

Evaluación de la recarga moderna de la unidad hidrológica Los Arenales usando técnicas isotópicas

A. PLATA BEDMAR (*); E. PÉREZ ZABALETA (**); J. MORENO SÁNCHEZ (***)

RÉSUMEN El acuífero detrítico terciario de Los Arenales ocupa una superficie de unos 7600 Km² y tiene una profundidad que supera los 500 metros. El acuífero está formado por numerosos lentejones arenosos conectados entre sí por una matriz arcillosa de baja permeabilidad. Dependiendo del área, el acuífero puede ser confinado, semiconfinado o de libre recarga. Un estudio ha sido realizado usando técnicas químicas e isotópicas, habiéndose realizado los siguientes análisis: 141 muestras para química, la misma cantidad para ¹⁸O, 48 muestras para deuterio, 50 para ¹⁴C y ¹³C y 145 para tritio natural. El comportamiento dinámico del acuífero ha sido estudiado a partir de la distribución de estos parámetros químicos e isotópicos. Los resultados de ¹⁴C muestran que la mayor parte del agua extraída del acuífero tiene una "edad" superior a 1000 años. El tritio y el ¹⁴C han permitido la identificación de la recarga moderna (posterior al año 1953). Esta recarga ha sido determinada a partir del balance de tritio, para lo cual el acuífero ha sido subdividido en 132 áreas poligonales (polígonos de Thiessen). Se ha obtenido un valor de la recarga media igual a 32 mm/año, que resulta consistente con los valores obtenidos usando métodos convencionales. La distribución de la recarga ha sido analizada y las zonas de recarga preferencial han sido identificadas.

EVALUATION OF MODERN RECHARGE OF THE AQUIFER LOS ARENALES USING ISOTOPE TECHNIQUES

ABSTRACT The detritic aquifer Los Arenales of Tertiary age has a surface of about 7600 Km² and a depth which reaches values over 500 m. The aquifer is formed by numerous sandy lens which are connected by a clayey matrix of very low permeability. Depending on the area, the aquifer can be confined, semiconfined or free-recharged. A study has been carried out using hydrochemical and isotope methods. About 141 water samples were collected for chemical analysis, the same amount for ¹⁸O, 48 for D, 50 for ¹⁴C and ¹³C and 145 for natural tritium. The dynamic behaviour of the aquifer has been studied on the basis of the distribution of these chemical and isotopic parameters. The results of ¹⁴C and ¹³C have shown that most of the water pumped out from the aquifer comes from old recharge (over 1000 years old). The combined use of tritium and ¹⁴C has allowed the identification of modern recharge (after 1953). This recharge has been evaluated from the tritium balance by subdividing the aquifer in 132 polygonal zones (Thiessen polygons). A value of the average recharge equal to 32 mm/year has been obtained which is consistent with the values obtained using conventional methods. The distribution of the recharge has been analyzed and the preferential recharge zones have been identified.

Palabras clave: Recarga; Los Arenales; Acuífero; Tritio; Carbono-14; Deuterio; Oxígeno-18.

1. INTRODUCCIÓN

El tritio liberado en la atmósfera como consecuencia de los ensayos de armas termonucleares realizados a partir del año 1952 se usa, frecuentemente, en estudios hidrológicos para identificar la presencia en los acuíferos de aguas infiltradas con posterioridad a este año (Robertson y Chery, 1989; Rabinowitz et al, 1965). Generalmente, el tritio se usa como una herramienta de carácter cualitativo. Las posibilidades ofrecidas por el tritio para obtener información cuan-

titativa sobre la recarga y tiempo de renovación del agua en acuíferos ha sido analizada por diversos autores (A. Plata, 1993; Larson et al, 1987; Herweijer et al, 1985).

En el presente estudio, se trata de obtener información cuantitativa o semicuantitativa sobre la recarga procedente de las precipitaciones de los últimos 40 años del acuífero detrítico terciario de Los Arenales situado en la margen izquierda del río Duero en las provincias de Valladolid, Zamora, Salamanca, Ávila y Segovia. Se trata de un acuífero que ocupa una superficie de unos 7600 km² y una profundidad que supera los 500 m. La determinación de la recarga se basa en la comparación de los balances de tritio en las precipitaciones locales y del tritio infiltrado en el acuífero durante el período antes citado. La información que se presenta forma parte de un estudio más general realizado por encargo de la Dirección General de Obras Hidráulicas del

(*) Licenciado en Ciencias Químicas. CETA-CEDEX (Ministerio de Fomento).

(**) Ingeniero de Caminos. CETA-CEDEX (Ministerio de Fomento).

(***) Licenciado en Ciencias Geológicas. GEOCISA.

Ministerio de Fomento utilizando diversas técnicas hidroquímicas e isotópicas. Concretamente, dentro del marco del estudio, se han llevado a cabo los siguientes análisis de muestras de agua:

- Composición química de 141 muestras (componentes mayoritarios).
- Análisis de los isótopos estables del agua deuterio (^2H) y oxígeno-18, respectivamente, en 141 y 48 muestras de agua.
- Carbono-14 y carbono 13 en 50 muestras.
- Tritio en 145 muestras.

Todas estas muestras han sido tomadas de sondeos sometidos a bombeo y distribuidos por toda la superficie del acuífero. Tan sólo 6 muestras han sido tomadas de manantiales y ríos.

2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Unidad Hidrogeológica de la región de Los Arenales se encuentra en la Depresión del Duero, en su sector meridional, la cual está enclavada en el macizo Hespérico. El área madre de los sedimentos terciarios está formada, en el borde Sur y Suroeste, por las rocas plutónicas y metamórficas del Sistema Central y del macizo Galaico-Portugués y por rocas silicoclásticas y carbonatadas mesozóicas de la Cordillera Ibérica en el borde Este y Sureste (Fig. 1). Las diferentes unidades estratigráficas se sitúan de forma discordante sobre un substrato ígneo y metamórfico en los bordes Sur y Oeste. En cambio, en el borde Este, presenta una continua actividad tectónica, dando lugar a discordancias progresivas. El espesor de los materiales sedimentarios aumenta hacia el Este debido a esta subsidencia diferencial.

El relleno de la cuenca sedimentaria estuvo dominado por la formación de orlas de abanicos aluviales dirigidos hacia el centro de la misma. Sobre estos abanicos, se desarro-

llaron sistemas fluviales de canales de tipo "braided", anastomados o meandriiformes con llanuras de inundación marginales. En las zonas centrales, se instalaron sistemas palustres y lacustres. El resultado es un entramado de unidades y facies sedimentarias interdigitadas y lenticulares, que pueden agruparse en dos tipos de facies:

Facies marginales de carácter conglomerático y areniscoso, que se encuentran adosadas a los relieves graníticos y metamórficos del Paleozoico y carbonatados del Mesozoico.

Facies centrales de naturaleza detritica, margosa y calcárea, superpuestas unas a otras, las cuales ocupan la mayor parte de la Unidad Hidrológica de Los Arenales.

