

Determinación de la recarga del acuífero Raigón (Uruguay) a partir del tritio natural

A. PLATA BEDMAR (*), A. DELLEPERE (**), M. T. ROMA (**) y S. GARAT(**)

RESUMEN El acuífero Raigón, situado unos 50 km al Oeste de Montevideo, está formado por materiales detríticos aluviales y coluviales. El origen y renovación de las aguas subterráneas contenidas en el mismo han sido estudiados a partir de su composición química e isotópica (deuterio, oxígeno-18, tritio y carbono-14). El contenido del tritio natural indica la presencia de importantes proporciones de aguas infiltradas con anterioridad al año 1953. El balance de este isótopo ha permitido realizar una estimación de la recarga, habiéndose obtenido para la misma un valor que es unas tres veces menor que el obtenido por otros autores empleando métodos convencionales. La presencia de un estrato superficial de materiales de baja permeabilidad es responsable de ello.

RECHARGE EVALUATION OF THE RAIGON AQUIFER (URUGUAY) USING ENVIRONMENTAL TRITIUM

ABSTRACT *ABSTRACT The aquifer Raigón is located about 50 km West of Montevideo and is formed by detritic alluvial and coluvial materials. Both, the origin and turnover time of groundwater have been studied on the basis of their chemical and isotopic composition (deuterium, oxygen-18, tritium and carbon-14). The tritium content shows the presence of significant amounts of water infiltrated before 1953. The balance of this radionuclide has allowed the estimation of the recharge. The gained obtained value is about three times lower than the estimation obtained by other authors applying conventional methods. The presence of a low permeability upper stratum is responsible for it.*

Palabras clave: Uruguay, Raigón, recarga, tritio, hidroquímica.

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio fue realizado dentro del marco de un Proyecto de Cooperación Técnica convenido entre el Organismo Internacional de Energía Atómica con sede en Viena y el Gobierno de Uruguay. El objetivo principal del estudio era la investigación del comportamiento dinámico del acuífero Raigón a través de técnicas isotópicas (deuterio, oxígeno-18, tritio y carbono-14) e hidrogeoquímicas. El área ocupada por el acuífero asciende a unos 1000 km² y está limitada al Sur por el río de la Plata, al Este por el río Santa Lucía, al Norte por este mismo río y por su afluente el río San José y al Oeste por el arroyo Cufre. La potencia del mismo varía entre 5 y 45 metros con un espesor medio de unos 10 metros para la zona saturada y de 11 metros para la zona no saturada.

Debe indicarse que el acuífero Raigón ha sido estudiado previamente con cierto detalle por diferentes autores utilizando las técnicas convencionales de investigación de aguas subterráneas basadas en la medida de parámetros hidráulicos del acuífero, en el estudio de las condiciones climatológicas locales (precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial) y en las características geológicas del acuífero.

Sin embargo, no fueron utilizadas técnicas directas, tales como las incluidas en el presente estudio. Como se verá más adelante, estas técnicas proporcionan una información complementaria de gran valor para comprender el funcionamiento del acuífero y, en algunos aspectos, conducen a interpretaciones contradictorias a las obtenidas con las técnicas convencionales. Este es el caso de la evaluación de la recarga.

2. MARCO GEOLÓGICO

El acuífero está constituido por un paquete sedimentario de materiales detríticos de edad terciaria y cuaternaria. La geología de superficie se presenta en la figura 1. En esta misma figura, se muestra un corte geológico, en el cual se definen las siguientes unidades:

- 1) Formación Fray Bentos de edad oligocena que se encuentra localizada en la base. Se trata de una formación de origen continental formada por una secuencia de limos, arcillosas y arenas muy finas, con cemento y concreciones calcáreas de estructura masiva litificada y friable.
- 2) Formación Camacho de edad miocena formada por los depósitos de una transgresión marina que deja un estrato continuo a manera de franja paralela a la costa apoyada sobre la formación Fray Bentos. Consiste en limos, areniscas y arcillas muy litificadas. Se trata de una formación de muy baja permeabilidad, que forma parte del substrato.

(*) CEDEX (Ministerio de Fomento), Madrid, España (jubilado).

(**) Obras Sanitarias del Estado (OSE), Montevideo, Uruguay.

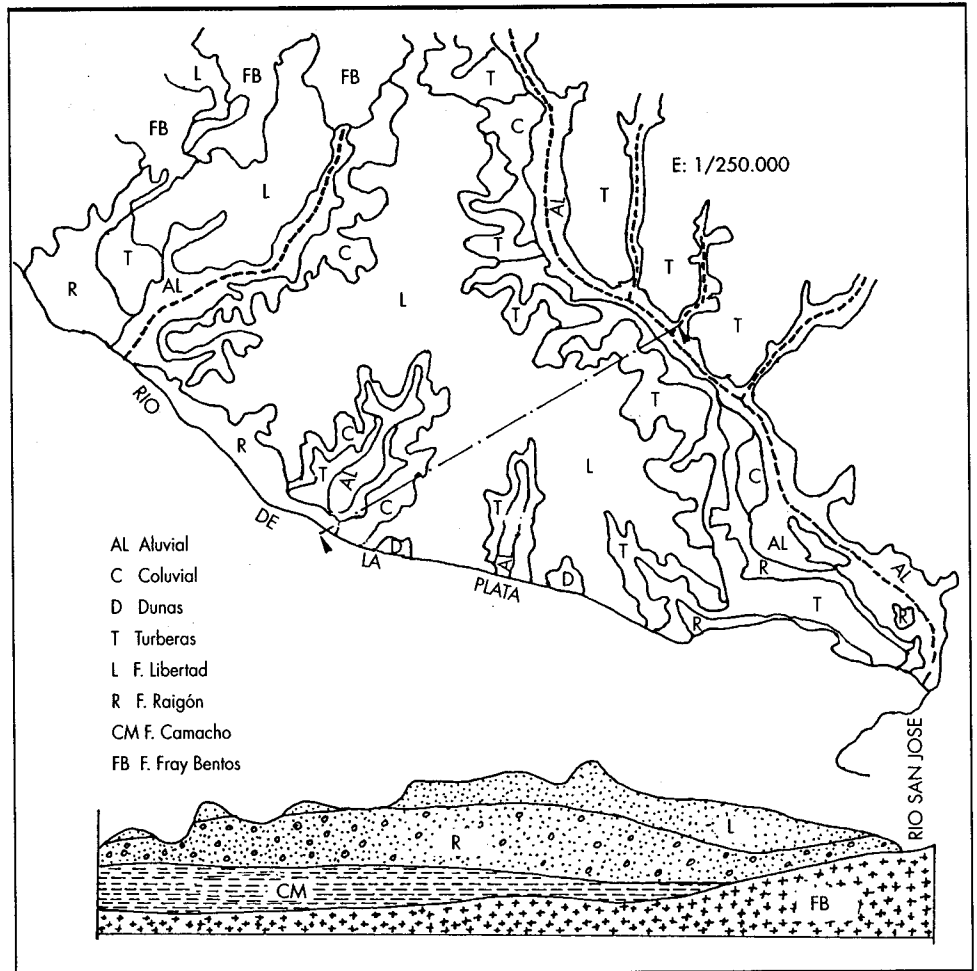


FIGURA 1. Geología de superficie del acuífero Raigón y corte geológico.

- 3) Formación Raigón del Plioceno, que constituye el acuífero propiamente dicho. En esta formación predominan las arenas silíceas y los conglomerados.
- 4) Formación Libertad del Pleistoceno formada por un loess friable proveniente de deflación de sedimentos glaciales, con arcilla y arena fina en matriz arcillosa. Cubre a manera de manto la casi totalidad de la superficie del acuífero y es de baja permeabilidad.

