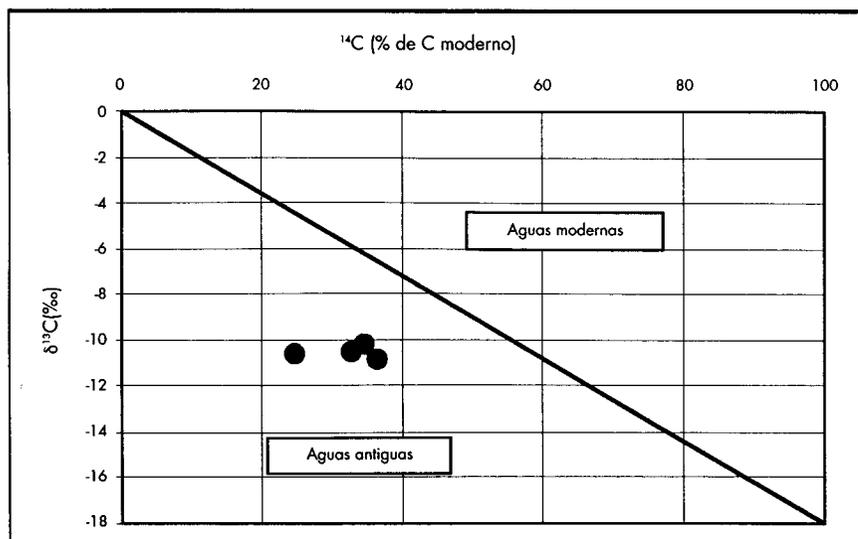


FIGURA 6. Relación entre la concentración de carbono-14 y la desviación isotópica $\delta^{13}\text{C}$ en las cuatro muestras de agua analizadas. La línea recta representa la transición entre las aguas modernas y las aguas antiguas.

mente, este bicarbonato experimenta intercambio isotópico con el CO_2 en exceso del suelo y, al final del proceso de intercambio, se alcanza un equilibrio entre ambos, el cual hace que la desviación $\delta^{13}\text{C}$ en el total del carbono disuelto en el agua tome un valor próximo a -18% . En el caso de formaciones calizas, el contacto del agua con los materiales carbonatados hace que este proceso de intercambio continúe y que el valor de $\delta^{13}\text{C}$ se desplace hacia el valor de la roca (0%) a medida que transcurre el tiempo y progresa dicho intercambio. Lógicamente, la concentración de ^{14}C se desplaza de forma paralela acercándose al valor 0% de la roca. La magnitud en que avanzan estos procesos aumenta con el tiempo de permanencia del agua en el acuífero. Estos datos permiten construir el diagrama de la figura 6, donde se define una línea recta que determina la zona de transición entre aguas modernas y aguas antiguas. Se observa que los cuatro puntos de nuestro estudio se sitúan dentro de la zona correspondiente a las aguas antiguas. Los métodos de cálculo de la edad del agua basados en el ^{13}C y en el ^{14}C proporcionan edades de las aguas muestreadas comprendidas entre 3200 y 5900 años. Pero estos valores carecen de validez, debido a las características del medio por donde circula el agua. Sin embargo, la evolución isotópica del carbono disuelto en el agua confirma el elevado tiempo de permanencia del agua proporcionado por el tritio.

5. CONSIDERACIONES SOBRE LAS FUGAS DE AGUA DEL EMBALSE

Tal como se ha indicado en el apartado 3, la existencia de afloramientos de aguas procedentes del sistema cárstico tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa significa un alto riesgo de la aparición de fugas de agua por debajo del cuerpo de ésta, una vez que el embalse se encuentre en carga. Los mismos circuitos cársticos por donde aflora el agua pueden funcionar como vías de escape del agua embalsada. Este hecho ha sido confirmado por los resultados obtenidos en el estudio a pesar de que el embalse sólo alcanzó, durante el mismo, cotas de llenado muy bajas.

El estudio de las filtraciones del agua del embalse ha sido llevado a cabo por dos métodos diferentes. El primero de ellos ha sido la identificación de aguas del embalse en los sondeos y afloramientos situados aguas abajo de la presa, basándose en las grandes diferencias de composición química e isotópica observadas en estos tipos de aguas. Lógicamente, el estudio se basa en la evolución de los parámetros químicos e isotópicos a lo largo del tiempo. El segundo método consistió en la identificación y medida de los flujos subterráneos que circulaban a través de los sondeos del interior de la galería y perforados a pie de presa, haciendo uso de las técnicas basadas en el marcado del agua contenida en su interior con un trazador salino (sal común). Los métodos utilizados se encuentran descritos en las referencias (1), (3) y (4).