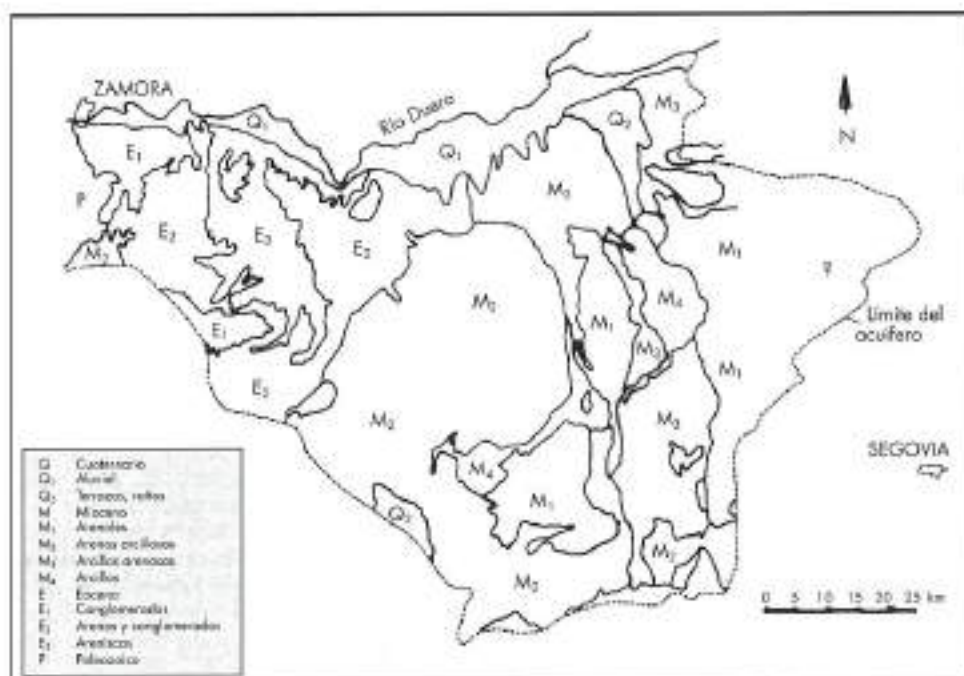
La manifestación tectónica más importante es la falla Alba-Villoria con un salto en la zona de unos 400 metros. Esta falla separa dos dominios sedimentarios diferentes, el occidental dominado por sedimentos del Paleógeno y el oriental por sedimentos del Mioceno Medio y Superior. Su situación corresponde al contacto entre los materiales del Mioceno y Eoceno (Fig. 1).

3. HIDROGEOLOGÍA

La Unidad Hidrológica de Los Arenales se desarrolla en las cuencas medias y bajas de los ríos Cega, Eresma y Voltoya y casi en la totalidad de las cuencas de los ríos Adaja, Zarpadil, Trabancos, Guareña y Valparaíso. Los ríos Eresma y Voltoya se comportan como ganadores de caudal en todo su recorrido, mientras que los ríos restantes son perdedores excepto en su cabecera. El aporte anual medio de estos ríos al río Duero es del orden de 25 Hm³. La mayor parte de la recarga del acuífero tiene lugar por infiltración directa de las precipitaciones.

En la Unidad Hidrológica, se definen diferentes acuíferos. Los más superficiales son acuíferos libres y se encuentran constituidos por arenas cuaternarias de origen aluvial-eólico y algunos lentejones arenosos terciarios situados próximos a la superficie. Estos acuíferos superficiales se en-

FIGURA 1. Geología de superficie



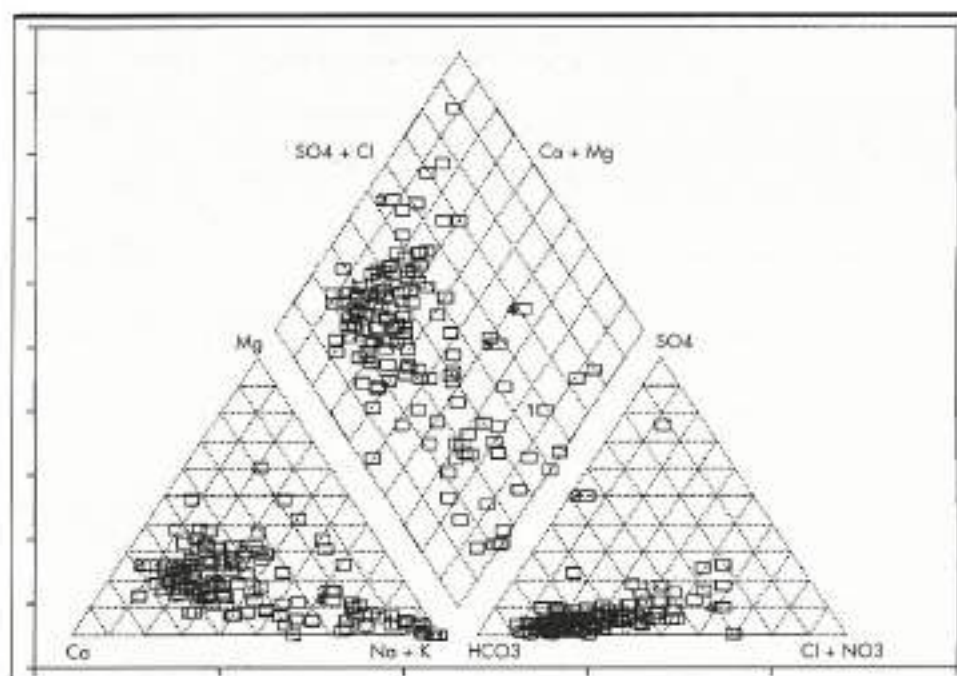


FIGURA 2. Diagrama de Piper.

cuentran, en la actualidad, prácticamente, agotados. El llamado acuífero profundo¹ es confinado o semiconfinado y está compuesto por lentejones de materiales detríticos gruesos (arenas y gravas) englobados en una matriz arcillo-arenosa de baja permeabilidad. Presenta un espesor comprendido entre 500 y 1000 m, aumentando hacia el centro de la cuenca. Los niveles acuíferos tienen una proporción arena/arcilla que varía entre el 50 y el 80%, mientras que, en los acuitardos intercalados, esta relación es mucho menor.

Los datos piezométricos indican la existencia de un potencial hidráulico que varía con la profundidad. La morfología de las isopiezas elaboradas para el acuífero profundo indica que este acuífero no está influenciado por los ríos que drenan la Unidad. Los mapas piezométricos indicarían la existencia de un flujo regional dirigido de Sur a Norte, es decir, descargando en el río Duero.

Se estima que el acuífero se recarga por infiltración de, aproximadamente, el 40% de la lluvia útil (deduciendo la evapotranspiración). La pluviometría media anual de la zona varía entre 309 mm en la estación de Alaejos (Valladolid) y 626 mm en la estación de Cillán (Ávila) para un período de observación de 46 años. La precipitación total en el año medio asciende a unos 3000 Hm^3 . La evapotranspiración real, considerando una hipótesis de reserva en el suelo de 60 mm y un porcentaje del 84% de la precipitación media, es de 2600 Hm^3 . El volumen de lluvia útil asciende a unos 500 $\text{Hm}^3/\text{año}$. Por tanto, la recarga anual media ascendería, aproximadamente, a $500 \times 0,4 = 200 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

Las descargas más importantes del acuífero son las efectuadas mediante la explotación de sondeos. Estos explotan el acuífero multicapa hasta una profundidad de unos 350 metros. El 95% de las extracciones se destinan a riego y tie-

nen lugar entre los meses de Mayo a Septiembre. El volumen medio anual extraído durante el período 1992-93 se estima en unos 320 Hm^3 . Con este nivel de explotación se produce un descenso medio generalizado del nivel piezométrico próximo a 1 metro.

4. QUÍMICA DEL AGUA

Por razones de espacio, no es posible presentar los resultados de los 141 análisis químicos realizados. Nos limitamos, por tanto, a presentar las conclusiones más sobresalientes derivadas de los mismos. Estas pueden resumirse en los siguientes puntos:

- 1) Según el diagrama de Piper que se muestra en la Fig. 2, las aguas subterráneas del acuífero Los Arenales presentan una composición química muy variable, si bien se observa que existe un claro predominio de las aguas bicarbonatadas cálcicas. La contribución media a la salinidad del agua de los aniones mayoritarios puede expresarse como el aumento de la concentración de estos iones para un incremento determinado de la conductividad. Esta contribución asciende a 1, 0,3 y 0,13 meq/l por cada 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, para los iones CO_3H^- , Cl^- y SO_4^{2-} .
- 2) Todos los mapas hidroquímicos elaborados reflejan una distribución absolutamente irregular de las concentraciones iónicas y de los índices químicos calculados a partir de éstas. Estas distribuciones no resultan compatibles con la existencia en el acuífero de un importante flujo subterráneo regional que implique una recarga preferencial en la zona Sur del acuífero y una descarga en el río Duero, tal como se desprende de los mapas piezométricos elaborados.
- 3) En consonancia con lo expuesto en el punto anterior, los mapas hidroquímicos muestran que el río Duero, no sólo no recibe una descarga significativa del acuífero, sino que, por el contrario, contribuye a la recarga del acuífero en determinados tramos de la zona de contacto con el mismo.