3. MARCO HIDROGEOLÓGICO

El medio poroso que forma el acuífero consiste en arenas pasando por todas las fracciones desde finas hasta gruesas e incluso gravas. Esporádicamente, se presentan intercalaciones delgadas de arcillas que, en algunas zonas, definen zonas profundas de carácter confinado.

Los aspectos hidrogeológicos del acuífero han sido estudiados por diferentes autores utilizando técnicas convencionales. Basándose en los resultados obtenidos en estos estudios y en los datos meteorológicos locales, una firma consultora europea elaboró hace algunos años un detallado informe sobre el comportamiento y características hidrogeológicas del acuífero, llegando a las conclusiones que indican los siguientes parámetros:

- Área total del acuífero: 1000 km².
- Espesor saturado medio: 10 metros.
- Volumen del almacenamiento saturado: 1000 Hm³.

- Espesor medio de la zona no saturada: 11,3 metros.
- Volumen de agua existente en la zona no saturada: 200 Hm³.
- Precipitación media de la zona: 1100 mm/año.
- Precipitación total media: 1100 Hm³/año.
- Infiltración media procedente de precipitaciones: 148 Hm³/año (148 l·m⁻²·año⁻¹).
- Descarga en los ríos pequeños: 105 Hm³/año, equivalentes a 3,3 m³/s.
- Descarga en el río de la Plata: 23 Hm³/año, equivalentes a 0,73 m³/s.
- Permeabilidad: 3 a 6x10⁻⁴ m/s.
- Transmisibilidad: 300 a 600 m²/d.
- Caudales específicos de los pozos: 3 a 15 m³/h por metro de abatimiento.
- Coeficiente de almacenamiento: 2x10⁻⁴ a 3x10⁻².

Por otra parte, la figura 2 muestra la distribución de isopiezas elaborada en el estudio antes mencionado. De acuerdo con este mapa y con los datos de descarga antes indicados, los ríos San José y Santa Lucía recibirían unos aportes anuales medios próximos a 3 m³/s. Sin embargo, este valor de la descarga contrasta fuertemente con el hecho de que los caudales medios de estos ríos en períodos de estiaje son sensiblemente menores que el valor indicado. Como se demuestra en el presente estudio, esta discrepancia se debe a que la recarga obtenida en los estudios precedentes se encuentra altamente sobrevalorada.

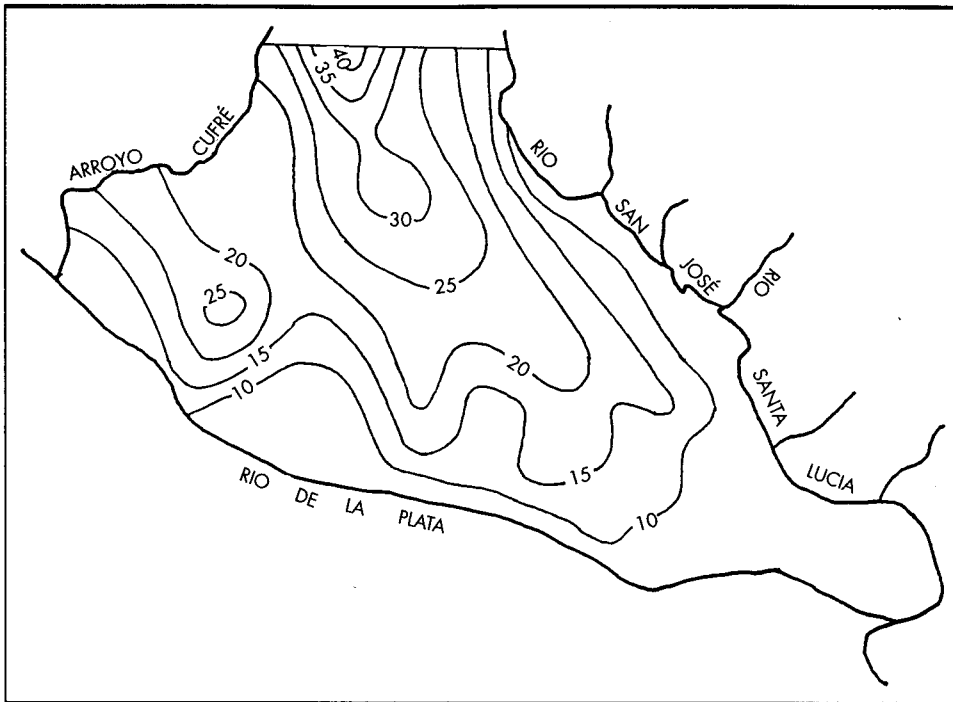


FIGURA 2. Mapa de isopiezas del acuífero elaborado por una firma consultora.

4 HIDROQUÍMICA

La conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea fueron medidas en 86 pozos distribuidos por toda la zona del estudio. Como refleja la figura 3, los valores de conductividad obtenidos varían dentro de amplios límites, con la mayor parte de los mismos comprendidos entre 400 y 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La figura 4 muestra la distribución de las isolíneas correspondientes a una conductividad de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa la existencia de una amplia zona central donde existen aguas de conductividad más elevada, que, tal vez, pudieran proceder de las formaciones graníticas colindantes. Por otra parte, esta distribución de la conductividad no resulta coherente con el esquema de flujos que se deriva de las iso-

piezas de la figura 2, el cual determina que las aguas de la zona central discurren hacia los ríos San José y la Plata. Con este tipo de flujos es difícil explicar el hecho de que la conductividad del agua disminuya en este mismo sentido.

Aparte de estas medidas de campo, se analizó la composición química del agua (componentes mayoritarios) en muestras tomadas de 21 pozos. La figura 5 muestra los diagramas de Schoeller y de Piper. Se observa que la mayor parte de los puntos se sitúan en una zona de transición entre las aguas bicarbonatadas cálcicas y las aguas cloruradas sódicas. El balance iónico refleja que la suma de las concentraciones medias de los iones Na^+ y K^+ ($r(\text{Na}+\text{K})$) supera en 1,98 meq/l a la suma $r(\text{Cl}+\text{NO}_3)$. De la misma forma, la suma $r(\text{Ca}+\text{Mg})$ es

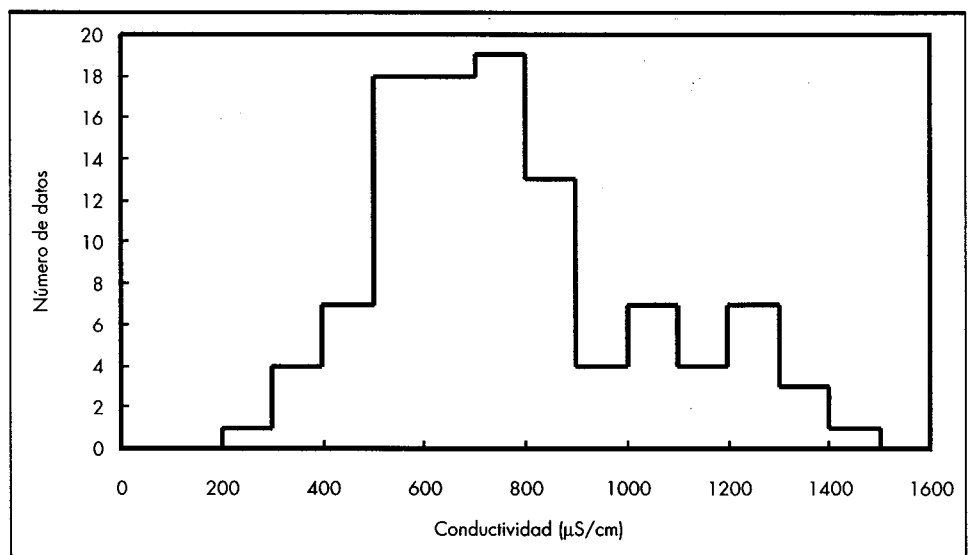


FIGURA 3. Histograma de la conductividad del agua subterránea (valores medidos en campo).