Los ensayos con el trazador salino realizados en los sondeos demostraron la existencia de flujos significativos localizados, principalmente, en la zona de contacto del hormigón de la cimentación con el terreno. Estos ensayos pusieron de manifiesto la necesidad de llevar a cabo una campaña de impermeabilización basada en la inyección de cemento. Esta campaña fue realizada y el resultado fue la desaparición de la mayor parte de los flujos detectados, quedando solamente flujos residuales de cierta consideración en la zona del estribo derecho de la zona, los cuales afectaba a un tramo superior de escaso espesor de los materiales interceptados por dos de los sondeos que fueron perforados.

Los análisis químicos e isotópicos pusieron de manifiesto que, entre los años 1995 y 2000 y a pesar de las bajas cotas de llenado alcanzadas por el embalse, se formó una pluma de agua procedente del embalse, que afectaba a una amplia zona del acuífero situada aguas abajo de la presa. Un sondeo de 30 metros de profundidad situado a unos 150 metros de distancia de ésta contenía en el año 2000 un 100% de agua procedente del embalse. En cambio, un sondeo de 250 metros de profundidad situado junto al anterior, en el cual se habían cementado los niveles superiores, no presentaba indicios de contaminación con agua del embalse. Asimismo, un manantial situado en las proximidades del lecho del río a unos 1100 metros de distancia de la presa presentaba claros indicios de contaminación con este agua. Obviamente, el manantial de Bellús utilizado para abastecimiento de Játiva no presenta riesgo alguno de contaminación con el agua del embalse, debido a encontrarse a una cota unos 30 metros por encima de la que corresponde al lecho del río.

6. RECOMENDACIONES PARA LA SEPARACIÓN DE CAUDALES

Como se ha mencionado anteriormente, las aguas de los afloramientos cársticos tienen una calidad química que la hace apta para el consumo humano, cosa que no puede decirse de las aguas del propio embalse debido a los vertidos de aguas residuales que se realizan aguas arriba en el río Albaida. La existencia del embalse de Bellús posibilita el aislamiento de las aguas de estos afloramientos evitando o reduciendo al mínimo el riesgo de contaminación con el agua del embalse. De esta forma, las aguas cársticas (unos 700 l/s) podrían utilizarse para abastecimiento humano, por ejemplo, en los asentamientos de la costa levantina. Para ello sería necesaria la conducción de las aguas del embalse hasta un punto situado aguas abajo de la zona de afloramiento de las aguas cársticas a través de un canal construido al efecto. La presa o azud para la captación de estas aguas podría situarse a unos 300 metros aguas abajo de la presa, por ejemplo, en el mismo punto en el que se encuentra el azud de captación de las aguas para regadío. Entre este azud y la presa de Bellús se perforaría una batería de pozos de alivio de unos 50 metros de profundidad con el fin de captar las filtraciones procedentes del embalse. De forma paralela, sería necesario realizar las obras pertinentes para la captación y transporte de las aguas de los manantiales cársticos.

7. REFERENCIAS

- (1) A. Plata: *Manual de fugas en embalses*, Monografías, ISSN 0211-6502, ISBN: 84-7790-335-2, 328 pag., CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid, 1994.
- (2) A. Plata Bedmar, E. Pérez Zabaleta, M.F. Díaz Teijeiro, E. Luna Rodríguez y C. Delgado Velasco: *Tiempo de renovación del agua en el acuífero cárstico de Campo de Montiel obtenido a partir del tritio de origen termonuclear*, VI Congreso de Geoquímica de España, 18-22 Octubre 1995, Soria, España.
- (3) A. Plata y L. Araguás: *Medida de flujos subterráneos mediante ensayos con trazadores en sondeos en relación con el estudio de fugas en embalses*. Ingeniería Civil, número 115/1999, pág. 121-129.
- (4) A. Plata Bedmar, L. Araguás Araguás: *Detection and Prevention of Leaks from Dams*, A.A. Balkema Publishers, Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo, 419 pp. 2002.