(1) En realidad, no puede hablarse de un sólo acuífero profundo, sino de muchos de ellos, como se desprende de los resultados obtenidos en el presente estudio.

- 4) Como se ha mencionado anteriormente, la falla Alba-Villoria delimita dos dominios litológicos diferentes del acuífero. Este hecho se refleja en todos los mapas hidroquímicos.

5. ISÓTOPOS ESTABLES

Lo mismo que sucede con la composición química, la composición isotópica del agua subterránea presenta una distribución absolutamente irregular incompatible con la existencia de un flujo regional importante. Debe tenerse en cuenta que los isótopos estables son trazadores naturales que se encuentran incorporados en la propia molécula del agua y, por tanto, su concentración no se modifica una vez que el agua se ha infiltrado en el terreno salvo por mezclado de aguas con distinta composición isotópica.

Los valores obtenidos para la desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}$ en las 141 muestras analizadas varían entre $-6,99$ y $-9,31\text{‰}$ con un máximo situado entre $-8,2$ y $-8,8\text{‰}$, tal como se refleja en el histograma de la Fig. 3. A. Plata (1994) ha elaborado recientemente un mapa que refleja la distribución general de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ en las aguas subterráneas de la Península Ibérica. De acuerdo con este mapa, el valor medio de esta desviación isotópica del agua de la zona del estudio debería estar comprendido entre $-9,0$ y $-9,5\text{‰}$. La diferencia entre este valor y los valores experimentales encontrados sólo puede explicarse por evaporación del agua de recarga antes y durante el proceso de infiltración: debido a la evaporación preferencial de las moléculas ligeras, la composición isotópica del agua infiltrada se desplaza hacia valores de δD y $\delta^{18}\text{O}$ menos negativos.

La evaporación del agua infiltrada se pone de manifiesto con mayor claridad cuando se analiza el diagrama $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ mostrado en la Fig. 4. Como se sabe, la mayor parte de las aguas meteóricas del globo se ajustan en este tipo de diagramas a una línea recta que obedece a la ecuación $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$. Los resultados obtenidos por A. Plata (1994) para las aguas subterráneas de la Península Ibérica

recargadas a partir de las precipitaciones procedentes de frentes atlánticos indican que estas aguas se ajustan mejor a la ecuación general $\delta\text{D} = (7,09 \pm 0,24) \delta^{18}\text{O} + (4,58 \pm 4,89)$. Las dos líneas anteriores se encuentran representadas en la Fig. 4. Puede verse que casi todos los puntos correspondientes a las 48 muestras analizadas se sitúan a la derecha de estas líneas. Ello es, claramente, indicativo de la evaporación del agua. Los puntos correspondientes a las aguas del acuífero pueden obtenerse por evaporación de aguas de las precipitaciones con líneas de evaporación de pendientes comprendidas entre 4 y 5, que son los valores más frecuentes.

El hecho de que las aguas del acuífero hayan experimentado una fuerte evaporación es indicativo de un proceso lento de infiltración: el agua tiene que permanecer largos períodos de tiempo acumulada en las depresiones del terreno o en la capa superior de la zona no saturada antes de infiltrarse. Por tanto, ello indica también una recarga pequeña.

Por otra parte, en la mayor parte de los diagramas $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ de aguas subterráneas, es normal que los valores δ más negativos se ajusten bien a la línea correspondiente a las aguas meteóricas y que, en cambio, los valores δ menos negativos se desvíen hacia la derecha de esta línea debido al efecto de la evaporación del agua. Sin embargo, en nuestro caso, también las aguas con valores δ más negativos, situados en el extremo inferior de la nube de puntos, caen a la derecha de la línea de aguas meteóricas, indicando que son también aguas evaporadas. La composición isotópica original de estas puede estimarse admitiendo una pendiente de la línea de evaporación igual a 5. Se llega así a un agua con valores de δD comprendidos entre -70 y -75‰ y $\delta^{18}\text{O}$ entre -10 y -11‰ . Estos valores tan negativos no se encuentran en las precipitaciones medias actuales de la zona ocupada por el acuífero y sólo puede explicarse como aguas procedentes de cotas altas de la Cordillera Central (efecto de altitud) o bien como aguas muy antiguas procedentes de precipitaciones acaecidas en condiciones climáticas más frías que las

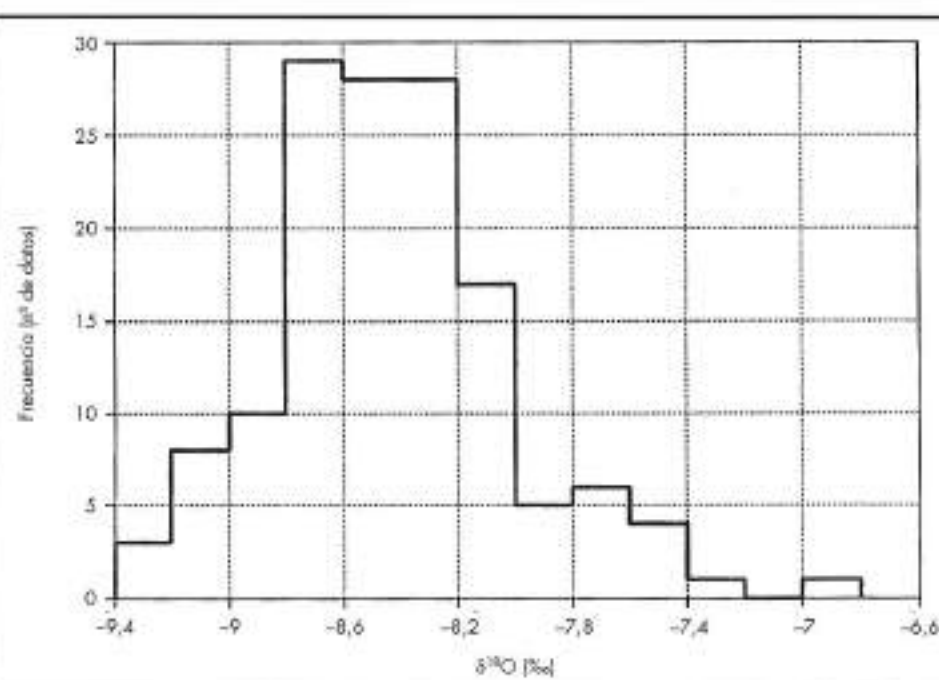


FIGURA 3. Histograma de los valores de $\delta^{18}\text{O}$.

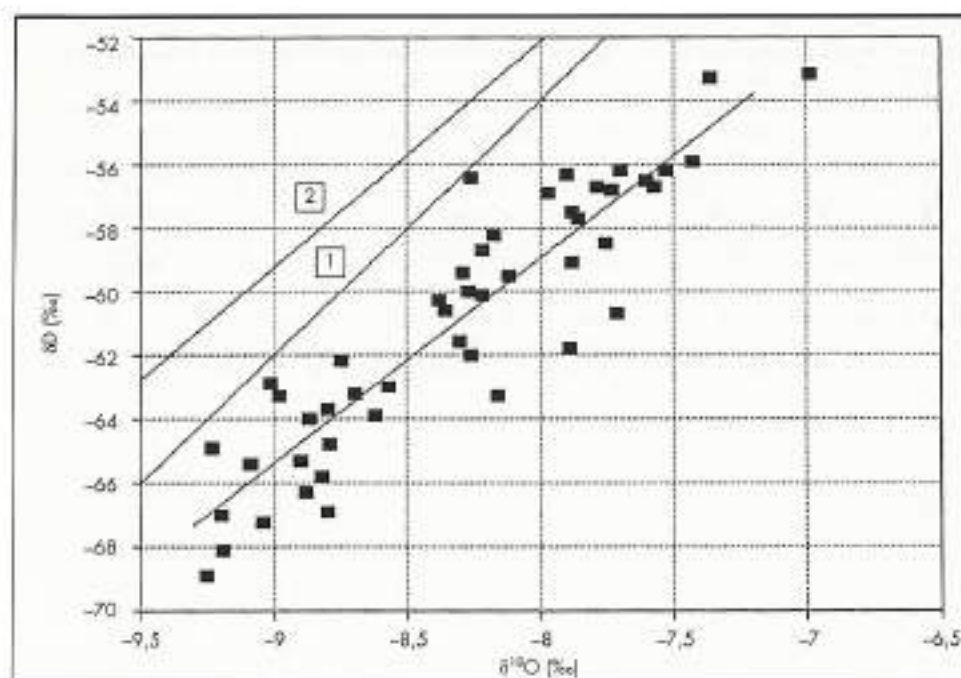


FIGURA 4. Diagrama $\delta D-\delta^{18}O$. 1: línea mundial de aguas meteorológicas. 2: línea de aguas subterráneas de la Península Ibérica.

actuales (períodos interglaciares). Más adelante veremos como el ^{14}C demuestra la existencia en el acuífero de aguas de estas edades tan elevadas.