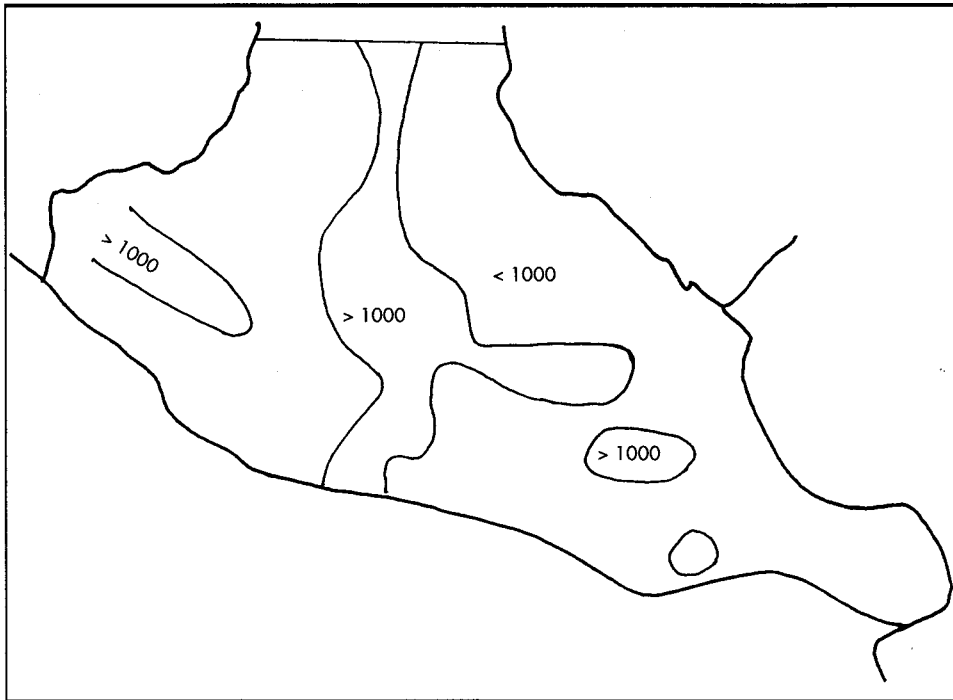


FIGURA 4. Isolínea correspondiente a una conductividad de 1000 µS/cm.

1,78 meq/l inferior a la suma $r(SO_4+CO_3H)$. Estos datos indican que, dentro del acuífero, se produce un intercambio iónico de los iones alcalino-térreos por iones alcalinos contenidos en los materiales arcillosos. Debido a que este intercambio se produce con gran lentitud a las temperaturas existentes en el acuífero (entre 18°C y 22°C), el hecho de producirse, refleja la existencia de aguas antiguas. Debido, precisamente, a este intercambio, solamente seis muestras de agua se encontraban saturadas en calcita.

Por otra parte, cinco análisis de SiO_2 indican concentraciones de este componente comprendidas entre 65 y 84 mg/l.

Estos valores tan elevados podrían sugerir, en principio, la presencia en el acuífero de aguas procedentes de las formaciones graníticas que rodean al acuífero, posiblemente, de elevada "edad". Sin embargo, los datos disponibles no proporcionan una clara evidencia sobre este punto.

Una característica importante de la composición química de las aguas subterráneas es su elevado contenido en nitratos, con valores que oscilan entre 3,42 y 64,8 mg/l y con una concentración media de 23,2 mg/l. Lógicamente, estas elevadas concentraciones son consecuencia de la actividad agropecuaria que se desarrolla en la zona.

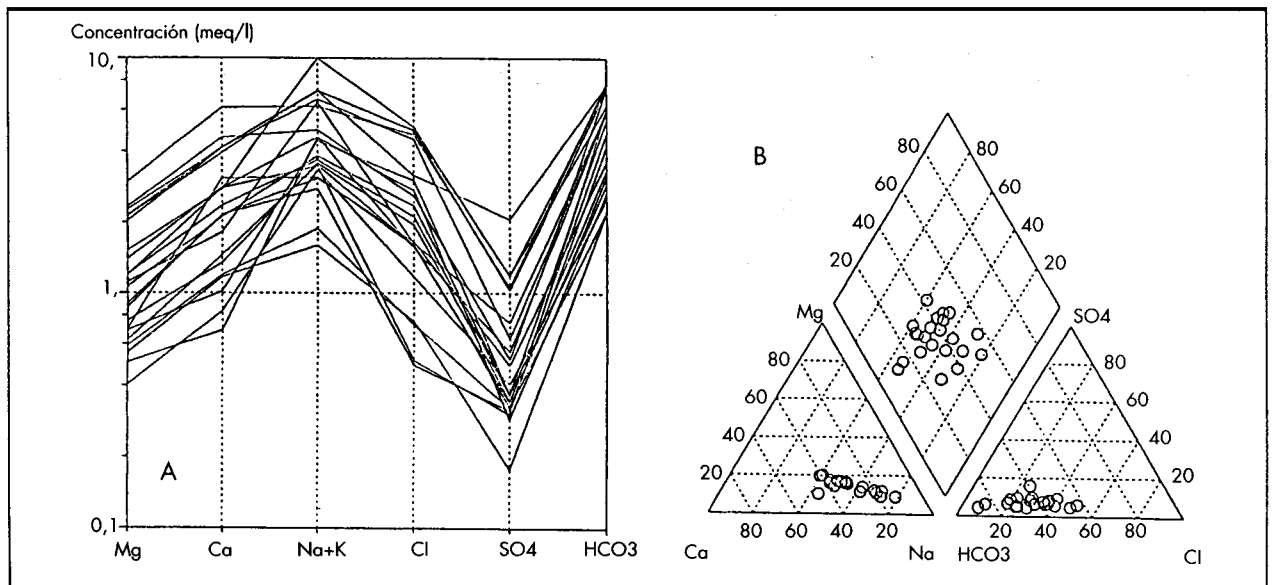


FIGURA 5. Diagramas de Schoeller (A) y de Piper (B) para las aguas subterráneas del acuífero.

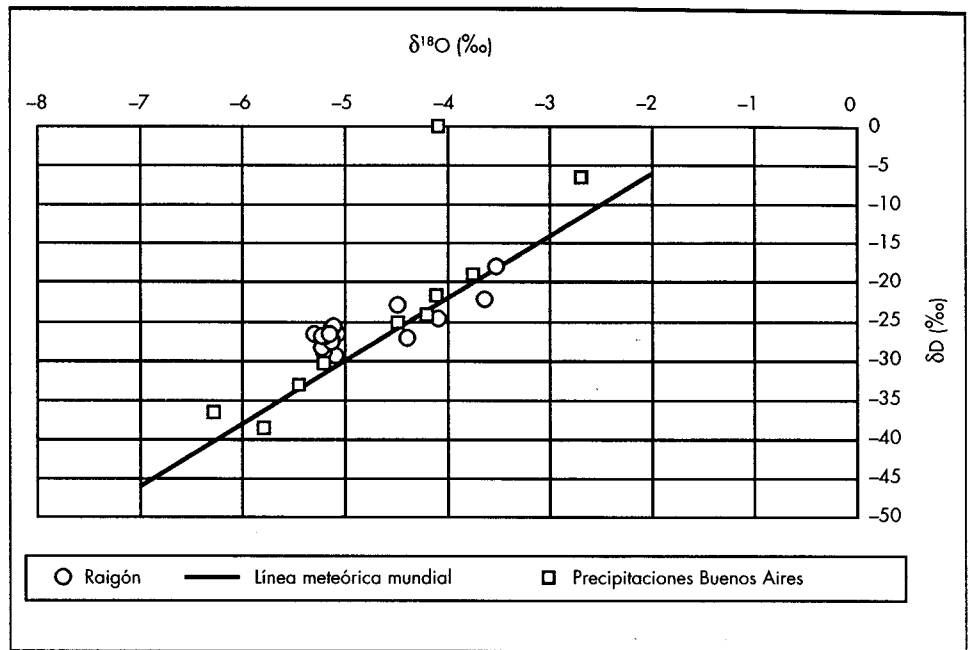


FIGURA 6. Diagrama que relaciona las desviaciones isotópicas δD y $\delta^{18}O$.

5. ISÓTOPOS ESTABLES

La composición isotópica de las aguas subterráneas no aporta una información importante sobre el origen y comportamiento dinámico de las aguas subterráneas del acuífero, debido a los escasos contrastes observados. Con los resultados obtenidos para las 17 muestras de agua analizadas, se han representado el diagrama de la figura 6, donde se relacionan entre sí las desviaciones isotópicas δD y $\delta^{18}O$. Con fines comparativos, se representan también los datos existentes para las precipitaciones de Buenos Aires correspondientes a muestras medias mensuales publicados por la red GNIP controlada por los organismos de Naciones Unidas OIEA y OMM (OIEA, 1992). Se observa, como era de esperar, que doce de los pozos muestreados contienen aguas de una misma composición isotópica, cuyo valor medio no difiere apenas de la composición isotópica media obtenida para las precipitaciones de Buenos Aires. Los cinco puntos que se separan del bloque anterior corresponden a muestras de agua tomadas de pozos situados en el extremo oriental del acuífero, es decir, en la zona próxima a la desembocadura del río Santa Lucía. Los valores δ menos negativos obtenidos para estas aguas se explican por la recarga producida por infiltración de las aguas que discurre por este río. Debido a tratarse de aguas superficiales, éstas experimentan un mayor grado de evaporación que las aguas infiltradas directamente de las precipitaciones y, como consecuencia de ello, las desviaciones isotópicas se desplazan hacia valores menos negativos. Las diferencias observadas entre los cinco puntos derivan de las diferentes proporciones de mezclado de ambos tipos de aguas. Este resultado refleja que la descarga del acuífero por este extremo oriental es, prácticamente, inexistente, lo cual no resulta explicable con la piezometría mostrada en la figura 2.

6. TRITIO NATURAL DEL AGUA

6.1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Como se sabe, el tritio es el isótopo del hidrógeno de número de masa 3, es decir, 3H . Pequeñas actividades de tri-

tio, son producidas de forma natural en la alta atmósfera a partir de determinadas reacciones nucleares inducidas por los neutrones liberados en la misma por la radiación cósmica de origen extraterrestre. Este tritio natural se incorpora a las precipitaciones en forma de agua tritiada (THO), produciendo concentraciones muy pequeñas pero que resultan detectables con las técnicas de medida que existen en la actualidad.

Sin embargo, a partir del año 1953, las precipitaciones de todo el globo han contenido concentraciones de tritio muy superiores a las producidas de forma natural, debido a los ensayos termonucleares realizados en la atmósfera, principalmente, durante las décadas de los años 50 y 60 (ensayos termonucleares). Este tritio ha producido el marcado natural de todas las aguas meteorológicas del globo y, por tanto, también de los acuíferos donde se produce una renovación rápida del agua. Las concentraciones observadas fueron mucho mayores en el Hemisferio Norte que en el Hemisferio Sur, debido a que la mayor parte de los ensayos nucleares fueron realizados en aquél Hemisferio y a la dificultad de mezclado de la atmósfera de ambos Hemisferios. También contribuye a esta menor concentración del Hemisferio Sur la mayor fracción de superficie cubierta por los océanos.

Debido al origen reciente del tritio termonuclear y al corto período de semidesintegración de este isótopo (12,32 años), el tritio se utiliza en Hidrología para identificar la presencia de al menos un componente de aguas modernas, es decir, aguas infiltradas en el subsuelo a partir del año 1952, fecha en que se iniciaron los ensayos termonucleares. Las aguas derivadas de precipitaciones anteriores a este año tendrían en la actualidad concentraciones de tritio difícilmente detectables. Lógicamente, la ausencia de tritio en una muestra de agua subterránea indica la ausencia de recarga moderna significativa procedente de las precipitaciones de los últimos 50 años.

6.2. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos para 30 pozos distribuidos por toda la zona del estudio y expresados en unidades de tritio (UT)

Punto	Conc. (UT)	Punto	Conc. (UT)	Punto	Conc. (UT)
Pozo 1	2,2	Pozo 15	1,8	Pozo 34	1,4
Pozo 2	2,4	Pozo 18	1,7	Pozo 35	1,0
Pozo 4	2,0	Pozo 19	0,3	Pozo 36	2,1
Pozo 5	1,9	Pozo 20	1,2	Pozo 37	0,7
Pozo 6	1,4	Pozo 21	0,5	Pozo 38	3,4
Pozo 8	3,4	Pozo 25	1,7	Pozo 39	3,1
Pozo 9	0,6	Pozo 27	3,6	Río La Plata	4,0
Pozo 10	0,2	Pozo 28	0,0	Río La Plata	4,8
Pozo 11	2,6	Pozo 30	2,8	Río La Plata	2,9
Pozo 12	0,1	Pozo 31	0,8	Río La Plata	7,8
Pozo 13	0,5	Pozo 32	1,3	Río Sta. Lucía	2,9
Pozo 14	2,4	Pozo 33	2,7	Río San José	3,8

TABLA 1. Resultados de los análisis de tritio en muestras de agua del acuífero Raigón así como de los ríos La Plata, Santa Lucía y San José. Los valores se expresan en unidades de tritio.

se presentan en la tabla 1 y la distribución de los mismos en la figura 7. Como se sabe, la unidad de tritio equivale a una relación T/H igual a 10^{-18} en número de átomos de ^3H respecto a ^1H . Las equivalencias con otras unidades de radiactividad son:

$$1 \text{ UT} = 3,1927 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{m}^3$$

$$1 \text{ UT} = 0,11813 \text{ becquerelios/litro (Bq/l)}$$

Los análisis fueron realizados en el laboratorio de tritio de la Universidad de Cracovia, Polonia. Los errores analí-

ticos indicados por este laboratorio, correspondientes a la desviación estándar (68,3% de margen de confianza) varían entre 0,3 y 0,4 UT. Sin embargo, hay que indicar que los valores mostrados en la figura para 18 pozos son valores medios de tres muestras tomadas en diferentes momentos, debido a lo cual los errores analíticos para estos pozos son menores. Se incluyen en la tabla los resultados obtenidos para algunas muestras de agua tomadas de los ríos La Plata, Santa Lucía y San José, las cuales, obviamente, corresponden a las precipitaciones medias más recientes.