6. TRITIO DE ORIGEN TERMONUCLEAR

Como se sabe, el tritio liberado en la atmósfera con motivo de los ensayos termonucleares realizados a partir del año 1952 proporciona información sobre la presencia en el acuí-

fero de aguas infiltradas con posterioridad a este año. En el caso presente, el tritio sólo puede encontrarse, por razones obvias, en las zonas de libre recarga del acuífero, donde afloran los estratos permeables.

Los resultados obtenidos en el estudio se presentan en la Fig. 5. A cada uno de los 132 valores correspondientes a otros tantos sondeos, se ha atribuido una zona poligonal de influencia (polígonos de Thiessen) con el fin de evaluar la recarga moderna del acuífero como se muestra más adelante.

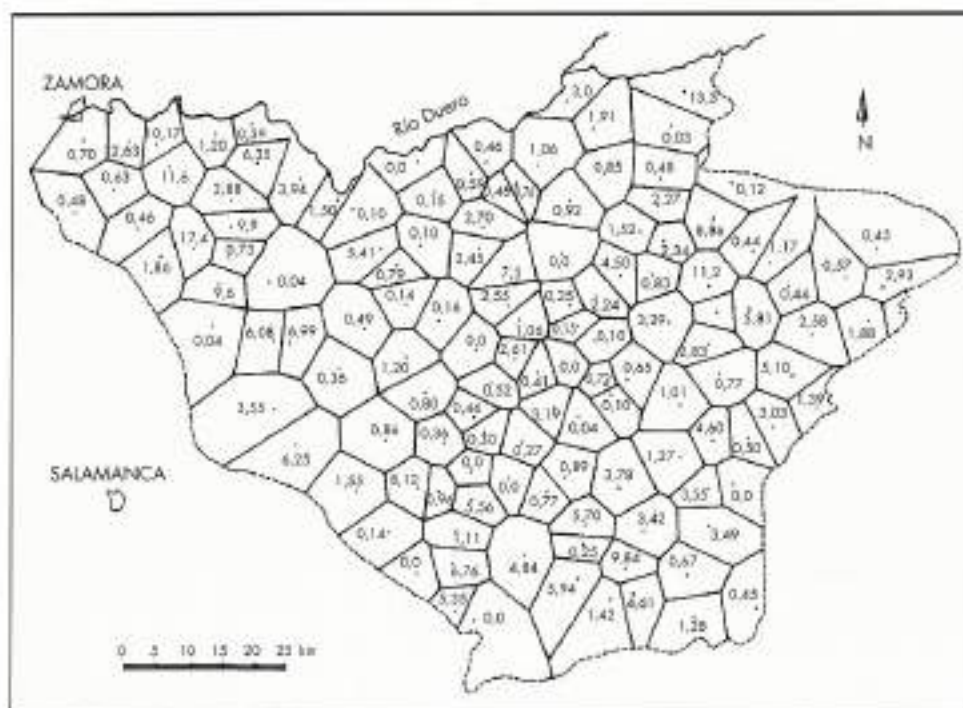


FIGURA 5. Distribución de la concentración de tritio.

Los valores de concentración vienen expresados en unidades de tritio (UT) y los márgenes de error, representados por la desviación estándar, oscilan entre 0,28 UT para los valores de concentración más bajos y 0,50 UT para los más altos.

Para una interpretación correcta de los resultados, es preciso saber cuáles han sido las concentraciones de tritio en las precipitaciones medias de la zona del estudio a partir del año 1953. La medida directa de la concentración de tritio en las precipitaciones de Madrid y Barcelona fue iniciada por el CEDEX en el año 1970. Los datos de Madrid son, perfectamente, válidos para la zona del estudio. Las concentraciones de tritio para el período 1953-1970, del cual se carece de medidas directas, se calcula siguiendo los modelos encontrados en estaciones donde existen datos más completos, tales como las de Viena u Ottawa, o bien, como se ha hecho en el caso presente, utilizando un modelo más general válido para todo el Hemisferio Norte elaborado por A. Plata (1993). Obviamente existe un modelo único de distribución porque los ensayos termoneutrones afectaron a todo el globo, pero los valores absolutos de concentración varían de unos puntos a otros.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1. Las concentraciones de tritio indicadas en esta tabla corresponden a las precipitaciones medias anuales excluyendo el período del año comprendido entre los meses de Mayo y Septiembre (ambos inclusive) cuando se supone que la recarga del acuífero es nula debido a que la evapotranspiración supera a la precipitación. Las cifras indicadas entre paréntesis son los valores de la concentración corregidos por desintegración radiactiva del tritio hasta el año 1994 cuando se realizó el muestreo del agua. Los resultados indican que las concentraciones medias de tritio a partir del año 1956 han sido siempre superiores a unas 6 UT, alcanzando un valor de 247 UT para el año 1963 (valores corregidos por desintegración). Numerosas muestras de aguas muy recientes de la

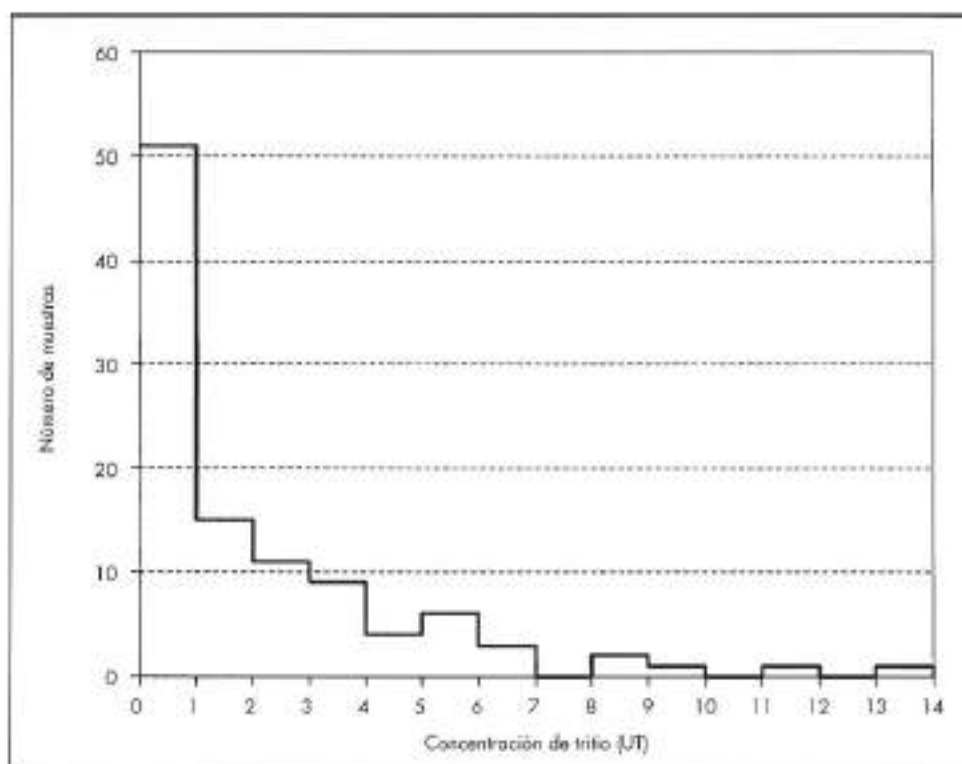
zona del estudio y de otras zonas de la Península indican que las concentraciones medias de tritio de las precipitaciones de los últimos 4 ó 5 años varían entre 6 y 7 UT.

De acuerdo con los datos anteriores, resulta claro que todas las muestras con concentraciones inferiores a unas 6 UT contienen aguas procedentes, total o parcialmente, de precipitaciones anteriores al año 1956. De la misma forma, puede decirse que todas las muestras con concentraciones inferiores a unas 0,5 UT contienen fracciones despreciables de aguas procedentes de precipitaciones posteriores a 1956. Esto último sucede en amplias zonas del acuífero según puede verse en la Fig. 5. Solamente 8 muestras de las 132 analizadas dieron valores superiores a 6 UT y 52 muestras dieron valores inferiores a 1 UT, tal como puede verse en el histograma de la Fig. 6. Obviamente, las concentraciones comprendidas entre 5 y 6 UT corresponden a mezclas de aguas procedentes, respectivamente, del período anterior y posterior a 1956.

Por otra parte, la irregular distribución de la concentración de tritio, reflejada en el mapa de la Fig. 5, refuerza la conclusión expuesta en apartados anteriores relativa a la ausencia de un flujo regional importante, que debería producir un efecto mezclador del agua subterránea. Este mapa de distribución refleja una recarga moderna concentrada en áreas muy concretas, por ejemplo, en la cabecera de los ríos Adaja, Zarpadil, Trabancos y Guareña. Más adelante se aporta información más amplia sobre este punto.

Debido al reciclado del agua subterránea usada para riego, se observa una cierta correlación entre la concentración de ión NO_3^- y la de tritio. Las altas concentraciones de este ión coinciden, generalmente, con zonas de alta permeabilidad de los estratos superiores y, por tanto, con elevadas concentraciones de tritio. Obviamente, el ión NO_3^- procede, principalmente, del uso de abonos minerales con fines agrícolas.

FIGURA 6. Histograma de los valores de concentración de tritio.



AÑO	CONC. (UT)	AÑO	CONC. (UT)	AÑO	CONC. (UT)
1953	11,7 (1,2)	1967	148,1 (32,9)	1981	28,4 (13,8)
1954	127,4 (13,7)	1968	113,0 (26,5)	1982	14,4 (7,4)
1955	18,4 (2,1)	1969	107,0 (26,5)	1983	13,2 (7,1)
1956	81,5 (9,8)	1970	143,9 (37,7)	1984	16,7 (9,6)
1957	52,4 (6,7)	1971	139,3 (38,6)	1985	11,6 (7,0)
1958	260,2 (35,0)	1972	56,7 (16,6)	1986	11,2 (7,2)
1959	204,2 (29,0)	1973	60,7 (18,8)	1987	10,2 (6,9)
1960	70,6 (10,6)	1974	56,3 (14,8)	1988	11,1 (7,9)
1961	74,7 (11,9)	1975	60,4 (20,9)	1989	7,2 (5,4)
1962	385,2 (64,7)	1976	21,7 (8,0)	1990	7,4 (5,9)
1963	1392,8 (247,2)	1977	28,5 (11,0)	1991	5,1 (4,3)
1964	749,3 (140,7)	1978	27,3 (11,2)	1992	7,0 (6,3)
1965	380,2 (75,5)	1979	18,9 (8,2)	1993	7,0 (6,6)
1966	255,2 (53,6)	1980	13,9 (6,4)		

TABLA 1. Concentraciones de tritio en las precipitaciones medias anuales (período útil de recarga) de la zona de estudio durante el periodo 1952-1993. Los valores situados entre paréntesis indican las concentraciones corregidas por desintegración radiactiva hasta el año 1994.

7. CARBONO-14 Y CARBONO-13

La tabla 2 refleja las concentraciones de ^{14}C y ^{13}C obtenidas para las 50 muestras analizadas. La columna 2 contiene la concentración de ^{14}C expresada como porcentaje del patrón universal de carbono moderno junto con los valores de la desviación estándar. La columna 3 indica la desviación isotópica $\delta^{13}\text{C}$. La desviación estándar de estos valores es, aproximadamente, 0,5‰. La cuarta columna muestra la "edad media" del agua subterránea calculada como se indica más adelante. Por último, la columna quinta refleja la concentración de tritio obtenida para las mismas muestras de agua donde se ha analizado el carbono-14.

Se observa en la tabla que muchas de las muestras con edades de ^{14}C elevadas contienen concentraciones significativas de tritio. Esto no constituye una incongruencia, porque las aguas subterráneas extraídas de cualquier sondeo están siempre constituidas por una mezcla de aguas de diferentes edades, pudiendo contener aguas recientes con tritio, situadas, lógicamente, en los estratos superiores del acuífero, junto con aguas profundas muy antiguas y, por tanto, con un bajo contenido de ^{14}C . En realidad, incluso el agua contenida dentro de un mismo estrato o lentejón permeable, no tiene nunca una edad única, sino que procede de la infiltración ocurrida durante periodos de tiempo muy largos.

Por otra parte, se observa la existencia de 14 muestras con valores negativos de la edad. Estos se justifican, en parte, por los errores analíticos de la técnica de medida, en parte, por los errores de los métodos de corrección de la edad utilizados y, sobre todo, por la presencia en el agua de ^{14}C procedente de los ensayos nucleares posteriores a 1952. Lógicamente, estos valores negativos corresponden a aguas subterráneas procedentes de precipitaciones recientes, cosa que se refleja por su elevado contenido de tritio.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ varían entre -9,5 y -16,9‰, con un valor medio de -12,1‰. Estos valores son normales para aguas subterráneas e indican un origen biogénico del CO_2 disuelto por el agua durante el proceso de infiltración, con $\delta^{13}\text{C}$ alrededor de -25‰, así como la presencia de carbono

procedente de los carbonatos del medio con $\delta^{13}\text{C}$ próximo a 0‰, incorporado al agua a través de los procesos de disolución y equilibrado posterior con el CO_2 , los cuales ocurren en todos los casos.

El cálculo de la edad t se lleva a cabo por medio de la expresión siguiente basada en la ley fundamental de la radiactividad:

$$t = 8267 \ln \frac{A_0}{A_t} \quad [1]$$

El término A_0 representa la llamada actividad inicial de ^{14}C , la cual equivale al porcentaje de carbono del agua subterránea que procede del CO_2 biogénico incorporado a la misma durante el proceso de infiltración. Obviamente, este carbono biogénico es el que aporta el ^{14}C y no el carbono de la formación rocosa que, por tratarse de carbono fósil, se encuentra, generalmente, exento de este radioisótopo. A_t refleja la concentración de ^{14}C encontrada en el agua y corresponde a los datos de la segunda columna de la tabla 2 expresados como porcentaje de carbono moderno.

La Fig. 7 muestra la relación existente entre los valores de A_t y la concentración de tritio. Se observa que las aguas procedentes de precipitaciones recientes, caracterizadas por sus elevadas concentraciones de tritio, tienen un porcentaje de ^{14}C alrededor del 65%. Este es, por tanto, el valor de equilibrio que alcanza el agua una vez que se infiltra en el acuífero y el CO_2 se consume por disolución de carbonatos. Este sería también el valor aproximado del término A_0 de la ecuación anterior. Cualquier disminución de A_t con respecto al valor del 65% puede expresarse en términos de "edad" del agua subterránea.