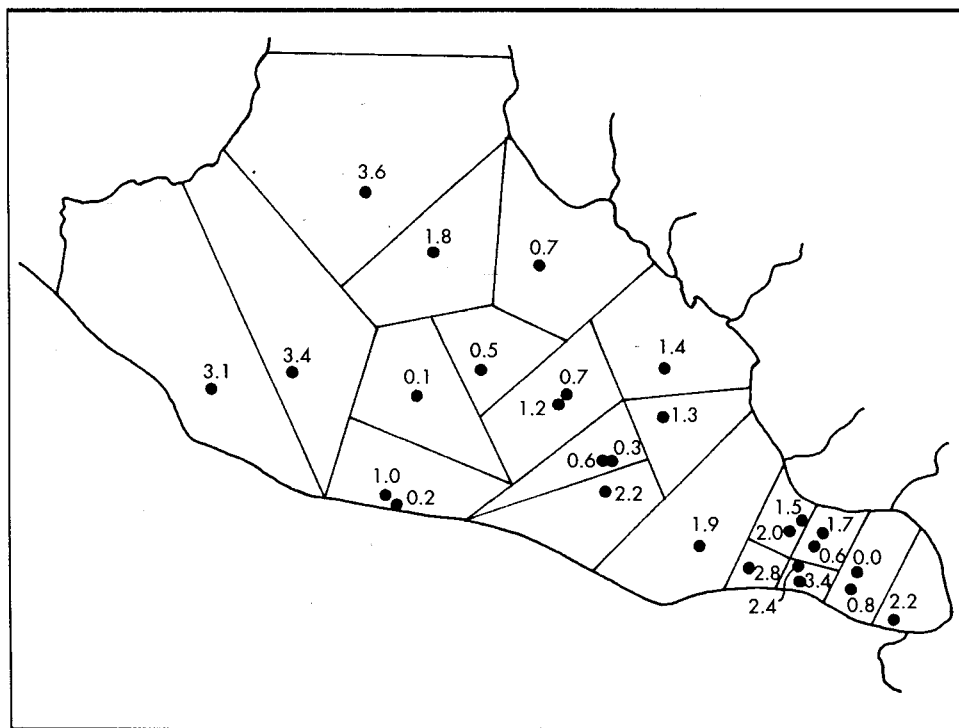


FIGURA 7. Distribución de la concentración de tritio (en UT).

6.3. CONCENTRACIONES DE TRITIO EN LAS PRECIPITACIONES LOCALES

Para poder interpretar de forma correcta los valores de concentración de tritio obtenidos en el estudio, es necesario conocer las concentraciones de las precipitaciones de la zona del estudio desde el año 1953, cuando se iniciaron los ensayos termonucleares en la atmósfera. No existen datos con-

cretos relativos a las precipitaciones locales, pero estos pueden evaluarse de forma suficientemente aproximada a partir de los datos publicados por la red de control operada conjuntamente por el Organismo Internacional de Energía Atómica y por la Organización Meteorológica Mundial para las estaciones próximas situadas en Buenos Aires y en Portoalegre (OIEA,1992). Estos datos son incompletos y se refieren a un número limitado de años. Para determinar las

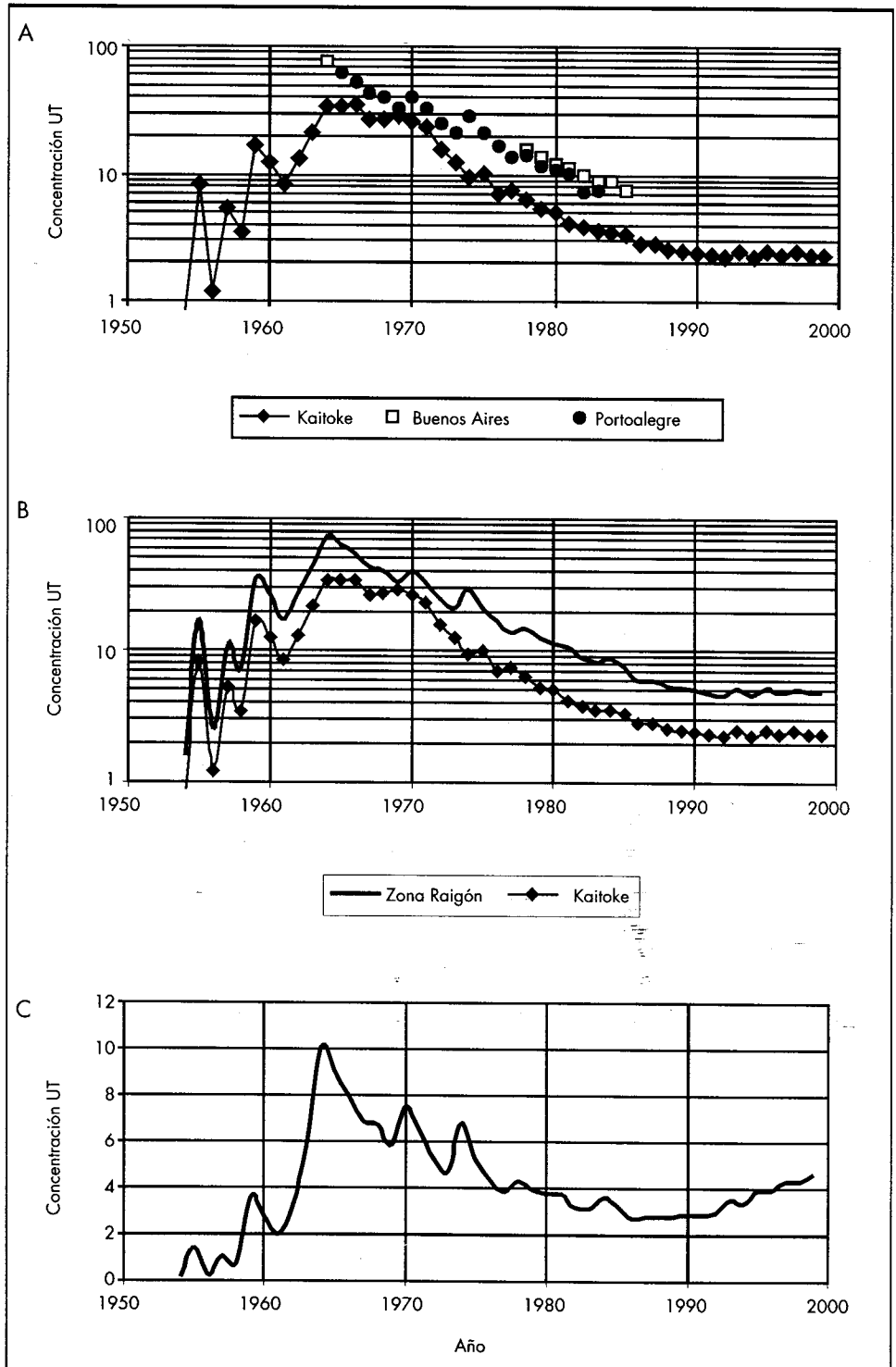


FIGURA 8. A) Concentraciones medias anuales de tritio de las precipitaciones de las estaciones Kaitoke, Buenos Aires y Portoalegre. B) concentraciones calculadas para para la zona del estudio (valores no corregidos). C) Concentraciones para la zona del estudio corregidas por desintegración radiactiva del tritio referida al año 2000.

DETERMINACIÓN DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO RAIGÓN (URUGUAY) A PARTIR DEL TRITIO NATURAL

Año	Kaitoko	Buenos Aires	Portoalegre	Zona del estudio	
				Sin corregir	Corregido
1954	0.8			1.6	0.1
1955	8.3			17.4	1.4
1956	1.2			2.5	0.2
1957	5.3			11.1	1.0
1958	3.4			7.1	0.7
1959	16.9			35.4	3.6
1960	12.5			26.1	2.8
1961	8.4			17.6	2.0
1962	13.1			27.4	3.3
1963	21.6			45.2	5.7
1964	33.9	75.3		75.3	10.1
1965	34.1		63.0	63.0	9.0
1966	34.8		53.4	53.4	8.0
1967	26.6		43.4	43.4	6.9
1968	27.0		40.1	40.1	6.7
1969	28.7		32.8	32.8	5.8
1970	26.4		40.0	40.0	7.5
1971	23.6		32.9	32.9	6.5
1972	15.9		25.2	25.2	5.3
1973	12.4		21.2	21.2	4.7
1974	9.5		29.1	29.1	6.8
1975	10.1		21.1	21.1	5.2
1976	7.0		16.6	16.6	4.4
1977	7.4		13.7	13.7	3.8
1978	6.4	15.5	14.2	14.9	4.4
1979	5.3	13.6	11.8	12.7	3.9
1980	5.0	12.0	11.0	11.5	3.8
1981	4.1	11.2	10.3	10.8	3.7
1982	3.8	10.0	7.3	8.7	3.2
1983	3.6	8.9	7.4	8.2	3.2
1984	3.5	8.8		8.8	3.6
1985	3.3	7.5		7.5	3.2
1986	2.8			5.9	2.7
1987	2.8			5.9	2.8
1988	2.6			5.4	2.8
1989	2.5			5.2	2.8
1990	2.4			5.0	2.9
1991	2.3			4.8	2.9
1992	2.2			4.6	3.0
1993	2.5			5.1	3.5
1994	2.2			4.6	3.3
1995	2.5			5.2	3.9
1996	2.3			4.9	3.9
1997	2.4			5.1	4.3
1998	2.3			4.8	4.3
1999	2.3			4.9	4.6

TABLA 2. Concentraciones de tritio determinadas para las precipitaciones de la zona del estudio a partir de los valores de Buenos Aires (Argentina), Portoalegre (Brasil) y Kaitoko (Nueva Zelandia) esta última como modelo general válido para el Hemisferio Sur. Los valores corresponden a las concentraciones medias anuales no ponderadas expresadas en unidades de tritio (UT).

concentraciones correspondientes a los años para los que se carece de datos, hay que recurrir al modelo general válido para el Hemisferio Sur correspondiente a la estación de Kaitoke (Nueva Zelanda), donde se tiene el registro de datos más completo de todo el Hemisferio. Los datos anteriores se muestran en la tabla 2 expresados en unidades de tritio. La segunda columna de la tabla corresponde a las concentraciones anuales obtenidas para las precipitaciones de Kaitoke. Los datos para los años 1953 a 1959, ambos inclusive, han sido calculados a partir de los datos del Hemisferio Norte. Las columnas tercera y cuarta de la tabla muestran los datos conocidos para las estaciones de Buenos Aires y Portoalegre, respectivamente. Para la zona del estudio, se toman los datos de Buenos Aires y de Portoalegre o el valor medio de ambas estaciones para los años en que existen datos conjuntos. Para estos mismos años, se han calculado factores de correlación dividiendo los valores de las dos estaciones anteriores por los correspondientes a Kaitoke. Con el valor medio de estos factores, se han calculado los datos que se muestran en la columna cuarta de la tabla 2. La última columna muestra estos mismos valores corregidos por desintegración radiactiva del tritio durante el período transcurrido entre cada año y el año 2000 fecha en que se tomaron las muestras de agua. Los valores de la tabla 2 se muestran asimismo en la figura 8.

6.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los datos de la tabla 2 muestran que, durante el período comprendido entre los años 1959 y 1999, las precipitaciones medias de la zona del estudio han tenido concentraciones de tritio superiores a 2,5 UT. La concentración media durante este período asciende a 4,5 UT. La concentración media para el período 1980 a 2000 asciende a 3,5 UT, siendo muy pequeñas las variaciones de los valores anuales observadas durante el mismo.

Lo anterior lleva a la conclusión que todas las muestras de aguas subterráneas de la zona del estudio con concentraciones inferiores a unas 3 UT contienen una fracción signifi-

cativa de agua procedente de precipitaciones que tuvieron lugar antes del año 1959. Como puede verse, esto sucede en un número muy elevado de las muestras analizadas. Asimismo, las muestras con concentración cero corresponden a aguas procedentes en su totalidad de precipitaciones anteriores al año 1953.

La figura 9 muestra la relación existente entre la concentración de tritio y la conductividad del agua. Se observa que las aguas que contienen concentraciones de tritio mayores de 2 UT, es decir, las aguas más modernas, tienen concentraciones relativamente bajas con un valor medio próximo a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En cambio, las aguas con concentraciones menores de 2 UT muestran una clara relación decreciente con la conductividad del agua. Ello puede explicarse aceptando que se trata de aguas procedentes de las precipitaciones locales con un mayor tiempo de permanencia en el acuífero o bien admitiendo que dichas aguas proceden de las formaciones graníticas adyacentes. Esta última hipótesis se ve apoyada por el hecho de que la mayor salinidad de estas últimas aguas se debe al aumento de la concentración de los iones Cl^- y Na^+ . Debido a la alta solubilidad de la halita, las aguas en contacto con este mineral se equilibran químicamente con la formación geológica en un tiempo muy corto. Por tanto, el aumento de concentración observado se relaciona mejor con un origen diferente del agua que con un tiempo de permanencia más elevado.

Los valores encontrados en los ríos de la zona apoyan los resultados de la tabla 2 para las precipitaciones más recientes. Como se ha mencionado anteriormente, los cambios observados en el río La Plata se explican por las diferentes condiciones de marea con que se tomaron las muestras. Por otra parte, los valores de la concentración de tritio superiores a 3 UT encontrados en algunos pozos también apoyan la validez de los valores de la tabla. En el caso de los pozos situados en las proximidades de la desembocadura del río Santa Lucía, los altos valores de la concentración encontrados en algunos de ellos se explican por la contribución a la recarga del agua de este río, conclusión ésta que es confirmada por los resultados de los isótopos estables.

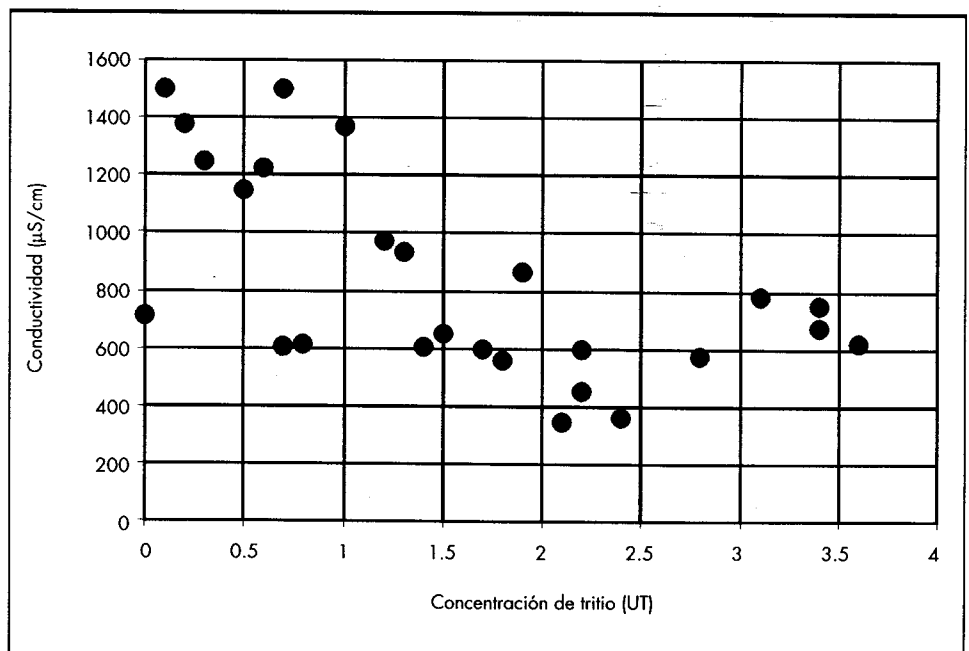


FIGURA 9. Relación entre la concentración de tritio y la conductividad del agua.

Por otra parte, como se ha indicado en el apartado 2, las conclusiones obtenidas en el estudio efectuado por una firma consultora europea indican una recarga del acuífero igual a 148 Hm³/año. El cociente entre el volumen de agua del almacenamiento subterráneo (zona saturada) igual a 1000 Hm³ y este valor de la recarga proporciona un tiempo de renovación de 6,8 años. Ello significa que durante los últimos 49 años se habrían producido 7,2 renovaciones completas del agua del acuífero. Por tanto, si esto fuera correcto, el acuífero debería contener solamente aguas modernas con concentraciones de tritio comprendidas entre 2,5 y 3,5 UT. El hecho de que la mayor parte de las muestras de agua analizadas tengan concentraciones inferiores a 2,5 UT demuestra que el valor obtenido para la recarga es erróneo por exceso. Este punto se analiza con mayor detalle en los apartados siguientes.

6.5. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO

Las concentraciones de tritio medidas en las aguas subterráneas permiten una estimación aproximada de la recarga por un método directo basado en el balance de tritio (Plata et al., 1996). Este balance lleva consigo la comparación de la cantidad total de tritio depositada sobre el área ocupada por el acuífero por las precipitaciones ocurridas durante el período 1953-2000 con la cantidad total presente en dicho acuífero, incluyendo tanto la zona saturada como la zona no saturada.

Designemos con el término inventario de tritio, $(I_T)_{acuifero}$ a la actividad de este radioisótopo encontrada en el acuífero por metro cuadrado de superficie y por inventario de tritio en las precipitaciones, $(I_T)_{precipitación}$ a la misma actividad referida a las precipitaciones locales. Si llamamos $(P_m)_{53-00}$ a la precipitación media de la zona del estudio durante el período 1953-2000, la recarga media $(R_m)_{53-00}$ producida durante este mismo período puede calcularse por medio de la expresión siguiente:

$$(R_m)_{53-00} = (P_m)_{53-00} \frac{(I_T)_{acuifero}}{(I_T)_{precipitación}} \quad (1)$$

Lógicamente, el término del numerador de esta ecuación debe incluir el tritio presente en las zonas saturada y no saturada, debiendo tenerse en cuenta también el tritio extraído del acuífero por bombeo de agua del mismo durante el período mencionado.

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

$$(I_T)_{precipitación} = \int_{1953}^{2000} (P_m)_{53-00} C_0(t') e^{-\lambda(t-t')} dt \quad (2)$$

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 1953-2000, las cuales corresponden a los valores de la columna 5 de la tabla 2. El término exponencial de la ecuación desaparece si se utilizan los valores corregidos por desintegración radiactiva del tritio indicados en la última columna de esta tabla.

Este inventario se ha calculado como un sumatorio de los productos de la concentración media anual dada por los valores de la columna 6 de la tabla 2 (Becquerelios/litro o Bq/l) por la precipitación media anual (l/m²). El valor obtenido ha sido de 24.580 Bq/m².

Por otra parte, si se designa por C_h a la función que indica la variación de la concentración de tritio con la profundidad h y $p(h)$ a la variación de la porosidad con dicha pro-

fundidad, el inventario de tritio en la zona saturada del acuífero puede determinarse, de forma aproximada, por medio de la expresión siguiente:

$$(I_T)_{z.s.} = \int_0^h C(h)p(h)dh \quad (\text{Bq/m}^2); \quad (3)$$

donde los límites de integración son el nivel piezométrico ($h=0$) y la profundidad correspondiente al muro de la formación permeable.

Como resulta obvio, la determinación experimental de las funciones $C(h)$ y $p(h)$ no puede llevarse a cabo en la práctica. La solución simplificada adoptada ha consistido en substituir el valor de la expresión integral anterior, por el producto de la concentración media de tritio medida experimentalmente en el agua de bombeo (C_m en Bq/m³) por el espesor de la lámina de agua medido desde el nivel piezométrico hasta el substrato impermeable, dado en metros. Se obtiene así el inventario de tritio para la zona saturada expresado en Bq/m². Este último espesor se ha obtenido, a su vez, multiplicando el espesor saturado del acuífero por la porosidad total. Se ha tomado para ésta el valor 0,25.

Con el objeto de realizar el cálculo de forma ponderada, el acuífero se ha subdividido en áreas poligonales, que reflejan la extensión del área representada por cada pozo donde se tiene el valor de la concentración de tritio (figura 7). Las dos primeras columnas de la tabla 3 muestran las concentraciones de tritio para cada uno de estos polígonos, expresadas, respectivamente, en unidades de tritio y en Bq/m³. La tercera columna de esta tabla muestra el espesor medio de la lámina de agua obtenido para cada área. El producto del espesor de la lámina de agua por la concentración de tritio de la columna segunda proporciona el inventario de tritio para cada celda (columna cuarta). Por último, la recarga para cada celda se obtiene dividiendo el inventario de tritio de la misma por el inventario de tritio en las precipitaciones (24.580 Bq/m²) y multiplicando por la precipitación media en la zona para el período considerado, la cual asciende a 1.102 l/m². Los valores obtenidos se muestran en la columna quinta de la tabla 3 expresados en litros por metro cuadrado. Por otra parte, la columna sexta de la tabla muestra la superficie abarcada por cada celda. El producto de esta superficie por la recarga de cada celda da la recarga integrada para la misma. La suma de los valores de todas las celdas proporciona la fracción de la recarga total deducida de las concentraciones de tritio de la zona saturada. Se llega así a un valor de 27,8 Hm³/año. Este valor tiene que ser corregido por efecto del tritio extraído del acuífero por bombeo y por descarga a los ríos.

Las pérdidas por bombeo se han estimado a partir de los datos sobre las extracciones anuales de agua aportados por los Organismos competentes del país. Este valor se estima en la actualidad en 10 Hm³/año. Teniendo en cuenta que el volumen medio del agua almacenada en el acuífero asciende a un valor próximo a 1000 Hm³, las extracciones por bombeo son próximas al 1% por año. Por tanto, el efecto del bombeo no afecta de forma significativa al balance de tritio obtenido anteriormente.

Por lo que respecta a la descarga en los ríos durante el período comprendido entre 1953 y 2000, sólo puede hacerse una estimación grosera de la misma. La permeabilidad de los materiales del acuífero ha sido estimada en un valor medio igual a 3×10^{-4} m/s. Por otra parte, los gradientes hidráulicos máximos del acuífero, localizados en las proximidades de los ríos San José y La Plata, ascienden a un valor próximo a 0.003. Aplicando la ecuación

Conc. de tritio		Espesor de lámina de agua (m)	Inventario de tritio (Bq/m ²)	Recarga anual media (l/m ²)	Superficie poligono (m ² × 10 ³)	Recarga total (Hm ³)
(UT)	(Bq/m ²)					
3,6	426,2	2,5	1065,6	47,8	172	8,21
3,4	402,6	2,0	805,1	36,1	99,6	3,59
3,1	367,0	2,5	917,6	41,1	141	5,78
1,8	213,1	2,0	426,2	19,1	59,8	1,14
0,1	11,8	3,0	35,5	1,6	41,5	0,066
0,2	23,7	2,5	59,2	2,6	23,4	0,062
0,5	59,2	3,0	177,6	8,0	33,2	0,26
0,7	82,9	2,3	190,6	8,5	76,2	0,65
0,97	114,8	3,0	344,5	15,4	73,2	1,13
1,4	165,8	2,0	331,5	14,9	56,2	0,83
1,3	153,9	2,3	354,0	15,9	2,9	0,046
0,45	53,3	4,5	239,8	10,7	14,4	0,15
2,2	260,5	4,3	1120,1	50,2	44,4	2,23
1,9	225,0	2,5	562,4	25,2	73,8	1,86
2,8	331,5	1,7	563,6	25,3	8,8	0,22
1,8	213,1	0,5	106,6	4,8	12,7	0,061
2,9	343,4	2,0	686,7	30,8	19,3	0,59
1,2	142,1	1,8	255,7	11,5	8,8	0,10
0,4	47,4	2,5	118,4	5,3	25,8	0,14
2,2	260,5	2,5	651,2	29,2	23,4	0,68
Valores medios					1010	27,8

TABLA 3. Cálculo de la recarga basado en la concentración de tritio medida en la zona saturada.

Darcy se obtiene una velocidad del flujo subterráneo igual a 3×10^{-7} m/s, equivalentes a 28 metros por año. Por tanto, tomando una porosidad eficaz igual al 10%, la velocidad real o velocidad de filtración sería de 280 metros/año. En 50 años, el agua infiltrada en un punto determinado del acuífero habría recorrido una distancia máxima de 13 km. Lógicamente, las aguas infiltradas en zonas de menor gradiente hidráulico, así como las infiltradas en años recientes habrán recorrido distancias mucho menores. Esto lleva a la conclusión de que la mayor parte del agua infiltrada en el acuífero durante los últimos 47 años se encuentra aún dentro del acuífero. Por otra parte, considerando que el acuífero se encuentra en equilibrio, es decir, con una descarga igual a la recarga, las pérdidas de tritio pueden estimarse en una fracción similar a la representada por la recarga. Esta fracción puede variar entre 7 y 15% del volumen total de agua dinámica del acuífero. Con esta hipótesis, las pérdidas de tritio por descarga a los ríos pueden estimarse en un valor medio igual al 10% del tritio ingresado cada año en el acuífero. Esto equivale a reducir el valor obtenido para el inventario de tritio en las precipitaciones (24.580 Bq/m^2) en un 10% adicional. Se llega así a un valor de este inventario igual a 21.880 Bq/m^2 , con el cual se obtiene un valor de la recarga total igual a $31,2 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

Por otra parte, debido a la ausencia de datos directos, el inventario de tritio para la zona no saturada, $(I_T)_{Z.N.S.}$, se ha calculado aceptando que las concentraciones existentes en la misma son iguales a las indicadas en la tabla 3 para la zona saturada. Esto no introduce un error elevado debido a que, como demuestra la figura 8C, las concentraciones de tritio de las precipitaciones corregidas por desintegración radiactiva para el período 1960 a 1999 varían entre sí, relativamente, poco. La contribución a la recarga de la zona no saturada se obtiene por el mismo procedimiento indicado para la zona saturada. El inventario de tritio se obtiene multiplicando estas concentraciones por los espesores de la lámina de agua de la zona no saturada. Estos últimos se han obtenido, a su vez, multiplicando el producto del espesor medio de la zona no saturada en cada celda por la humedad volumétrica, la cual ha sido estimada en un valor igual a 0,15. A partir de aquí, la recarga se ha calculado como se ha descrito para la zona saturada. Se llega así a un valor medio de la contribución de la zona no saturada igual a $19,4 \text{ Hm}^3/\text{año}$, que sumados a la contribución de la zona saturada proporciona un valor de la recarga total igual a $50,6 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Este valor es 2,9 veces inferior al obtenido por la firma consultora antes mencionada. La baja permeabilidad de la capa de loess y limos que recubre a la mayor parte del acuífero es responsable de ello.

7. CARBONO-14

Dadas las bajas concentraciones de tritio encontradas en muchos pozos, se pensó en la posibilidad de que existieran en el mismo aguas muy antiguas procedentes, principalmente, de aportes de las formaciones graníticas que rodean al acuífero. Para comprobar este punto, se determinó la concentración de carbono-14 en cuatro pozos que tenían una concentración de tritio próxima a cero. Los resultados obtenidos fueron negativos. Las aguas de estos pozos procedían de precipitaciones, relativamente, recientes, con "edades" de carbono-14 inferiores a unas pocas centenas de años.

8. CONCLUSIONES

Las aguas subterráneas del acuífero Raigón proceden en su mayor parte de las precipitaciones locales recargadas por superficie, si bien no puede descartarse la posibilidad de que existan aportes procedentes de la formación granítica adyacente. Estos últimos podrían llegar al acuífero a través de una franja central perpendicular al río de la Plata, dentro de la cual existen aguas de mayor salinidad. La composición química de las aguas se encuentra en una posición intermedia entre aguas bicarbonatadas cálcicas y cloruradas sódicas. Las primeras podrían proceder de la infiltración local, mientras que las segundas podrían estar relacionadas con los materiales graníticos. En general, las aguas del acuífero se caracterizan por tener unas concentraciones excesivamente altas de los iones alcalinos y excesivamente bajas de los iones alcalino-térreos. Las aguas reflejan un exceso considerable de los iones Na^+ y HCO_3^- , el cual puede explicarse por el intercambio iónico de los iones alcalino-térreos, originalmente disueltos en el agua, por iones alcalinos ligados a las formaciones arcillosas. Debido a la lentitud con la que se produce este intercambio a temperaturas normales, el hecho de ocurrir indica la presencia de aguas antiguas dentro del acuífero.

La piezometría obtenida por algunos autores para el acuífero Raigón indica la existencia de un flujo subterráneo de descarga hacia los ríos San José y Santa Lucía, que ha sido valorado por estos en $105 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Sin embargo, tanto la composición química, como la composición isotópica

de las aguas subterráneas, reflejan que esta descarga debe ser mucho menor. Esta afirmación se encuentra apoyada por los bajos caudales drenados por estos ríos en períodos de estiaje.

Las bajas concentraciones de tritio encontradas en numerosos puntos del acuífero indican de forma inequívoca la presencia de importantes proporciones de aguas infiltradas con anterioridad al año 1953. El balance del acuífero realizado por métodos convencionales indica una recarga anual media derivada de las precipitaciones locales igual a $148 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Con esta recarga, el agua almacenada en el acuífero se habría renovado totalmente en un período de 6,8 años y, durante el período comprendido entre los años 1953 y 2000, se habrían producido unas 7 renovaciones del agua del acuífero. Si ello fuera cierto, las concentraciones de tritio deberían haber sido mayores de 3 UT y no podría explicarse la existencia de concentraciones comprendidas entre 0 y 2 UT.

El balance del tritio contenido en el acuífero, junto con las concentraciones determinadas para las precipitaciones medias de la zona del estudio, han permitido realizar una estimación aproximada de la recarga del acuífero derivada de dichas precipitaciones. Se ha obtenido un valor igual a $50,6 \text{ l/m}^2$ por año que, para la superficie total del acuífero (1000 km^2), equivale a $50,6 \text{ Hm}^3$ por año. Este valor es unas tres veces menor que la recarga obtenida por otros autores utilizando técnicas convencionales. La justificación de una recarga tan baja se tiene en la baja permeabilidad del estrato de loess y limos cuaternarios que cubre casi a la totalidad del acuífero.

9. BIBLIOGRAFÍA

- OIEA, Organismo Internacional de Energía Atómica, 1992. Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation. Technical Report Series, 331. OIEA, Viena, 781 pp.
- PLATA BEDMAR, A., PÉREZ ZABALETA, E. y MORENO SÁNCHEZ, J., 1996, "Evaluación de la recarga moderna de la Unidad Hidrológica Los Arenales usando técnicas isotópicas", Ingeniería Civil, número 103/1996, pág.131-145.