Seis procedimientos diferentes para la determinación del valor de A_0 y, por tanto, para la corrección de la edad proporcionada por el ^{14}C han sido descritos hasta el momento presente. Estos son los elaborados por M.A. Tamers (1967), F.J. Pearson Jr. y B.B. Hanshaw (1970), R. Gonfiantini (1988), W.E. Mook (1976), J.Ch. Fontes y Garnier (1977) y L. Eichinger (1983). Los seis procedimientos han sido utilizados

SONDEO	CARBONO-14 % C moderno	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	"EDAD" (años)	TRITIO (UT)
3	35,1 $\pm$ 0,70		4930	0,04
6A	65,7 $\pm$ 1,31	-12,7	-410	13,6
7	18,3 $\pm$ 0,29	-12,3	10680	0,7
13	41,9 $\pm$ 0,77		3170	0,17
19	22,3 $\pm$ 0,28	-12,1	8160	0
28	1,7 $\pm$ 0,16	-10,3	27960	0,03
34	71,8 $\pm$ 0,99	-11,8	-550	9,9
36	60,8 $\pm$ 0,45		270	1,5
43	53,8 $\pm$ 0,95		1900	0,59
50	56,1 $\pm$ 0,50	-12,5	670	1,5
54	3,3 $\pm$ 0,26	-11,5	23000	0,12
56	50,9 $\pm$ 0,66	-12,7	1600	1,86
62	25,9 $\pm$ 0,49		7060	
66	74,3 $\pm$ 1,02	-11,8	-1370	5,4
71	39,6 $\pm$ 0,48	-13,2	4200	2,4
72	38,5 $\pm$ 0,72		4000	7,3
76	19,1 $\pm$ 0,52		8990	0
78	65,2 $\pm$ 0,60	-13,1	-260	4,5
83F	66,2 $\pm$ 0,72	-13,4	450	11,2
85	7,2 $\pm$ 0,40		16830	0,44
92	33,9 $\pm$ 0,53	-16,1	6270	2,9
93	8,5 $\pm$ 0,70	-10,9	15380	0,04
95F	62,7 $\pm$ 0,52	-13,9	710	7,0
100	36,8 $\pm$ 0,46	-14,4	5450	0,16
116	62,3 $\pm$ 0,70	-12,4	-280	2,8
126	63,4 $\pm$ 0,55	-10,9	-470	3,6
133	48,7 $\pm$ 0,47	-12,9	2500	0,52
141	26,5 $\pm$ 0,53	-12,3	6560	1,0
141A	23,2 $\pm$ 0,91	-12,9	8700	2,9
146	60,5 $\pm$ 0,58	-14,9	1650	1,4
149	36,3 $\pm$ 0,45	-13,0	4870	0,86
159	27,6 $\pm$ 0,31	-13,4	7300	1,3
165	53,5 $\pm$ 0,50	-13,9	1740	1,5
172A	72,3 $\pm$ 0,51	-10,7	-1700	5,6
178A	32,7 $\pm$ 0,52	-13,7	5860	3,6
176	23,3 $\pm$ 0,44	-13,5	8370	3,8
180A	15,2 $\pm$ 0,28	-9,8	10360	0
183	63,2 $\pm$ 0,82		580	6,8
186	4,3 $\pm$ 0,13	-9,5	19240	0,3
189A	8,1 $\pm$ 0,14	-11,4	-2520	0,6
193	27,9 $\pm$ 0,52	-14,0	7170	0,05
196	41,0 $\pm$ 0,47	-14,5	4260	1,3
202	57,8 $\pm$ 1,00	-16,9	2310	0,48
213	28,5 $\pm$ 0,33	-14,0	6990	1,2
216	45,4 $\pm$ 0,48	-13,3	2760	0,86
233	55,2 $\pm$ 0,60	-12,5	1330	0,15
254	10,0 $\pm$ 0,34	-12,0	13790	0,15
259	17,6 $\pm$ 0,39	-11,7	10070	0,36
262	14,7 $\pm$ 0,27	-13,3	11970	0,65
268	57,8 $\pm$ 0,51	-11,9	350	0,76

TABLA 2. Resultados de los análisis de ^{14}C y ^{13}C .

en el caso presente para calcular la edad. Debido a la gran variabilidad de las características hidrogeológicas del acuífero, principalmente, en lo que se refiere al grado de confinamiento del agua subterránea, es difícil definir cuales de estos seis métodos son los más apropiados para el caso presente. Debido a ello, se ha optado por utilizar el valor medio de las edades obtenidas por los seis métodos. Las dife-

rencias entre los valores individuales proporcionados por estos métodos con respecto al valor medio son elevadas, pudiendo llegar hasta unos 2000 años. Por tanto, las "edades" de ^{14}C deben considerarse como valores medios de una amplia franja de edades del agua. Sin embargo, a efectos de evaluación de la recarga moderna, la exactitud de los valores resulta suficiente, como se verá mas adelante.



KA-TE: Número uno en el mundo en reparación de tuberías sin excavación

Adherencia

Para conseguir una adherencia óptima del epoxi al tubo, así como un relleno perfecto, se fresan las fisuras, las juntas y los bordes de las roturas (de 25 a 30 mm).



Impermeabilidad

La resina ha sido especialmente fabricada por MBT para KA-TE, y puede ser aplicada también bajo el agua, con garantía de una excelente adherencia durante años.



Versatilidad

Además de fresar juntas y fisuras, se puede utilizar como el más eficaz cortaraíces.



Potencia

Gracias al potente motor de la fresadora (4'5 c.v.), el robot elimina sedimentos duros, como lechada de hormigón.



Precisión

Con la fresadora de diamante pueden cortarse con precisión las acometidas que sobresalen, ajustándolas a la pared interior del tubo.



Ajuste

Las acometidas defectuosamente entroncadas se ajustan mediante un encofrado hinchable que se introduce desde la tubería principal.



Alta tecnología suiza, ahora en España.



GRUPO
FCC


COINUSA
Conservación
de Infraestructuras
Urbanas, S.A.

Camino de Hornigueras, 131. 28031 Madrid
Tel.: 778 13 15. Fax: 778 16 57

HAY CARRETERAS DONDE NI SIQUIERA MODIFAL PODRIA EVITAR EL AQUA-PLANNING.



PERO HAY OTRAS MUCHAS DONDE SI PODRIA. DONDE REDUCIRIA EL NIVEL DE RUIDOS (HASTA 3 DECIBELIOS). DONDE DISMINUIRIA LA FORMACION DE RODERAS Y FISURAS, Y RETRASARIA EL ENVEJECIMIENTO DEL FIRME AUN EN LAS CONDICIONES CLIMATOLOGICAS MAS EXTREMAS. REPSOL PRESENTA MODIFAL. EL PRIMER BETUN MODIFICADO EN EL QUE LA DISPERSION DE LOS POLIMEROS EN EL SENO DE LOS BETUNES ES PERFECTA Y HOMOGENEA. ESTA HOMOGENEIDAD ES LA QUE PERMITE A MODIFAL CONSERVAR INTACTAS SUS PROPIEDADES AUN EN PERIODOS PROLONGADOS DE ALMACENAMIENTO. ALGUNAS VECES HAY QUE CAMBIAR ALGO PARA QUE TODO SIGA IGUAL. NOSOTROS HEMOS MODIFICADO NUESTROS BETUNES PARA SEGUIR SIENDO LIDERES EN ASFALTOS.



REPSOL PRODUCTOS ASFALTICOS, S. A.

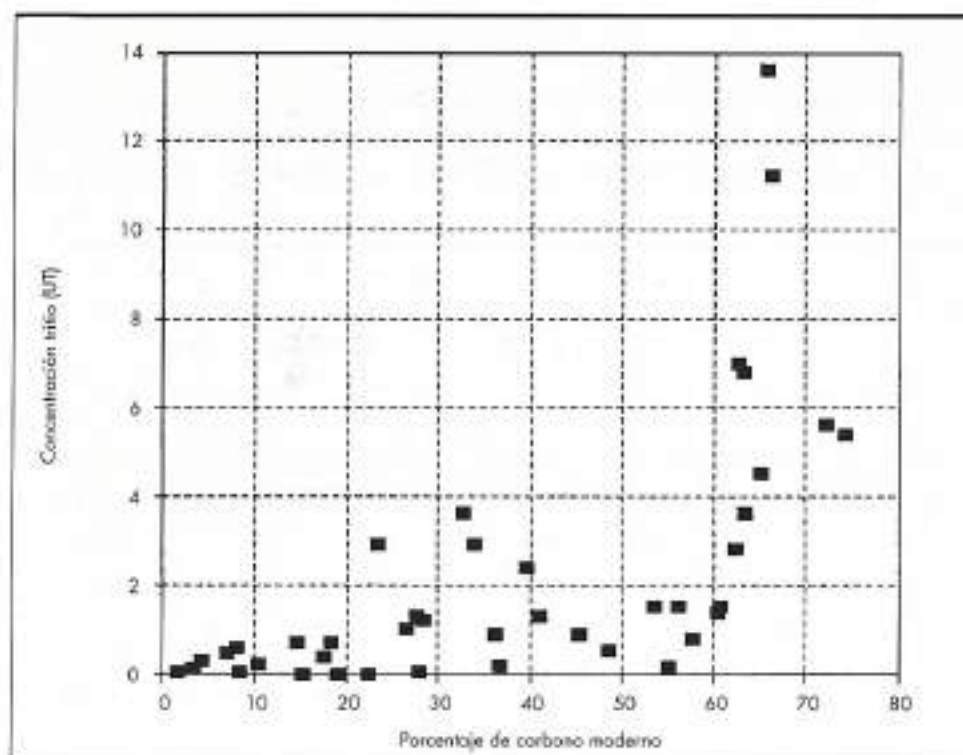


FIGURA 7. Correlación entre las concentraciones de tritio y de carbono-14.

La Fig. 8 muestra la distribución en el acuífero de las edades medias de ^{14}C redondeadas a 100 años. Se observa que el agua extraída de amplias zonas del acuífero es muy antigua. De hecho, de las 50 muestras analizadas, 36 dieron "edades" mayores de 1000 años. La "edad media" de los 50 valores asciende a 6900 años. La recarga moderna (posterior a 1953) se concentra en zonas muy concretas que se definen mejor en el apartado próximo.

8. DETERMINACIÓN DE LA RECARGA

8.1. FUNDAMENTO DEL MÉTODO

El tritio de origen termonuclear permite hacer una evaluación aproximada de la recarga moderna del acuífero. El método se basa en la comparación de los balances de tritio obtenidos para las precipitaciones y para las aguas subterráneas. Designemos por el término "inventario de tritio en el acuífero, $(I_T)_{\text{acuífero}}$ " a la actividad de este radionucléido encontrada en el acuífero por metro cuadrado de superficie y por "inventario de tritio en las precipitaciones $(I_T)_{\text{precipitación}}$ " a la misma actividad referida a las precipitaciones locales. Si llamamos $(P_m)_{1953-94}$ a la precipitación media en la zona del estudio durante el período 1953-1994, la recarga media $(R_m)_{1953-94}$ producida durante este mismo período puede obtenerse por medio de la siguiente expresión:

$$(R_m)_{1953-94} = (P_m)_{1953-94} \frac{(I_T)_{\text{acuífero}}}{(I_T)_{\text{precipitación}}} \quad [2]$$

Lógicamente, para que esta ecuación sea exacta, hay que considerar también, dentro del término $(I_T)_{\text{acuífero}}$, la actividad de tritio existente en la zona no saturada y hay que incrementar el numerador de la ecuación con la actividad de tritio extraída por bombeo de agua del acuífero durante el período antes indicado.

El inventario de tritio en las precipitaciones locales viene dado por la expresión siguiente:

$$(I_T)_{\text{precipitación}} = \int_{1953}^{1994} C_0(t) e^{-\lambda(1994-t)} dt \quad [3]$$

En esta ecuación, $C_0(t)$ es la función de entrada de tritio, es decir, la variación de la concentración de tritio en las precipitaciones de la zona del estudio durante el período 1953-1994, que se muestra en la tabla I.

Multiplicando la concentración, expresada en becquerelios por litro (Bq/l), por la precipitación media del año (l/m^2), se obtiene la contribución de cada año al inventario de tritio expresada en Bq/m^2 . Las sumas de las contribuciones parciales de todos los años comprendidos entre 1953 y 1994 da el inventario total de tritio para las precipitaciones de la zona. El valor obtenido por este procedimiento asciende a 45034 Bq/m^2 .

El inventario de tritio para la zona saturada del acuífero viene dado por la expresión:

$$(I_T)_{\text{sat}} = \int_0^h C(h) p(h) dh \quad (\text{Bq/m}^2) \quad [4]$$

donde $C(h)$ y $p(h)$ son las funciones que indican, respectivamente, la variación de la concentración de tritio y de la porosidad con la profundidad.

Resulta obvio que la determinación experimental de las funciones $C(h)$ y $p(h)$ encierra grandes dificultades. Debido a ello, la solución adoptada para determinar el inventario de tritio para la zona saturada ha sido transformar la expresión integral dada por la ecuación (4) en el producto de la concentración media de tritio medida experimentalmente en el agua de bombeo C_m por el volumen de agua existente por metro cuadrado de acuífero desde el nivel piezométrico hasta la profundidad de cada sondeo (espesor de la columna

dos por el Servicio Meteorológico Nacional, asciende a 306,7 mm/año para el período útil de recarga, es decir, descontando la precipitación del período Mayo a Septiembre. El inventario de tritio para las precipitaciones del período 1953-94 asciende a 45034 Bq/m².

Los valores de la recarga obtenidos con estos datos se muestran en la tabla 3 redondeados a la unidad. Como puede verse, los valores oscilan entre 0 y 224,3 l/m² por año. Sólo 13 puntos superan el valor de 100 l/m². Obviamente, estos corresponden a zonas donde la recarga se encuentran es-

SONDEO	RECARGA	SONDEO	RECARGA	SONDEO	RECARGA
3	10/17/27	87	4/0/4	53	0/0/0
6A	55/21/76	89	5/0/5	154A	1/0/1
7	3/0/3	91	2/0/2	159	11/0/11
11	14/35/49	92	18/0/18	161	40/69/109
13	2/0/2	93	0/0/0	162	5/0/5
16	4/0/4	94	59/52/111	163	20/17/37
17	33/23/56	95F	44/0/44	165	8/23/31
19	0/0/0	97	4/0/4	167	1/0/1
20	3/0/3	98	1/0/1	168	33/84/107
22	3/0/3	99	7/0/7	171	6/81/87
26	7/41/48	100	1/0/1	172A	40/62/102
28	0/0/0	101	0/0/0	173	6/0/6
30	3/0/3	103	11/76/87	175	64/160/224
31	3/0/3	105	8/0/8	176	35/44/79
33	27/88/115	107	2/0/2	177	43/30/73
34	53/59/112	108	1/0/0	178A	36/0/36
35	31/81/112	109	8/49/57	179	17/35/52
36	15/74/89	113	24/51/75	180A	0/0/0
38	0/0/0	116	29/96/125	181	1/0/1
40	0/0/0	117	1/0/1	182	0/0/0
43	3/0/3	118	29/44/73	183	39/38/77
44	8/49/57	120	22/58/80	184	6/100/106
46	3/0/0	122	11/37/48	185A	36/144/180
49	6/0/0	123	7/13/20	186	5/0/5
50	10/21/31	124	21/0/21	187	12/4/16
51	18/1/19	126	18/26/46	188	44/0/44
52	2/0/2	128	2/0/2	189A	17/10/27
53	54/45/99	131	3/0/3	190A	5/0/5
54	0/0/0	132	3/0/3	192	12/0/12
56	13/59/72	133	3/0/3	194	0/0/0
57F	94/0/94	134	15/28/43	196	16/0/16
60	10/0/10	135	3/0/3	197	2/0/2
61	1/0/0	136	13/52/65	202	0/0/0
66	33/71/104	137	0/0/0	212	116/71/187
67	4/0/4	138	0/0/0	213	13/26/37
68	0/0/0	139	4/0/4	215	3/0/3
71	8/0/8	140A	1/0/1	216	3/0/3
72	45/51/96	141A	21/0/21	233	1/0/0
76	0/0/0	142	7/0/7	254	2/0/2
78	30/47/77	144	44/13/57	256	2/0/2
80	10/30/40	146	6/7/13	259	2/0/2
83F	70/0/70	149	8/0/8	262	6/0/6
85	3/0/3	151	0/0/0	268	10/0/10
86	8/0/8	152A	1/0/1	276	4/0/4

TABLA 3. Recarga obtenidas para las diferentes zonas poligonales. El primer valor corresponde a la contribución de la zona saturada, el segundo la de la zona no saturada y el tercero la suma de ambas (valores en litros/m²).

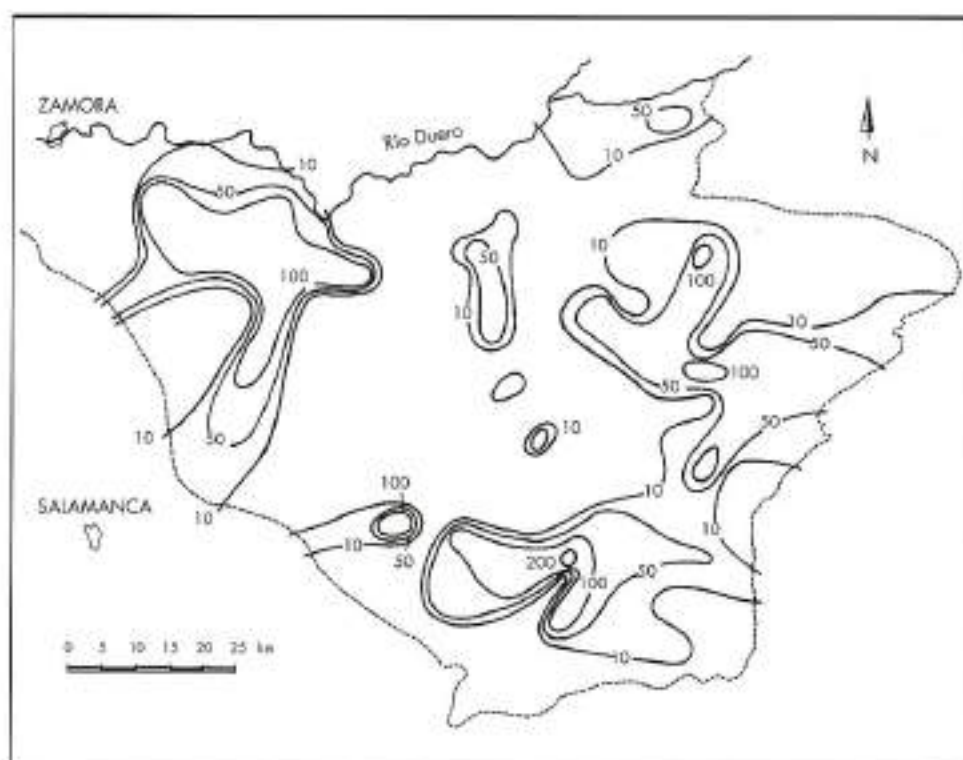


FIGURA 9. Distribución de la recarga. Valores en mm/año.

pecialmente favorecida debido a la alta permeabilidad de los estratos superficiales o a la contribución a la recarga de los ríos próximos.

La recarga anual media para todo el acuífero se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$(R_w)_{\text{total}} = \frac{\sum R_i A_i}{A_t} \quad [6]$$

siendo R_i la recarga obtenida para cada zona poligonal, A_i la superficie de las mismas y A_t la superficie total del acuífero ($A_t = \sum A_i$).

El valor obtenido para esta recarga media anual correspondiente al periodo 1953-1994 asciende a 32,2 mm/año. Si se tiene en cuenta que la superficie del acuífero, obtenida a través de la suma de todas las áreas poligonales, asciende a 7600 km², se obtiene una recarga anual para la totalidad del acuífero igual a $7,6 \times 32,2 \times 10^6 = 244,7$ Hm³/año. Este valor es similar a los obtenidos a través de cálculos estimativos realizados por métodos convencionales. Debe indicarse que, a pesar de la falta de precisión de los parámetros hidráulicos utilizados para el cálculo (espesor de estratos arenosos, porosidad y humedad volumétrica de la zona no saturada), el error cometido en la determinación de la recarga debe ser pequeño debido a la compensación de algunos errores y al hecho haber sido utilizados un número elevado de datos. Además, los errores afectan sólo a las zonas poligonales que tienen una concentración significativa de tritio, pero no a las restantes. En éstas, la recarga es despreciable independientemente de cuales sean los valores de estos parámetros.

La distribución de la recarga se representa en la Fig. 9. Se observa la existencia de zonas preferenciales de recarga concentradas en áreas muy concretas, existiendo

amplias zonas del acuífero donde la recarga es despreciable. De los 245 Hm³/año obtenidos para la recarga media total 235 Hm³/año, es decir, el 96%, se infiltran en una superficie de sólo 3530 Hm², que equivalen al 46% de la superficie total.

9. CONCLUSIONES

El estudio realizado muestra una distribución muy irregular en el acuífero de todos los parámetros químicos e isotópicos, la cual no es compatible con la existencia de un flujo regional importante dirigido de Sur a Norte, como indican los mapas piezométricos elaborados. La distribución de estos parámetros no refleja que exista una descarga significativa de agua en el río Duero, sino que, al contrario, este río contribuye a la recarga del acuífero en diversos tramos de su curso. Los resultados son coherentes con el carácter lenticular del acuífero y con una baja permeabilidad de la roca matriz responsable de la conexión hidráulica entre los diferentes lentejones arenosos que componen el acuífero.

La mayoría de las aguas subterráneas almacenadas en el acuífero han experimentado un fuerte proceso de evaporación antes de su infiltración, lo cual implica una prolongada retención del agua en la superficie o en la capa superficial de la zona no saturada y, por tanto, un bajo valor de la recarga.

La mayor parte de las aguas subterráneas que están siendo explotadas tienen "edades medias" superiores a 1000 años. La recarga moderna, entendiéndose por esta la recarga producida durante los últimos 40 años, se concentra en zonas concretas localizadas, principalmente, en la zona Sur del acuífero próxima al contacto con los materiales de la Cordillera Central y en una amplia zona situada entre Toro y Fuentesauco, donde afloran las areniscas del Eoceno.

La recarga media obtenida a partir del balance del tritio de origen termonuclear para el período 1953-94 asciende a 32 mm/año. Sin embargo, el 96% de esta recarga se localiza en el 43% de la superficie del acuífero. En el 54% de la superficie restante, la recarga es, prácticamente, nula. Por tanto, si el régimen de explotación del acuífero se mantiene como hasta ahora, es posible que, en estas zonas donde no hay recarga significativa, se produzcan importantes depresiones piezométricas debido a la ausencia, dentro del acuífero, de un flujo regional importante que aporte agua a dichas zonas. Esta distribución irregular de la recarga debe ser tenida en cuenta para la planificación futura del régimen de explotación del acuífero.

BIBLIOGRAFÍA

- ROBERTSON W. D.; CHERRY J. A. (1989). Tritium as an Indicator of Recharge and Dispersion in a Groundwater System in Central Ontario. *Water Resources Research*, Vol. 25, Nº 6, p. 1097-1109.
- RABINOWITZ D. D.; GROSS G. W.; HOLMES C. R. (1975). Environmental Tritium as an Hydrometeorologic Tools in the Roswell Basin, New Mexico, I. Tritium Input Function and Precipitation Recharge Relation. *J. Hydrol.* 32: 3-17.
- PLATA A. (1993). Parameters of Carbonate Rock Aquifer from Tracer Methods. *Hydrogeological Processes in Karts Terranes (Proc. of the Antalya Symposium and Field Seminar, Oct. 1990) IAHS Publ. no. 207*, 1993.
- LARSON G. J.; DELCORE M. R.; OFFER S. (1987). Application of the Tritium Interface Method for Determining Recharge Rates to Unconfined Drift Aquifers, I. Homogeneous Case. *J. Hydrol.* 91: 59-72.
- HERWEIJER J. C., VAN LUIJN G. A. (1985). Calibration of a Mass Transport Model Using Environmental Tritium. *J. Hydrol.* 78:1-17.
- PLATA A. (1994). Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica. Monografía ISSN 0211-8203; M39. CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid.