

Presente y futuro del tritio natural como herramienta de investigación hidrológica

ANTONIO PLATA BEDMAR (*)

RESUMEN El presente trabajo describe las posibilidades presentes y futuras del tritio natural como herramienta de investigación hidrológica. En la primera parte del trabajo se estudian las fuentes responsables de la presencia de tritio en las precipitaciones recientes a nivel global, incluyendo los ensayos de armas nucleares (tritio de origen termonuclear), reacciones nucleares producidas en la alta atmósfera (tritio “cosmogénico”) y emisión producida en plantas e instalaciones nucleares de tipos diversos (tritio “antropogénico”). Se analiza a continuación la tendencia previsible de la concentración de tritio en las precipitaciones de años venideros. Por último, se describen los principales métodos de interpretación de los resultados con especial hincapié en el estudio de la recarga de acuíferos.

PRESENT AND FUTURE OF NATURAL TRITIUM AS A TOOL FOR HYDROLOGICAL STUDIES

ABSTRACT *This paper describes the present and future possibilities offered by natural tritium as a tool for hydrological studies. In the first part of the paper, the sources which are responsible for the presence of tritium in the water are analyzed, including the nuclear weapon tests (thermonuclear tritium), nuclear reactions produced in the high atmosphere (cosmogenic tritium) and emission produced at nuclear plants and installations of different types (androgenic or technogenic tritium). Furthermore, the foreseeable trends of tritium in the precipitation of coming years are analyzed. Finally, the paper describes the more important guidelines and methods for the interpretation of the results with particular emphasis in the study of aquifer recharge.*

Palabras clave: Tritio, Ensayos termonucleares, Modelos de distribución en precipitaciones, Red GNIP, Aguas modernas, Tiempo de renovación, Recarga de acuíferos.

1. INTRODUCCIÓN

Como se sabe, el tritio es el isótopo del hidrógeno con número de masa 3 (^3H) y posee, por tanto, en su núcleo un protón y dos neutrones. Se trata de un isótopo radiactivo que se desintegra por emisión de partículas beta de muy baja energía (18 keV de energía máxima) con un período de semidesintegración de 4500 ± 8 días (1), es decir, de $12,33 \pm 0,02$ años (Lucas y Unterwenger, 2000). Debido a este corto período, su uso en hidrología e hidrogeología se circunscribe a la investigación de procesos en los que intervienen aguas procedentes de precipitaciones recientes. El tritio (T) llega a estas aguas en forma de moléculas THO a través de diferentes procesos, que se analizan en el apartado siguiente. En muchos casos, este radionucléido es la única herramienta que puede demostrar de una forma inequívoca y fehaciente la presencia de agua procedente de precipitaciones de los últimos 50 años. Pero, además, como se verá más adelante, el tritio puede proporcionar en determinados casos información semicuantitativa sobre el comportamiento dinámico del agua, por ejemplo, sobre la recarga de determinados acuíferos.

El control del tritio en las precipitaciones se viene realizando a nivel global desde el comienzo de los años 50 por diversos laboratorios en muestras medias mensuales ponderadas tomadas de las precipitaciones de 386 estaciones pertenecientes a 82 países, si bien hay que indicar que en la mayoría de estas estaciones el control no ha tenido un carácter continuo y permanente. Los resultados obtenidos han sido incluidos dentro del programa GNIP (iniciales de “*global network of isotopes in precipitation*”) controlado conjuntamente por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y se encuentran disponibles a través de Internet y de diversas publicaciones realizadas por estos Organismos en forma de informes conocidos como “*Technical Reports Series*” (IAEA, 1992). Estos informes incluyen también datos de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18 analizados en las mismas muestras de agua. El modelo de tritio en las precipitaciones de todo el globo durante los últimos 52 años es, aproximadamente, el mismo para cualquier punto del globo, debido a que los ensayos termonucleares principales responsables de la contaminación atmosférica con este radionucléido afectaron a todo el globo de una forma más o menos paralela en el tiempo. Esto hace que la información contenida en la red GNIP permita determinar de una forma aproximada las concentraciones medias anuales en las precipitaciones habidas durante este período en cualquier punto del globo no incluido en la red.

(*) Licenciado en Ciencias Químicas, funcionario jubilado del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y del Organismo Internacional de Energía Atómica (Viena, Austria).

En España, la medida del tritio en las precipitaciones de Madrid se viene llevando a cabo de forma sistemática por el CEDEX desde el año 1970 a razón de muestras medias mensuales ponderadas. Los datos se encuentran incluidos asimismo en la red GNIP. De forma discontinua o esporádica se han analizado también muestras de precipitaciones de otros puntos del país, entre los cuales cabe destacar las medidas efectuadas en las precipitaciones de Barcelona durante el período 1971-1987, realizadas asimismo por el CEDEX. Aparte de esto, un laboratorio del Reino Unido ha analizado el tritio de una forma sistemática desde el año 1962 en las precipitaciones de Gibraltar. También existen datos obtenidos en períodos cortos en algunas estaciones ubicadas en Portugal (Faro y Oporto).

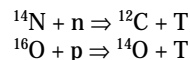
Los primeros incluyen la emisión directa por el sol y la producción en la alta atmósfera mediante reacciones nucleares inducidas por neutrones y protones de alta energía con los gases nitrógeno y oxígeno. Los segundos incluyen los ensayos de armas termonucleares realizados en la atmósfera, principalmente, durante el período comprendido entre 1954 y 1980 y en menor magnitud la liberación de este radionucleído en plantas de tratamiento de combustibles irradiados, en plantas nucleares de producción de energía eléctrica, sobre todo las que utilizan reactores moderados con agua pesada, así como en plantas donde se producen productos luminiscentes activados con tritio (caso de Berna, Suiza), tales como las ubicadas en la zona central de Europa.

La primera parte del trabajo se dedica al análisis de los datos históricos del tritio en las precipitaciones del globo, describiendo las principales fuentes de producción, el modelo para el período 1954 a 2004 y las previsiones para años venideros. Todo ello haciendo especial hincapié para las precipitaciones de la Península Ibérica. La segunda parte se dedica a la descripción de las posibilidades ofrecidas por el tritio para la investigación hidrológica, haciendo hincapié en la determinación de la recarga de acuíferos de renovación rápida del agua (acuíferos de libre recarga).

2. FUENTES DE PRODUCCIÓN DE TRITIO

El tritio (T) del agua procede tanto de causas naturales como de causas artificiales. Las primeras incluyen, como más importante, determinadas reacciones nucleares que tienen lugar en la alta atmósfera producidas por los neutrones (n) y protones (p) de alta energía liberados por los rayos có-

smicos de procedencia extraterrestre sobre los átomos de ésta. Entre estas reacciones destacan las siguientes:



La producción de tritio por esta causa se estima en unos 0,25 átomos/s por centímetro cuadrado de superficie terrestre y produce en las precipitaciones concentraciones medias anuales de tritio comprendidas entre 2 unidades de tritio (UT)¹ en zonas tropicales y 20 UT en las regiones polares. En zonas de clima templado, tales como Europa, se tenían concentraciones próximas a 5 UT.

Entre las causas artificiales, la más trascendente fue sin duda las explosiones termonucleares realizadas, principalmente, durante el período 1952 a 1962 y en menor número en los años 70 y 80, tal como se muestra en la figura 1. Antes del año 1952, el inventario global de tritio presente en la atmósfera debido a las causas naturales se estimaba en unos 3,6 Kg., que equivalen a 34,8x10⁶ curios (Ci). El tritio liberado en la atmósfera por las explosiones termonucleares¹ fue, aproximadamente de 0,07 Kg. por megatón (un megatón equivale a un millón de toneladas de trinitrotolueno, TNT). De esta forma, se estima que, entre 1945 y 1962, se liberaron 816 Kg. de tritio y entre 1967 y 1980 unos 20 Kg. adicionales. Este tritio se distribuyó por todo el globo y fue arrastrado por las precipitaciones en forma de agua tritiada THO. La mayor parte de este tritio fue liberado en el Hemisferio Norte porque fue en este Hemisferio donde se realizaron casi todos los ensayos nucleares. Como se verá más adelante, la concentración de tritio en las precipitaciones del Hemisferio Norte aumentaron casi en tres órdenes de magnitud, llegando hasta un valor máximo próximo a 10.000 UT en la región central de Canadá. En el Hemisferio Sur sólo se incrementaron en un factor aproximado de 10. Ello se debe en parte a la dificultad con que ocurre el mezclado de la atmósfera entre los dos Hemisferios y en parte al hecho de que la mayor proporción de agua existente en el Hemisferio Sur condiciona un "lavado" más rápido de la atmósfera del tritio acumulado en la estratosfera.

(1) Las bombas de fisión producen, aproximadamente, la liberación de 0,07 Kg. de tritio por megatón, mientras que, para las bombas de fusión, este valor asciende a unos 2 Kg. de tritio por megatón. La unidad de tritio UT se define como una relación T/H igual a 10⁻¹⁸ y equivale a 0,118 Bq/l o 3,2x10⁻³ µC/m³.

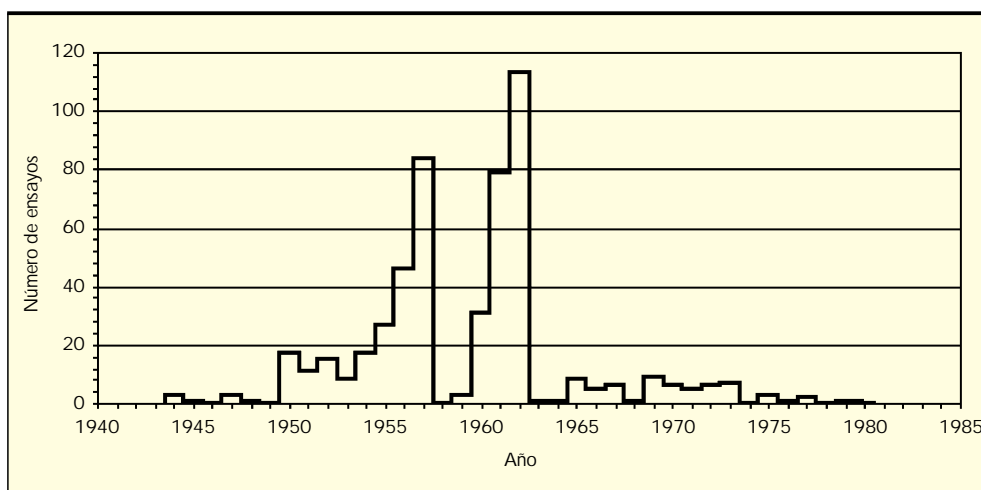


FIGURA 1. Número de explosiones de armas nucleares realizadas en la atmósfera entre 1944 y 1980.

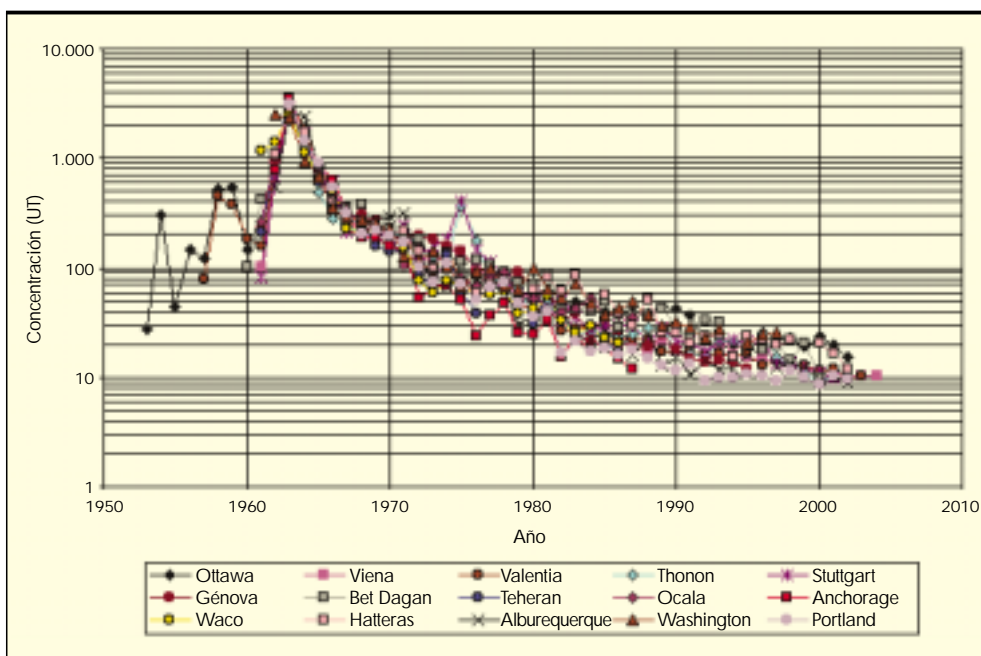


FIGURA 2. Ley de variación de la concentración de tritio en las precipitaciones de 15 estaciones de la red GNIP.

Las otras causas no naturales que producen la emisión de tritio a la atmósfera son las siguientes:

- 1) Plantas nucleares de producción de energía eléctrica, principalmente aquellas que utilizan reactores de agua hirviendo. El efecto de estas plantas fue claramente ostensible en la estación de Ottawa (Canadá), como se verá en el apartado siguiente.
- 2) Plantas de tratamiento de combustibles nucleares irradiados, cuyo efecto fue evidente en la zona central de Europa entre 1970 y 1990 (Herbert, 1990), así como en Rusia a partir de 1975.
- 3) Instalaciones industriales donde se fabrican productos luminiscentes activados con tritio. Este efecto fue claramente perceptible en 1975 en las estaciones suizas de Berna, Grimsel, Guttanen y Meiringen. La actividad de tritio procesada en este país durante la década de los años 70 era mayor de 100.000 curios por año (aproximadamente, 20 gramos por año).
- 4) Reactores instalados en determinados submarinos de propulsión nuclear, que utilizan reactores de agua hirviendo. A pesar de que no existir evidencia de ello, el autor cree que este efecto es responsable de las elevadas concentraciones de tritio observadas, ocasionalmente, en las estaciones de Gibraltar (marzo de 1986, noviembre de 1986 a febrero de 1987, enero a marzo de 1988, febrero y marzo de 1989 enero de 1994, marzo de 2002 y enero de 2004), Isla de Diego García en el océano Índico (1967), Hong Kong (1983 y 1995), isla Argentina, Antártica (abril a agosto de 1987), Alesund, Noruega (abril 1993, julio 1997 y agosto 1998), Lista, Noruega, (1972 y 1973) y algunas otras.

3. DISTRIBUCIÓN GLOBAL DEL TRITIO

3.1. LEY DE DISTRIBUCIÓN PARA EL HEMISFERIO NORTE

La primera estación del globo donde se inició un control sistemático del contenido de tritio en las precipitaciones fue

Ottawa, Canadá, donde existe un registro completo desde 1953 hasta nuestros días. La red GNIP controlada por el OIEA y OMM se inició en 1961 y en ella han participado 44 laboratorios de distintos países. Los análisis se realizaron sobre la base de muestras medias mensuales ponderadas. La figura 2 muestra la variación durante los años posteriores a 1953 de estas concentraciones medias en una serie de estaciones de la red situadas en el Hemisferio Norte donde existen datos más completos. El análisis de estas curvas permite hacer las siguientes observaciones:

- 1) La ley de distribución del tritio fue similar para todas las estaciones del Hemisferio Norte, lo cual era de esperar dado que las explosiones nucleares afectaron a todo el globo. El pico de concentración observado en el año 1963 se debe al elevado número de explosiones realizadas en 1962 (unos 340 megatonnes), como se muestra en la figura 1. De la misma forma, el pico de 1958 observado en las estaciones de Ottawa y Valentia (Irlanda) se relaciona con el pico de 1957 indicado en esta figura, que corresponde a unos 81 megatonnes.
- 2) Los cambios de concentración para un mismo año observados en diferentes estaciones se explica, principalmente, por los factores conocidos como efecto de latitud y efecto del grado de continentalidad, los cuales se analizan más adelante.
- 3) El pico que se observa en 1975 para las estaciones de Thonon-les-Bains y de Stuttgart se relacionan con las emisiones realizadas en las fábricas de productos luminiscentes de Suiza. A esta conclusión se llega porque picos similares se observaron en las cuatro estaciones suizas indicadas en el apartado anterior y no, en cambio, en las estaciones alejadas de este país.

De todas las estaciones incluidas en la figura 2, hay dos que se han tomadas por muchos autores como representativas del modelo válido para el Hemisferio Norte. Estas son las de Ottawa y la de Viena, cuyos datos se refle-

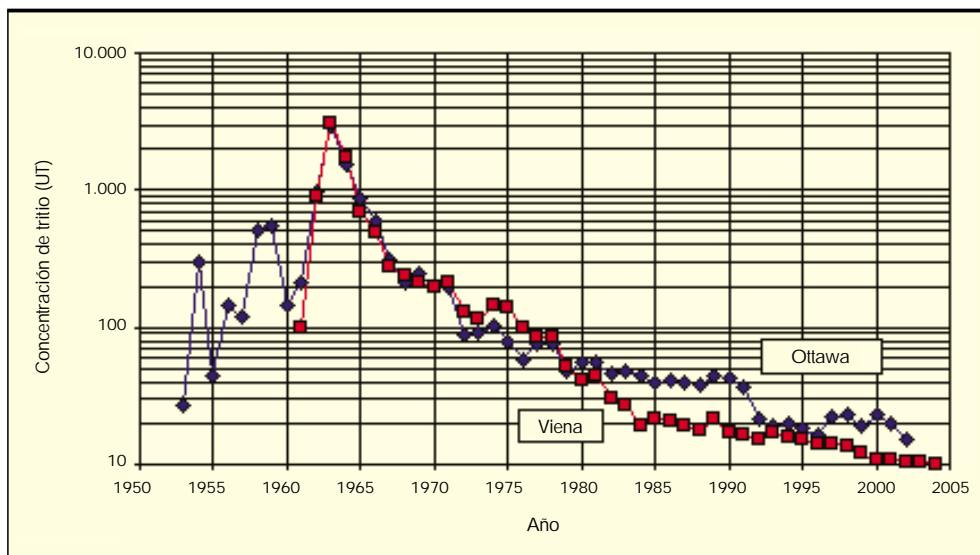


FIGURA 3. Ley de variación de la concentración de tritio en las precipitaciones de Ottawa y Viena.

jan en la figura 3. Esta figura demuestra que, efectivamente, hasta el año 1979 los datos de ambas estaciones discurrieron de forma paralela, debido a tratarse de dos estaciones continentales situadas a una latitudes parecidas. Sin embargo, a partir de este año se observaron desviaciones importantes en la estación de Ottawa, debido a las emisiones de tritio relacionadas con plantas nucleares de producción de energía eléctrica.

Combinando los datos correspondientes a las 15 estaciones de la red GNIP mostradas en la figura 2, el autor de este trabajo ha elaborado un modelo general para el Hemisferio Norte que refleja con mayor fidelidad lo acontecido en el mismo. Esta mayor fidelidad se basa en el hecho de haber sido eliminados aquéllos valores que se desvían de la tendencia general debido a causas de carácter local. Los resul-

tados del modelo se muestran en la tabla 1 y en la figura 4. Los valores de concentración se han normalizado dando un valor de 1000 UT para las precipitaciones del año 1963. Este modelo puede utilizarse en estaciones de registros incompletos para deducir los valores correspondientes a los años sin dato de concentración, así como para estimar la ley de distribución del tritio en las precipitaciones de otros puntos del Hemisferio Norte donde no exista ningún dato, basándose en los datos de estaciones próximas. No obstante, como se verá más adelante, para esta estimación debe tenerse en cuenta el grado de continentalidad y la latitud del punto en cuestión en relación con estas estaciones próximas. En el caso de zonas próximas al mar, el modelo puede proporcionar valores incorrectos para las precipitaciones posteriores al año 1990, tal como se indica en el apartado 3.5.

Año	UT	Año	UT	Año	UT	Año	UT
1953	9,4	1966	161,8	1979	18,1	1992	6,3
1954	103,1	1967	97,1	1980	17,1	1993	6,7
1955	15,3	1968	84,5	1981	18,5	1994	5,5
1956	49,8	1969	77,2	1982	13,0	1995	6,0
1957	33,9	1970	68,7	1983	13,0	1996	6,2
1958	166,0	1971	64,7	1984	10,6	1997	5,7
1959	157,2	1972	41,3	1985	10,4	1998	5,2
1960	49,2	1973	36,6	1986	9,2	1999	4,7
1961	107,6	1974	39,9	1987	9,2	2000	4,3
1962	362,9	1975	43,0	1988	9,6	2001	4,2
1963	1000	1976	27,6	1989	8,9	2002	3,7
1964	539,3	1977	26,3	1990	7,7	2003	3,5
1965	252,0	1978	25,6	1991	6,8	2004	3,5

TABLA 1. Modelo de concentración de tritio elaborado por el autor para las precipitaciones medias anuales de las estaciones situadas en el Hemisferio Norte. Los valores han sido normalizados suponiendo un valor igual a 1000 UT para las precipitaciones del año 1963.

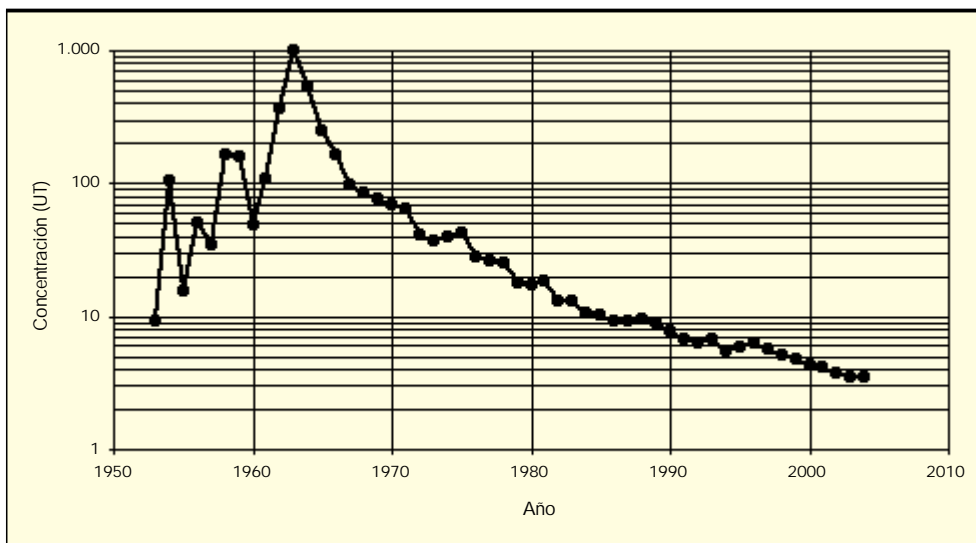


FIGURA 4. Modelo elaborado por el autor a partir de los datos de 15 estaciones de la red GNIP situadas en el Hemisferio Norte para la concentración de tritio en las precipitaciones a partir del año 1953.

3.2. EFECTOS DE LATITUD Y DE CONTINENTALIDAD

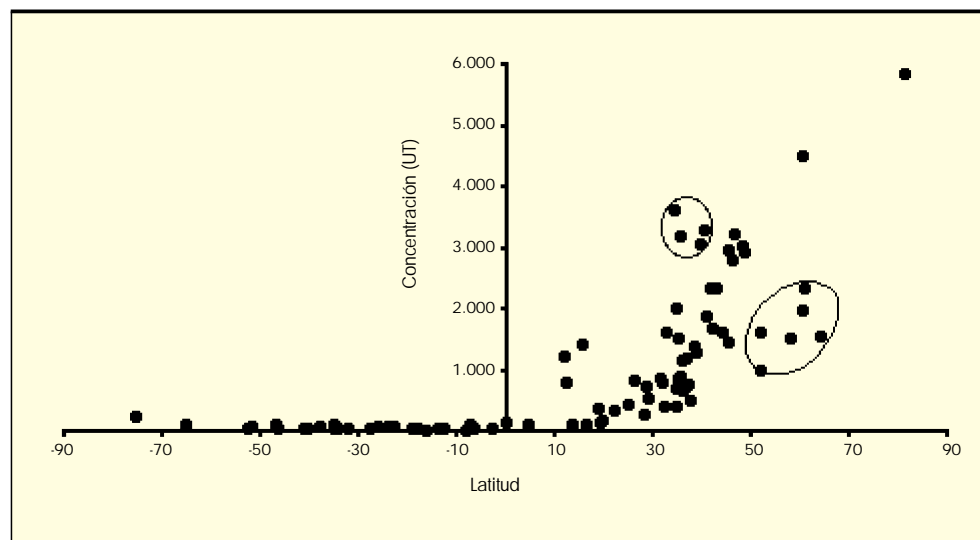
La figura 5 muestra la variación con la latitud de la concentración media obtenida para el año 1963 en todas las estaciones de la red GNIP donde existen datos para las precipitaciones medias de este año. Lógicamente, los valores para otros años varían de una forma paralela a los de este pico. Lo primero que se observa en esta figura es la gran diferencia de concentración observada entre los dos Hemisferios. En el Hemisferio Sur, así como en la región tropical del Hemisferio Norte, las concentraciones de tritio tuvieron valores muy bajos, mientras que a partir de unos 25°N estas concentraciones aumentaron de forma espectacular en función de la latitud, siguiendo una ley más o menos lineal. Sin embargo, hay tres grupos de estaciones que se apartan de esta ley. El grupo 1 corresponde a estaciones de latitudes comprendidas entre 50°N y 68°N situadas en las proximidades del mar (estaciones marítimas). La menor concentración de tritio se explica por el intercambio más rápido del vapor de agua producido por la evaporación en el mar, donde no

existe tritio por razones obvias: el tiempo medio de residencia del agua en el mar se estima en unos 2000 años, valor este extremadamente elevado comparado con el período de semidesintegración del tritio. Por el contrario, las anomalías observadas en las estaciones de los grupos 2 y 3 se explican por el elevado grado de continentalidad de estas estaciones derivada de su elevada distancia al mar.

La influencia de la latitud se relaciona con la elevada tasa de transferencia de tritio de la estratosfera a la troposfera que tiene lugar en las altas latitudes, preferentemente, durante la primavera. El gradiente de concentración se amplifica por el transporte turbulento hacia el ecuador de grandes masas de vapor de agua con bajos contenidos de tritio, que son responsables de la elevada precipitación que ocurre en esta zona. La influencia de la latitud no resulta claramente apreciable en el Hemisferio Sur. Solamente la estación más meridional situada en la bahía Halley de la Antártica refleja una concentración significativamente más elevada.

FIGURA 5. Variación con la latitud de la concentración de tritio en las precipitaciones del año 1963 en todas las estaciones de la red GNIP del OIEA-OMM donde se conoce este dato.

- 1) Reykiavik (Islandia), Lista (Noruega), Bethel y Adak (Alaska, USA), Groenedal (Groenlandia, Dinamarca) y Valentia (Irlanda).
- 2) Kabul (Afganistán), Teheran (Iran), Ankara (Turquía) y Salt Lake (USA).
- 3) Khartoum (Sudán), D'Jamena (El Chad) y Bamako (Mali).



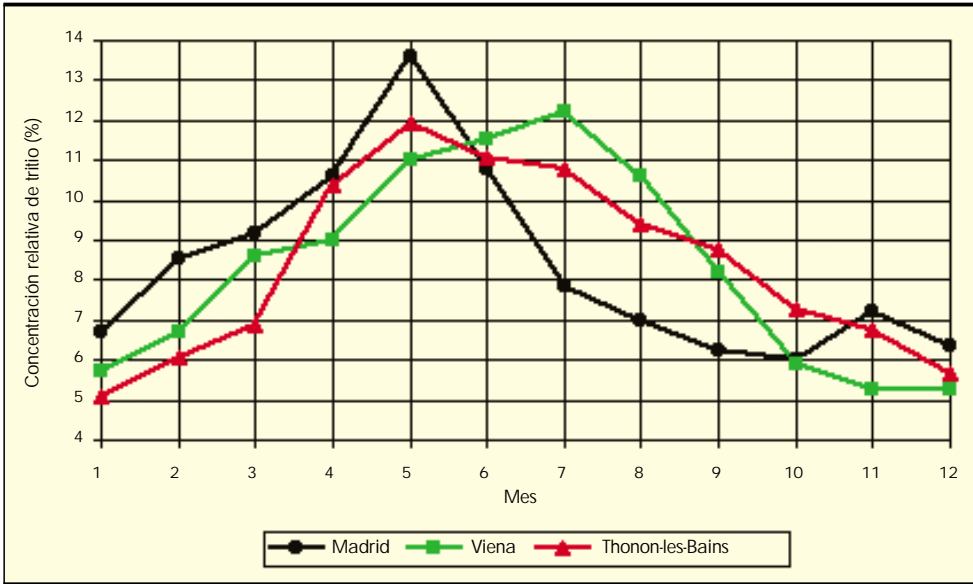


FIGURA 6. Variaciones estacionales de la concentración de tritio en las precipitaciones de tres estaciones europeas. La concentración se expresa como tanto por ciento de la suma de los valores obtenidos para los 12 meses del año.

3.3. VARIACIONES ESTACIONALES

Debido al aumento del intercambio de vapor de agua entre la troposfera y la estratosfera que tiene lugar a finales de la primavera en el Hemisferio Norte, las concentraciones de tritio en las precipitaciones de esta época del año suelen ser mucho más elevadas que las correspondientes a la estación invernal. Este efecto estacional se ilustra en la figura 6 para la estaciones de Madrid, Viena (Austria) y Thonon-les Bains (Francia). Se observa que las precipitaciones de los meses de Mayo y Junio son, aproximadamente, el doble que las del mes de Enero. Obviamente, las aguas subterráneas no reflejan estas variaciones estacionales debido al efecto amortiguador de los acuíferos. Pero, estas variaciones afectan de forma significativa a los valores ponderados para las precipitaciones medias anuales, es decir, a los valores que tienen en cuenta la cantidad de precipitación de cada mes del año. Puesto que en zonas de climas templados, las precipitaciones son mayores du-

rante el invierno, los valores medios ponderados suelen ser algo más bajos que los valores medios no ponderados. Este hecho debe tenerse en cuenta para la determinación de las concentraciones medias anuales para una estación en que se carezca de datos y haya que utilizar datos de estaciones próximas.

3.4. LEY DE DISTRIBUCIÓN PARA EL HEMISFERIO SUR

La estación del Hemisferio Sur donde se dispone de un registro más completo de las concentraciones de tritio en las precipitaciones de los últimos años es la localizada en Kaitoke (Nueva Zelanda). Debido a ello, los datos de esta estación son utilizados como modelo de referencia para las precipitaciones de otros puntos del Hemisferio Sur. Estos datos se muestran en la figura 7. Se observa que, como se ha mencionado anteriormente, las concentraciones de tritio observadas en el Hemisferio Sur fueron mucho más bajas que en el Hemisferio Norte. Ello se debe, sobre todo, a que

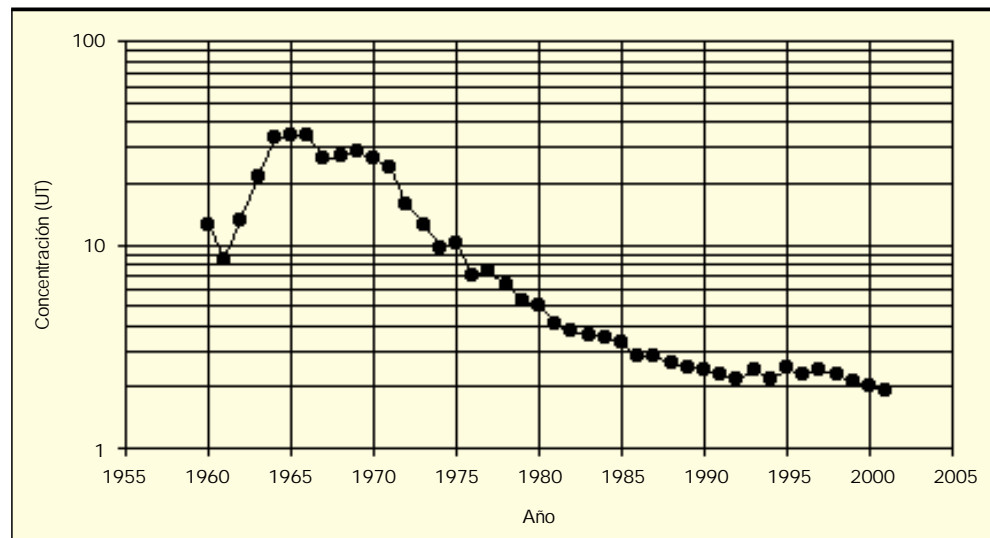


FIGURA 7. Modelo de tritio para las precipitaciones de Kaitoke (Nueva Zelanda).

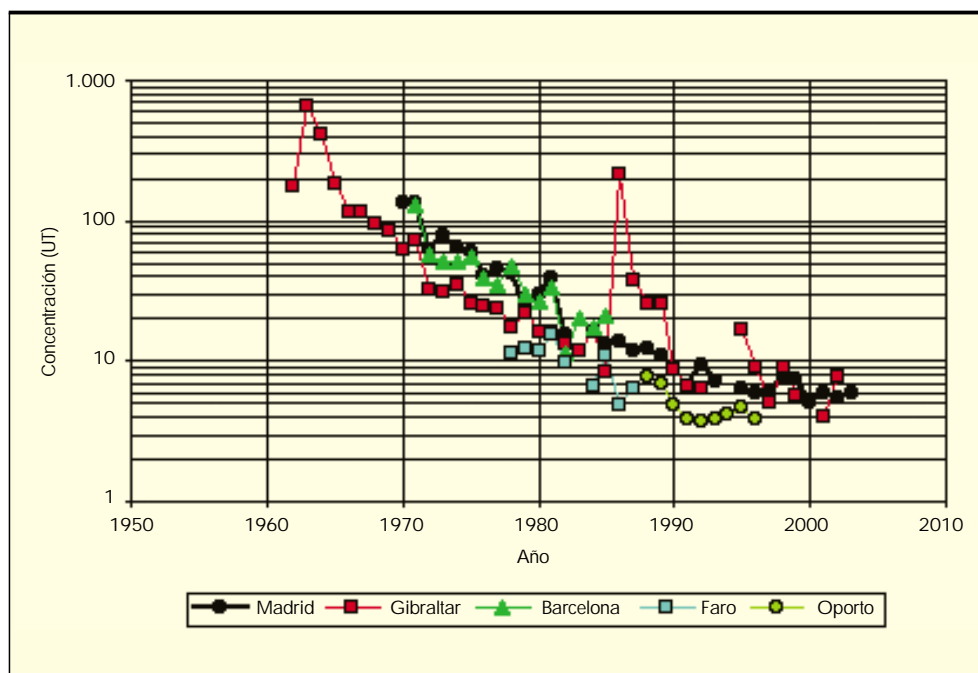


FIGURA 8. Concentraciones de tritio medias anuales medidas en las precipitaciones de estaciones situadas en la Península Ibérica.

la mayor parte de los ensayos nucleares fueron realizados en el Hemisferio Norte y al hecho de que el mezclado de la atmósfera entre ambos Hemisferios se realiza con gran lentitud. Aparte de esto, también contribuye a esta diferencia el hecho de que el intercambio de vapor entre la atmósfera y el océano, donde no hay tritio, es mucho mayor en el Hemisferio Sur debido al mayor valor de la relación agua/tierra. Se observa asimismo que el pico de concentración en el Hemisferio Sur tuvo lugar en el año 1964 (en algunas estaciones, en el año 1965), en lugar del año 1963, como fue el caso del Hemisferio Norte. Incluso, algunas estaciones situadas en zonas tropicales, tales como las de Bangkok y Singapur, se ajustan mejor al modelo de Kai-toke que al del Hemisferio Norte.

3.5. LEY DE DISTRIBUCIÓN PARA LA PENINSULA IBÉRICA

La figura 8 muestra casi la totalidad de los datos existentes sobre la concentración de tritio en las precipitaciones de estaciones diversas de la Península Ibérica, incluyendo España, Portugal y Gibraltar. Como se ha indicado anteriormente, los datos de España corresponden a los análisis efectuados por el CEDEX de las precipitaciones de Madrid y Barcelona. El resto de los datos corresponden a los valores publicados por la red GNIP. Aparte de estos datos, el CEDEX ha realizado análisis de precipitaciones de otros puntos de España, cuyo valor es difícil de analizar debido a su carácter aislado. En líneas generales, se observa un buen paralelismo en los datos de las cinco estaciones. Los picos que se observan en los datos de Gibraltar se relacionan con las emisiones producidas por submarinos de propulsión nuclear, tal como se ha mencionado en el apartado 2. Las concentraciones para las estaciones de Madrid y Barcelona son muy parecidas, debido a que el efecto de la distancia al mar se ve compensado por la latitud más elevada de Barcelona. Los valores de Gibraltar, una vez depurados por las emisiones supuestamente producidas por los submarinos, pueden considerarse más o menos representa-

tivos de las estaciones marítimas de la Península Ibérica, sobre todo de las situadas en la mitad más meridional.

El modelo válido para las precipitaciones de Madrid y, de acuerdo no lo indicado anteriormente, también para Barcelona se presenta en la figura 9 y en la tabla 2. Los valores de los años para los que se carecen de datos experimentales han sido calculados a partir del modelo indicado para el Hemisferio Norte (tabla 1). En la tabla 2 se indican también los valores corregidos por desintegración radiactiva referida al año 2006 (valores entre paréntesis). Es decir, estos últimos valores corresponden a las concentraciones que tendrían en 2006 precipitaciones de los años pasados a partir de 1953. Las precipitaciones anteriores a este año tendrían en 2006 concentraciones inferiores a 0,5 UT, es decir, prácticamente despreciables. Se observa en la tabla que, a partir del año 1990, las concentraciones de tritio se han mantenido más o menos constantes con un valor medio igual a 7,1 UT. Ello se explica por el "lavado" casi exhaustivo de la atmósfera del tritio de origen termonuclear producido por intercambio de vapor de agua. Si se consideran las concentraciones corregidas por desintegración radiactiva, los valores se han mantenido casi iguales desde el año 1982 con un valor medio de 4,1 UT. Debe indicarse que los errores analíticos representados por la desviación estándar para las concentraciones inferiores a 5 UT son del orden de 0,2 UT.

Obviamente, si, como se supone, la concentración de tritio en las precipitaciones de los años venideros se mantiene, aproximadamente, constante, el modelo representado por los valores corregidos de la figura 9B se irá modificando con el tiempo debido a la desintegración radiactiva del tritio. La modificación consistirá en una disminución progresiva del pico de los años 60 y 70 y, al mismo tiempo, en la formación de un valor mínimo de concentración para el año 1982 seguido de un aumento progresivo hasta el año en que nos encontremos. El pico habrá dejado de ser perceptible (concentración inferior a 1 UT) alrededor del año 2080.

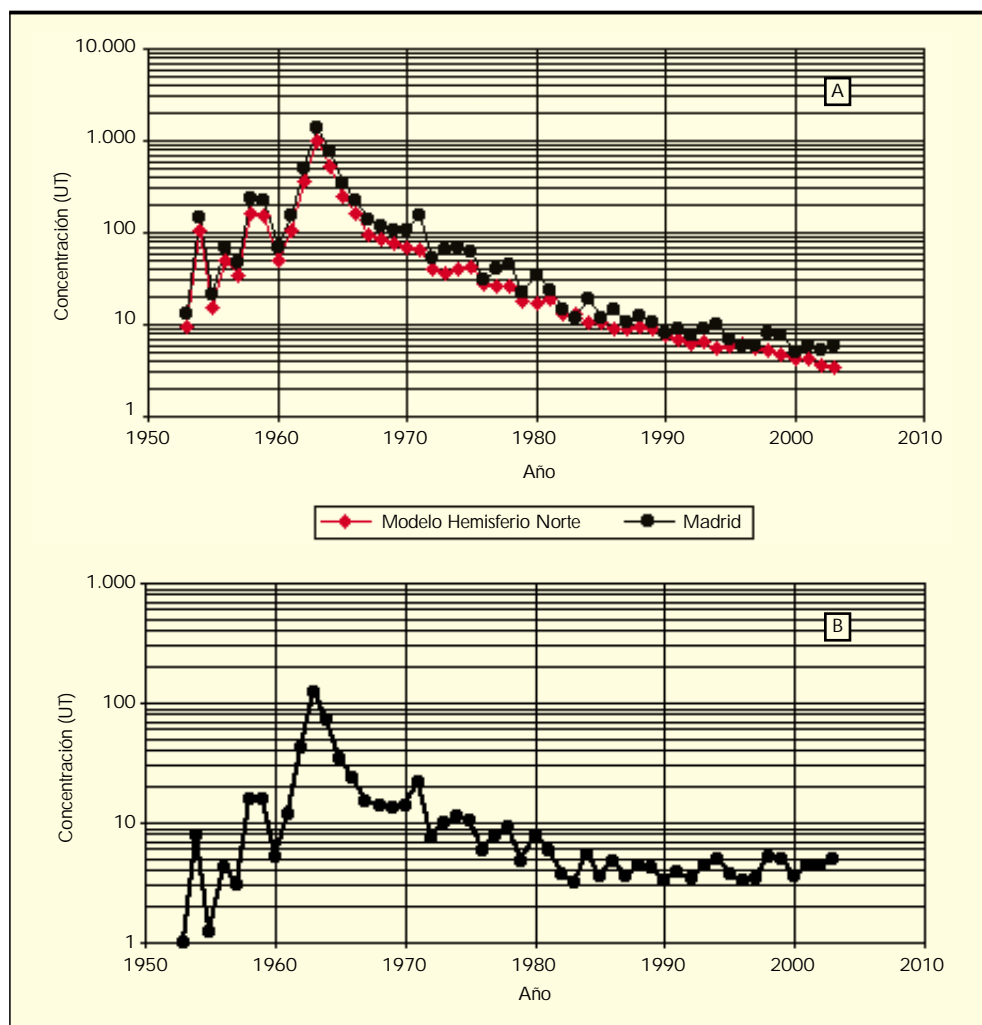


FIGURA 9. Modelo de tritio para las precipitaciones de Madrid. La figura B muestra los valores corregidos por desintegración radiactiva con referencia al año 2006.

Año	UT	Año	UT	Año	UT	Año	UT
1953	13,0 (1,0)	1966	225,4 (23,8)	1979	21,9 (4,8)	1992	7,5 (3,4)
1954	143,6 (7,7)	1967	135,3 (15,1)	1980	33,5 (7,8)	1993	9,1 (4,4)
1955	21,3 (1,2)	1968	117,6 (13,9)	1981	23,9 (5,9)	1994	9,9 (5,0)
1956	69,3 (4,2)	1969	107,5 (13,4)	1982	14,5 (3,8)	1995	6,9 (3,7)
1957	47,3 (3,0)	1970	104,6 (13,8)	1983	11,6 (3,2)	1996	5,9 (3,4)
1958	231,1 (15,6)	1971	153,2 (21,4)	1984	18,6 (5,4)	1997	5,8 (3,5)
1959	218,9 (15,6)	1972	51,4 (7,6)	1985	11,5 (3,5)	1998	8,2 (5,2)
1960	68,5 (5,2)	1973	64,8 (10,1)	1986	14,4 (4,7)	1999	7,5 (5,1)
1961	149,9 (11,9)	1974	67,1 (11,1)	1987	10,4 (3,6)	2000	5,0 (3,6)
1962	505,4 (42,6)	1975	60,4 (10,6)	1988	12,3 (4,5)	2001	5,9 (4,5)
1963	1392,6 (124,2)	1976	31,2 (5,8)	1989	10,8 (4,2)	2002	5,4 (4,3)
1964	751,1 (70,8)	1977	39,5 (7,7)	1990	8,0 (3,3)	2003	6,0 (5,1)
1965	351,0 (35,0)	1978	44,7 (9,3)	1991	9,0 (3,9)		

TABLA 2. Modelo de tritio válido para las precipitaciones de Madrid. Los valores indican concentraciones medias anuales. Los valores entre paréntesis corresponden a las concentraciones corregidas por desintegración radiactiva con referencia al año 2006.

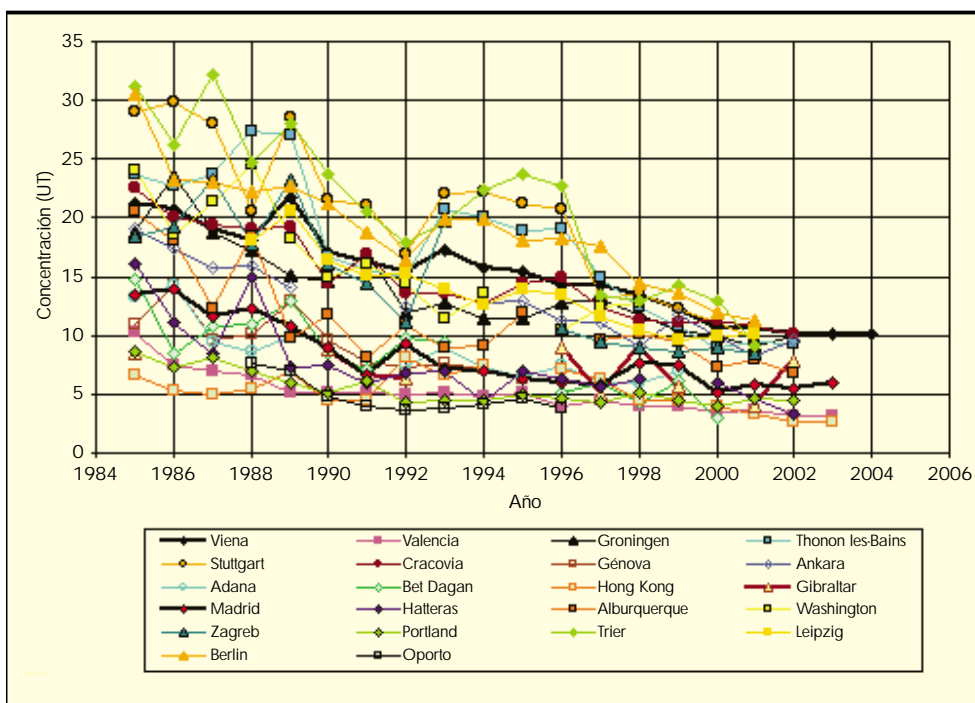


FIGURA 10. Concentraciones de tritio medidas en las precipitaciones de 22 estaciones de la red GNIP a partir del año 1985.

3.6. PREVISIONES PARA AÑOS VENIDEROS

Con el objeto de analizar la tendencia de las concentraciones de tritio en las precipitaciones futuras, se han representado en la figura 10 los datos obtenidos para 22 estaciones de la red GNIP distribuidas por todo el globo correspondientes a precipitaciones posteriores al año 1985. Se observa la existencia de dos grupos de estaciones representados, respectivamente, por las estaciones de Viena y Madrid (curvas marcadas en negro). El grupo superior corresponde a estaciones de un alto grado de continentalidad. En estas estaciones, se observa la presencia de tritio termonuclear, al menos, hasta el año 2000. El pico que se observa entre 1993 y 1996 en cuatro de estas estaciones (Trier, Berlín, Thonon-les-Bains y Stuttgart) se asocia con la liberación de tritio a la atmósfera producida en plantas de tratamiento de combustibles nucleares situadas en Europa Central. En cambio, en las estaciones del grupo inferior, la ausencia de tritio termonuclear se inicia, más o menos, en el año 1992. A partir de este año, el tritio contenido en las precipitaciones se debe, casi exclusivamente, a las causas naturales y antropogénicas mencionadas en el apartado 3.1. Este grupo lo forman las estaciones de Madrid, Gibraltar, Oporto, Hatteras (USA), Portland (USA), Hong Kong, Valencia (Irlanda) y Adana (Turquía). A excepción de Madrid, todas ellas son estaciones próximas al mar, debido a lo cual, la desaparición más rápida del tritio termonuclear se relaciona con una tasa mayor de intercambio del vapor de agua entre la estratosfera y la troposfera, tal como se ha indicado en el apartado anterior.

Los resultados mostrados en la figura 10 permiten sugerir que, a menos que se produzcan cambios drásticos no esperados en la emisión de tritio a la atmósfera, las concentraciones de este radionucéido en las precipitaciones de los años próximos se mantendrán en unos valores muy parecidos a los observados durante los últimos años. Ello permite asegurar que el tritio continuará siendo de forma permanente una herramienta importante en Hidrología para la identificación de aguas recientes y para su utilizado, junto

con los isótopos estables deuterio y oxígeno-18 como trazadores naturales isotópicos incorporados en la propia molécula de agua a diferencia de los trazadores formados por productos disueltos en el agua.

4. MÉTODOS INTERPRETATIVOS

4.1. CONSIDERACIONES GENERALES

En este apartado y en los siguientes se describen los criterios y procedimientos seguidos para la interpretación de los resultados de tritio obtenidos en muestras de aguas subterráneas, haciendo referencia, principalmente, al caso de la Península Ibérica.

Como se ha indicado en el apartado 3.4, el modelo de tritio mostrado en la figura 9 es, aproximadamente, válido para cualquier punto de la Península Ibérica que se encuentre situado a una distancia de la costa mayor de unos 100 km. Para las zonas costeras, las concentraciones de tritio deben ser rebajadas en un tanto por ciento comprendido entre el 15% y el 25%, si bien esta reducción no debería aplicarse para los puntos situados en la costa catalana, donde el modelo de Madrid es razonablemente válido.

Los datos contenidos en la figura 9B llevan de forma inequívoca a las siguientes afirmaciones:

- 1) Un contenido de tritio igual a cero indica que la muestra de agua no contiene contribución alguna significativa de precipitaciones posteriores al año 1953. En este caso, el tritio es la única herramienta que tiene el hidrólogo para hacer esta afirmación de una forma fehaciente.
- 2) Un contenido de tritio próximo a 4 UT en una muestra tomada en 2006 indica que lo más probable es que se trate de agua procedente en su totalidad de las precipitaciones posteriores al año 1982. La posibilidad de que esta concentración provenga del mezclado de aguas anteriores y posteriores a 1953 es muy remota.

Obviamente, si se trata de una estación costera, este valor se rebajaría a unas 3 UT y, de la misma forma, para muestras tomadas en años próximos, la afirmación anterior sería válida para concentraciones corregidas por la desintegración radiactiva del tritio con referencia al año en que se realiza el muestreo.

- 3) Una concentración de tritio superior a unas 4 UT indica la presencia de agua procedente de precipitaciones ocurridas durante el período 1958 a 1982. Por supuesto, la máxima concentración de tritio que puede esperarse en una muestra de agua subterránea sería teóricamente de 124,2 UT, según los datos de la tabla 2 si procede en su totalidad de precipitaciones del año 1963. Pero, debido a los procesos de mezclado que ocurren en los acuíferos, difícilmente se encontrarán en muestras de aguas subterráneas de la Península concentraciones mayores de unas 20 UT. Un caso excepcional se tiene en zonas regadas con aguas procedentes del río Tajo, incluyendo el agua del transvase Tajo-Segura. Debido a los vertidos producidos por la Central Nuclear de Trillo, las aguas del río Tajo llegan a tener concentraciones medias superiores a unas 200 UT. Este tritio llega hasta las zonas del Levante español (Valencia y Murcia), si bien con concentraciones algo inferiores debido al mezclado con aguas de otros orígenes (entre 40 y 70 UT).

- 4) Concentraciones de tritio inferiores a unas 4 UT en el interior de la Península y a unas 3 UT en zonas costeras indican que se trata de una mezcla de agua procedente de precipitaciones anteriores y posteriores al año 1953. Es importante observar que esta mezcla se produce frecuentemente cuando se extrae agua por bombeo de un acuífero heterogéneo o estratificado o multicapa. En este caso, los niveles permeables superiores pueden contener aguas modernas con tritio termocéntrico y esta agua se mezcla con aguas más profundas exentas de tritio. Se tienen así muestras de agua con concentraciones de tritio significativas (por ejemplo, comprendidas entre 0,2 y 2 UT) que cuando se analizan para el carbono-14 pueden dar edades elevadas (por ejemplo, de miles de años), sin que la presencia del tritio represente contradicción alguna. En el caso de dos acuíferos superpuestos separados por un estrato impermeable, es posible determinar basándose en el contenido de tritio la fracción de agua extraída por bombeo que procede de cada uno de ellos. En efecto, si llamamos C_1 a la concentración de tritio en el acuífero superior, C_2 a la misma para el acuífero inferior y C_m a la medida en el agua extraída del pozo, la fracción de agua f aportada por el primero de estos acuíferos se obtiene a través de la ecuación siguiente:

$$C_1 \cdot f + C_2(1-f) = C_m$$

Si la concentración de tritio en el acuífero profundo es cero, como sucede con frecuencia cuando se trata de un acuífero confinado, la fracción f equivale a la relación C_1/C_m .

4.2. MODELO EXPONENCIAL O DE MEZCLA TOTAL

Se trata de un modelo interpretativo que se utiliza con frecuencia para determinar la renovación del agua subterránea en acuíferos de rocas carstificadas o fracturadas (Plata, 1990). El modelo supone que el agua que se infiltra en una determinada celda del acuífero se mezcla de forma muy rá-

pida (en teoría de forma instantánea) con el agua previamente existente en la misma. Después de producirse el mezclado completo, se produce la salida o descarga de la misma cantidad de agua que se había infiltrado, de forma que el volumen V de la celda se mantiene constante. La función de entrada de tritio en esta celda del acuífero $C_0(t)$ corresponde a los valores mostrados en la tabla 2 (valores no corregidos). Llamando $C(t)$ a la función de salida y Q al caudal de entrada y salida, es decir a la recarga, se cumple:

$$Q(C_0(t) - QC(t) - \lambda VC(t)) = V dC(t)/dt$$

Entrada - Salida - Desintegración = Cambio de concentración

El término λ es la constante de desintegración del tritio, cuyo valor es 0,0562 años⁻¹. Reagrupando los términos de la ecuación anterior y definiendo el tiempo de renovación τ como la relación V/Q , se tiene:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C_0(t) - (1 + \lambda\tau) C(t)}{\tau}$$

La solución de esta ecuación es la siguiente:

$$C(t) = \frac{1}{\tau} \int_{1953}^t C_0(t') \exp\left[-\frac{1 + \lambda\tau}{\tau}(t - t')\right] dt' \quad (1)$$

Donde t corresponde al año en que se toman las muestras de agua y t' cada uno de los años en que se ha producido la entrada de tritio a partir de 1953. Por tanto, la diferencia $t-t'$ equivale al tiempo transcurrido desde cada uno de estos años hasta el año del muestreo. La ecuación se resuelve de una forma discreta como un sumatorio cuyos términos representan la entrada de tritio desde el año 1953 con las concentraciones indicadas en la tabla 6. Para ello, se fija un valor de τ , por ejemplo, de 2 años y se calcula la concentración $C(t)$ que tendría el agua del acuífero. El cálculo se repite para diferentes valores de τ , aceptándose como valor válido de este parámetro el valor que mejor se ajusta a la concentración de tritio medida experimentalmente. La medida puede realizarse en una muestra tomada de un pozo o en un manantial de descarga del acuífero. El tiempo de renovación permite determinar la recarga si se conoce el espesor de la lámina de agua del acuífero o el caudal total de descarga del mismo.

La figura 11 muestra los valores de $C(t)$ calculados para los años 2006, 2010, 2015, 2020 y 2030. En el primer caso se han utilizado directamente los valores de concentración no corregidos de la tabla 2, suponiendo una concentración igual a 5,5 UT para los años 2004 y 2005. Las curvas para los cuatro años siguientes se han calculado suponiendo una concentración de tritio de 5,5 UT hasta el año 2007, de 5,2 UT hasta el año 2013 y de 5 UT para los años siguientes. La forma de campana de estas curvas se explica por el hecho de que el modelo de tritio tiene esta misma forma. Según la curva válida para 2006, la máxima concentración de tritio que podría encontrarse dentro del acuífero sería de unas 7,5 UT. La forma de campana indica para esta curva que una concentración comprendida entre unas 5 UT y 7,5 UT puede corresponder a dos tiempos distintos de renovación. La decisión de cual de estos tiempos es el válido tiene que realizarse basándose en las estimaciones de la recarga realizadas por los métodos convencionales. En la mayor parte de los casos, uno de los dos valores resulta absurdo y puede, por tanto, rechazarse. Las curvas de la figura 11 muestran que sólo a partir del año 2030 el efecto del tritio procedente de los ensayos nucleares dejará de ser perceptible.

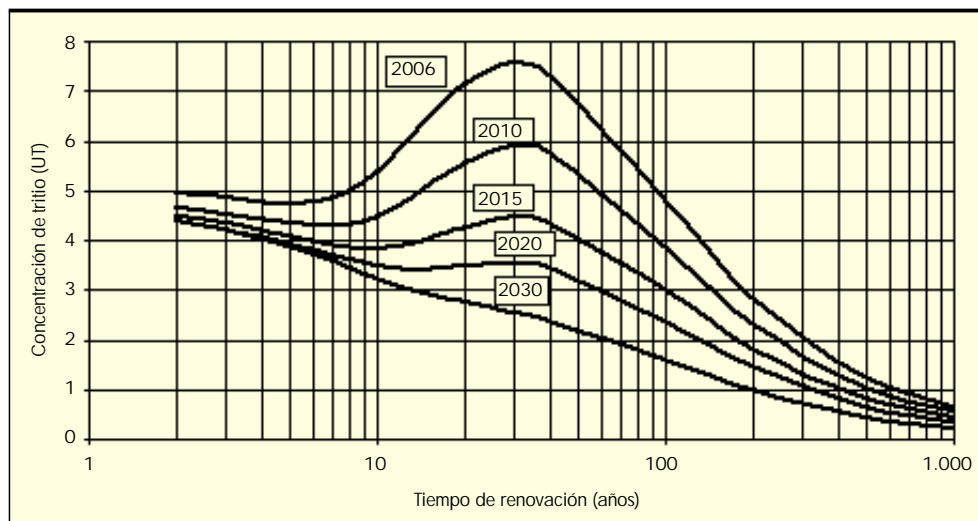


FIGURA 11. Variación de la concentración de tritio en función del tiempo de renovación en un acuífero cárstico o de rocas fracturadas situado en la Península Ibérica según el modelo exponencial de renovación para diferentes años.

El modelo ha sido aplicado por el autor en cuatro acuíferos cársticos situados, respectivamente en Brasil (Plata, et al., 1981), Jamaica, República Dominicana y España (acuífero del Campo de Montiel) (Plata et al., 1995) con un total de 369 muestras de agua analizadas. De estas muestras sólo seis de ellas dieron una concentración de tritio ligeramente superior al máximo de concentración indicado por las curvas del tipo representado en la figura 11 calculadas al efecto. Esto, por sí sólo, sugiere que el modelo de mezcla total funciona de forma correcta para este tipo de acuíferos. Sin embargo, en el caso del acuífero cárstico de Campo de Montiel, se realizaron muestreos para tritio en los años 1971, 1972, 1973, 1974, y 1991. Los resultados obtenidos indicaron que los tiempos de renovación obtenidos con el modelo aumentaron con el tiempo entre 21 años para 1971 y unos 42 años para 1991. Esta diferencia se explica por las pérdidas de tritio que se producen dentro del acuífero por incorporación de una fracción del agua infiltrada en la porosidad primaria de la roca. Esta fracción de agua queda atrapada en la roca durante períodos de tiempo muy largos, lo cual no ocurre con el agua que circula por los canales de disolución o por las fracturas abiertas, donde los flujos son muy rápidos. En el caso de este acuífero, los resultados dieron un valor concordante entre sí para los diferentes muestreos suponiendo unas pérdidas de tritio iguales al 12% anual. El tiempo de renovación medio obtenido ascendió a 20,8 años. El cociente entre el espesor medio de la lámina de agua, estimado en 2,5 metros, y este tiempo de renovación proporciona un valor de la recarga igual a 120 mm/año, que resulta aceptable para el acuífero estudiado. El modelo se aplicó a través de una hoja de cálculo EXCEL, que permitía además tener en cuenta las pérdidas de agua y, por tanto, de tritio producidas durante cada año como consecuencia de la extracción de agua por bombeo, así como ponderar la recarga en función de la precipitación anual media a través de un factor de recarga. Para mayor información sobre este tema se remite al lector a la referencia Plata (1995).

4.3. DETERMINACIÓN DE LA RECARGA A PARTIR DEL INVENTARIO DE TRITIO

El método se basa en la comparación del inventario de tritio medido en el acuífero ($IT)_A$ con el inventario en las precipitaciones de la zona acaecidas entre 1953 y el momento ac-

tual ($IT)_P$, ambos expresados en Becquerelios por metro cuadrado (Bq/m^2). La relación entre ambos inventarios equivale a la fracción de tritio infiltrada de agua en el acuífero y el producto de esta fracción por la precipitación total de la zona proporciona la recarga, es decir:

$$R_{1953-t} = P_{1953-t} \frac{(IT)_A}{(IT)_P} \quad (2)$$

Donde R_{1953-t} y P_{1953-t} son, respectivamente, la recarga y la precipitación totales producidas entre el año 1953 y el año en que se realiza el muestreo. El inventario de tritio en el acuífero se compone de dos sumandos, que corresponden, respectivamente, a la zona no saturada ($IT)_{NS}$ y a la zona saturada ($IT)_{S}$. Estos vienen dados por las siguientes expresiones:

$$(IT)_{NS} = \int_0^{NF} H_V(h) C(h) dh \quad (3)$$

$$(IT)_S = \int_{NF}^F p(h) C(h) dh \quad (4)$$

Donde NF representa al nivel freático, F al fondo del acuífero, $H_V(h)$ es la ley de variación de la humedad volumétrica con la profundidad y $p(h)$ la ley de variación de la porosidad con la profundidad.

El inventario de tritio en las precipitaciones de la zona se obtiene por la expresión siguiente:

$$(IT)_P = \int_{1953}^t P(t) C_0(t) dt \quad (5)$$

Donde $P(t)$ es la variación de la precipitación media entre 1953 y el año actual y $C_0(t)$ es la variación de la concentración de tritio durante el mismo período (se utilizan los valores corregidos por desintegración radiactiva de la tabla 2). La expresión integral puede substituirse por un sumatorio de los productos $P \times C$ para todo el período comprendido entre 1953 y t .

La determinación experimental del inventario ($IT)_S$ es, en la práctica, muy difícil de llevar a cabo, porque ello exige la extracción de muestras de agua a diferentes profundidades del acuífero, lo cual no es posible cuando dentro del pozo existe un mezclado vertical del agua debido a la existencia de flujos verticales o, simplemente, a procesos de difusión. Para salvar este obstáculo, el autor del presente trabajo ha recu-

rrido a una aproximación basada en el hecho de que el agua extraída del pozo por bombeo representa una mezcla de todos los estratos o niveles permeables interceptados en proporción a sus transmisibilidades respectivas. El inventario $(IT)_S$ se obtiene multiplicando la concentración de tritio medida en el agua extraída, expresada en Bq/l, por el espesor de la lámina de agua, expresado en l/m². Este espesor se obtiene multiplicando el espesor de la columna de agua atravesada por el pozo por la porosidad media estimada a partir de los datos litológicos. Si el pozo intercepta estratos u horizontes impermeables, por ejemplo, estratos de arcilla o de roca consolidada no fracturada, el espesor de los mismos debe ser deducido del espesor total interceptado por el pozo.

De la misma forma, la determinación experimental del inventario $(IT)_{NS}$ es también engorrosa de determinar. Ello exige el análisis de la concentración de tritio en la humedad de muestras del terreno extraídas mediante perforación en seco a lo largo de perfiles de la zona no saturada. El tritio se mide en el agua extraída de estas muestras por evaporación al vacío. Si no se realiza este muestreo, pueden utilizarse dos aproximaciones más o menos extremas. La primera consiste en suponer que la zona no saturada contiene exclusivamente aguas modernas procedentes de las precipitaciones posteriores al año 1982, que, como se ha indicado en el apartado 4.1, han tenido una concentración media próxima a 4 UT (472 Bq/m³). El valor de $(IT)_{NS}$ se obtiene entonces multiplicando esta concentración por el espesor de la lámina de agua, expresado en metros, obtenido, a su vez, multiplicando el espesor de la zona no saturada por la humedad volumétrica expresada como fracción de la unidad (por ejemplo, 0,20, equivalente a un 20%). Esta aproximación puede ser aceptable cuando la concentración de tritio en la zona saturada es, relativamente, alta, indicando que las precipitaciones del año 1953 han penetrado hasta los niveles superiores de esta zona. Pero, si la concentración de tritio en la zona saturada es nula o casi nula, puede admitirse que la recarga local es inexistente o muy baja y que, entonces, la

concentración de tritio en la zona no saturada puede ser asimismo nula o, al menos, muy inferior a las 4 UT correspondientes a las precipitaciones posteriores a 1982. Lógicamente, la permeabilidad de los materiales de la zona no saturada debe utilizarse como criterio fundamental para la estimación de esta concentración de tritio. En el caso de materiales muy permeables, la tasa de infiltración puede ascender a varios metros por año, mientras que en materiales muy poco permeables puede ser, por ejemplo, 100 más baja. Es obvio que también deben jugar un papel importante en esta estimación el espesor de la zona no saturada y la relación entre los espesores de ambas zonas.

El método ha sido aplicado por el autor en dos estudios realizados, respectivamente, en el acuífero de Raigón, situado en Uruguay cerca de Montevideo (Plata et al., 2003c) y en el acuífero de Los Arenales situado en el sector meridional de la depresión tectónica del río Duero (Plata et al., 1998 y Plata y Araguás, 2003b). En el primer caso, los resultados indicaron que la recarga del acuífero era alrededor de la cuarta parte de la recarga deducida por los métodos clásicos o convencionales. Estos indicaban que el agua del acuífero se renovaba del todo cada 6,8 años, según lo cual el acuífero debería contener una concentración de tritio próxima a 3 UT, que era la concentración media de los últimos años. En cambio, la mayoría de las muestras analizadas tenían concentraciones comprendidas entre 0 y 2 UT. La explicación de ello era la existencia de una extensa capa de loess que dificultaba la infiltración del agua. En el caso del acuífero de Los Arenales, la mayor contribución del estudio fue la identificación de las zonas con una recarga preferente y de las zonas con recarga despreciable. La figura 12 muestra la distribución de la recarga obtenida con esta técnica. Se demostró que el 96% de la recarga ocurre en el 43% de la zona y que la recarga es despreciable o nula en el 54% de la zona. A pesar de las imprecisiones del método, la recarga media obtenida (32 mm/año) resultó coherente con los valores obtenidos por métodos convencionales.

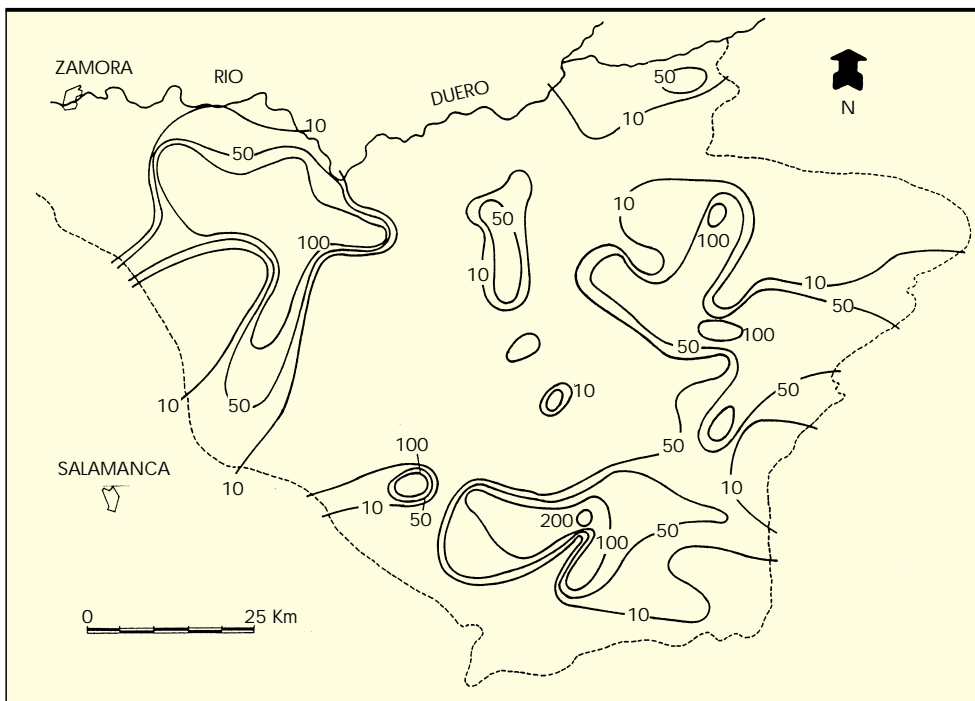


FIGURA 12. Distribución de la recarga obtenida a partir del inventario de tritio en el acuífero de Los Arenales.

4.4. PERFILES DE TRITIO EN LA ZONA SATURADA

La medida de perfiles de tritio natural en la zona saturada es una técnica que ha sido utilizada para determinar la recarga en acuíferos someros de materiales granulares de libre recarga. El método se basa en la determinación de la profundidad a la cual se encuentra la interfase que separa las aguas con tritio del período termonuclear, es decir, las aguas infiltradas con posterioridad al año 1953, y las aguas sin tritio del período anterior. La recarga R del acuífero dentro de la zona del estudio se calcula por medio de la ecuación siguiente (Vogel, 1967; Andres y Egger, 1985):

$$R = (p \cdot h) / t \quad (6)$$

Donde p es la porosidad expresada como fracción de la unidad, h es la profundidad a la cual termina la presencia de tritio termonuclear medida desde el nivel freático y t es el tiempo transcurrido entre el año 1953 y el año actual.

Si el nivel freático se encuentra a corta distancia de la superficie, el tiempo de residencia del agua en la zona no saturada resulta despreciable comparado con el tiempo transcurrido desde el año 1953. Si no es así, dicho tiempo de residencia puede ser determinado o estimado y descontado del valor de t en la ecuación (6). El método exige la medida de la concentración de tritio en muestras de agua tomadas a diferentes profundidades. Estas muestras pueden tomarse durante la perforación de los sondeos o bien, en el caso de sondeos ya terminados, bombeando agua a diferentes profundidades, preferentemente, aislando con obturadores ("packers") los tramos de los que se extrae el agua. Obviamente, estos tramos deben corresponder a los tramos donde se encuentran situadas las rejillas del sondeo. Para obtener resultados satisfactorios, este perfilado debe realizarse en un número elevado de sondeos, de forma que sea posible establecer con precisión la superficie del acuífero que separa a ambos tipos de aguas, es decir, las aguas anteriores y posteriores al año 1953.

El método, tal como se ha descrito, supone que el descenso del agua infiltrada en el acuífero se produce según un modelo de tipo pistón. Sin embargo, en la práctica debe tenerse en cuenta el efecto de la dispersión hidrodinámica, el cual introduce un error por exceso en el valor obtenido para la recarga: el proceso dispersivo hace que el agua con tritio penetre en el acuífero hasta profundidades algo mayores que si se tratara de un flujo de pistón. El efecto de este proceso dispersivo puede analizarse por medio de la ecuación de transporte dispersión monodimensional:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t}; \quad D = D^* + \alpha v. \quad (7)$$

Donde x es la distancia de desplazamiento del agua en sentido vertical descendente durante el tiempo t , v la velocidad lineal del flujo subterráneo en la dirección x , C la concentración de tritio que entra en el acuífero, λ la constante de desintegración del tritio y D el coeficiente de difusión del tritio y α el coeficiente de dispersión intrínseco del acuífero, que depende de la litología y textura de los materiales del mismo. El proceso de simulación ha sido descrito por Javandel et al. 1984, utilizando un programa de ordenador creado al respecto. Aplicaciones del método a estudios concretos han sido reportadas por Andres y Egger, 1985, Herweijer et al. (1985), Delcore y Larson, 1987 y Larson et al. 1987.

4.5. PERFILES DE TRITIO EN LA ZONA NO SATURADA

En numerosos acuíferos sucede que el tritio de origen termonuclear de las precipitaciones posteriores al año 1953 no ha alcanzado todavía el nivel freático o piezométrico, bien debido a que la zona no saturada tiene un espesor muy elevado, bien como consecuencia de la baja permeabilidad de los materiales de esta zona o a bien por a una combinación de ambas causas. En estos casos, los perfiles de tritio medidos en la zona no saturada permiten la medida directa de la infiltración. Obviamente, los perfiles que pueden esperarse en estos casos son similares al representado en la figura 9B, substituyendo los valores de tiempo del eje de abscisas por valores de profundidad. La tasa de infiltración se determina a través de la identificación en el perfil del pico de tritio correspondiente al año 1963 o bien de la profundidad para la cual la concentración se hace nula, la cual correspondería, obviamente, a las precipitaciones del año 1953. Estos datos, junto con el perfil de humedad del terreno, proporcionan la tasa de infiltración o recarga R a través de la ecuación siguiente:

$$R = \frac{1}{t} \int_0^h H_V(h) dh \quad (8)$$

Donde h es la profundidad a la cual se encuentra el pico de 1963 o el frente de penetración de 1953, t es el tiempo transcurrido entre uno de estos años y el año actual y $H_V(h)$ representa el perfil de humedad volumétrica expresado como fracción de la unidad.

Como es obvio, la técnica exige la medida de perfiles de tritio en la humedad asociada a los materiales del terreno dentro de esta zona no saturada. Para ello se extraen testigos inalterados utilizando una máquina que perfora en seco. El agua de estos testigos se extrae por destilación en vacío a una temperatura de unos 110°C y se recoge en una trampa enfriada con nitrógeno líquido o nieve carbónica. La cantidad de agua extraída por unidad de volumen del testigo proporciona, además, la humedad volumétrica del tramo estudiado.

Un ejemplo de este ensayo se muestra en la figura 13 y corresponde al perfil obtenido en el emplazamiento previsto para un vertedero de residuos industriales que se proyectaba construir en el término municipal de Medina del Campo (Valladolid). La zona no saturada estaba formada por gravas y arenas polimétricas hasta unos 7 metros de profundidad y por una alternancia de arenas finas muy compactas y arcillas de edad terciaria para profundidades mayores. El nivel piezométrico se encontraba a unos 80 metros de profundidad. La forma del perfil de la figura indica de forma inequívoca que el pico de concentración de tritio que se localiza a unos 15 metros de profundidad tiene que corresponder al pico de las precipitaciones correspondiente al año 1963. Sin embargo, en este caso, para el cálculo de la tasa de infiltración, resulta más preciso utilizar el frente inferior del perfil de tritio, que se ubica a una profundidad de unos 22 metros y que corresponde a las precipitaciones del año 1953. Por tanto, puede decirse que toda el agua contenida en el terreno por encima de esta profundidad se debe a la recarga producida desde el año 1953 hasta el año 2001, fecha en que se realizó el ensayo, es decir, durante un período igual a 48 años. Los datos obtenidos para la humedad volumétrica entre la superficie del terreno y 22 metros de profundidad proporcionaron un espesor de lámina de agua de 4,38 metros. La recarga anual media se obtiene dividiendo este espesor por el período de 48 años, dando un valor de 91,2 mm/año, el cual representa el 19% de la precipitación media de la zona. La alta permeabilidad de los materiales superficiales se consideró responsable de la elevada tasa de recarga.

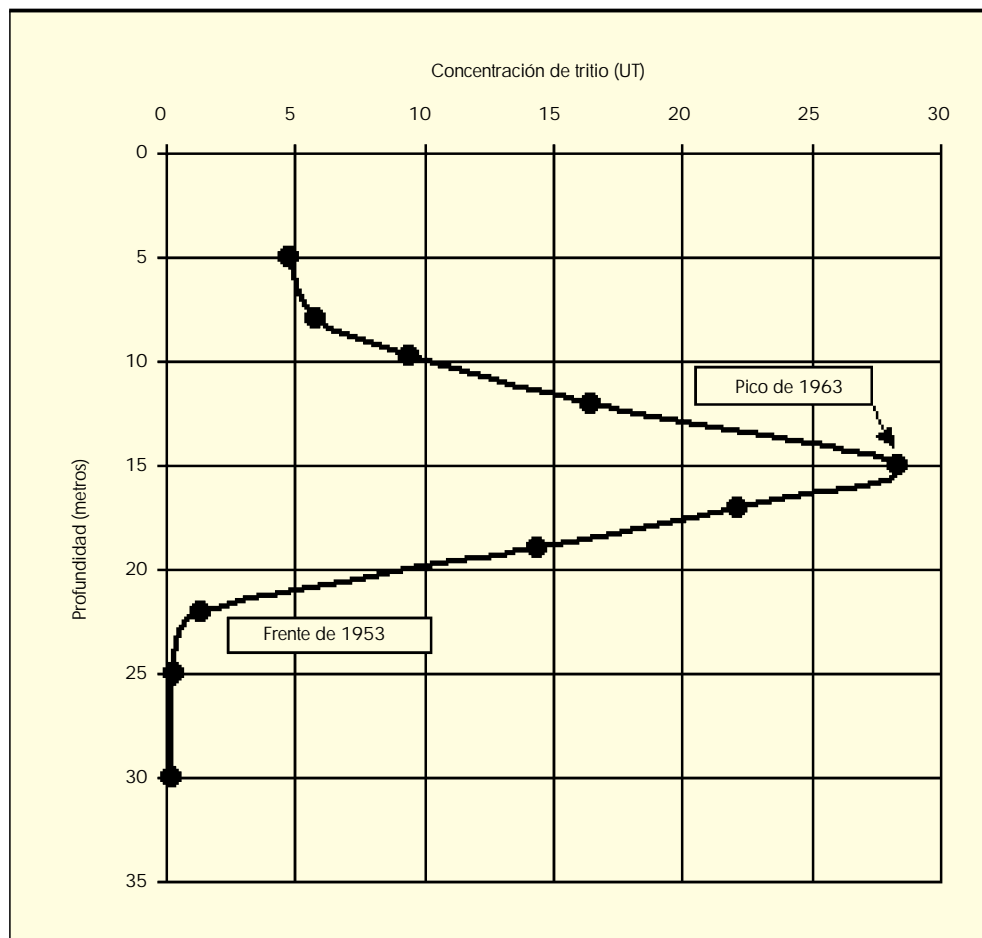


FIGURA 13. Perfil de tritio natural obtenido en la zona del emplazamiento de un vertedero de residuos situado en el término municipal de Medina del Campo, Valladolid.

4.6. RELACIÓN ENTRE RÍOS Y ACUÍFEROS

El tritio, junto con los isótopos estables del agua deuterio y oxígeno-18 y la composición química del agua, es una herramienta de gran valor para estudiar la contribución de los ríos a la recarga de acuíferos. Los isótopos estables basan su potencial a este respecto, principalmente, en el hecho de que las aguas de los ríos proceden de zonas lejanas a donde se encuentra el acuífero y por ello suelen tener una composición isotópica diferente a la de las precipitaciones locales, sobre todo si las aguas proceden de cotas elevadas de la cuenca (efecto de altitud). Asimismo, la evaporación del agua en su recorrido por la superficie modifica la composición isotópica y contribuye de esta manera a la diferenciación del agua del río con respecto a las precipitaciones locales. El tritio por su parte proporciona una información inequívoca sobre la presencia en el acuífero de aguas infiltradas con posterioridad al año 1953 y, si se trata de un acuífero que contiene aguas infiltradas con anterioridad a este año, el tritio puede proporcionar datos cuantitativos o semicuantitativos de la contribución del río a la recarga. Es importante mencionar que, tanto el tritio, como los isótopos estables, se encuentran incorporados en la propia molécula de agua, debido a lo cual su comportamiento dentro del acuífero puede considerarse conservativo en contraposición con los componentes químicos disueltos en el agua. Dos casos de estudio sobre la contribución del tritio en el estudio de la recarga de acuíferos por ríos han sido publicados por el autor en esta misma revista (Plata, 2001 y Plata, 2003a).

5. CONCLUSIONES

En el momento presente, la atmósfera terrestre se encuentra casi exenta de tritio procedente de los ensayos nucleares realizados, principalmente, durante las décadas de los años 50 y 60. El tritio contenido en las precipitaciones de los últimos años procede de causas naturales y de tipo tecnológico, debido a lo cual es de esperar que las concentraciones medias anuales que se han detectado durante los últimos años se mantengan en valores similares en años venideros. En las regiones interiores de la Península Ibérica, las concentraciones de tritio en las precipitaciones medias anuales de los últimos 10 años han tenido valores próximos a 6 UT. Si estos valores se corrigen por desintegración radiactiva, se observa que las concentraciones se han mantenido casi constantes desde el año 1982 con un valor medio igual a 4,1 UT. En zonas costeras, estos valores han sido inferiores a los indicados en un 15 ó 20%, lo cual no ha ocurrido en las zonas costeras de Cataluña, donde los valores se han mantenido, aproximadamente, iguales a los indicados. En zonas costeras del Hemisferio Norte situadas a latitudes medias y altas, las concentraciones de tritio en las precipitaciones de los últimos 20 años han sido similares a las indicadas para las regiones interiores de la Península Ibérica. Sin embargo, en regiones con un alto grado de continentalidad, los valores han alcanzado valores superiores al doble de los indicados. En latitudes del Hemisferio Norte por debajo de 20°N y en todo el Hemisferio Sur, las concentraciones medias para años recientes oscilan entre, aproximadamente, 1,5 UT para

estaciones costeras e islas y algo más de 3 UT para estaciones continentales y estaciones costeras de altas latitudes.

Los datos anteriores permiten afirmar que el tritio seguirá siendo por tiempo indefinido una herramienta importante para la investigación hidrológica, principalmente, en lo que se refiere a las aguas subterráneas. Debe tenerse en cuenta a este respecto que los métodos analíticos disponibles en la actualidad permiten la medida de concentraciones inferiores a 1 UT con un error estadístico comprendido entre 0,1 y 0,2 UT. Las aplicaciones típicas del tritio incluyen: a) identificación inequívoca de la recarga posterior al año 1953; b) identificación de aguas subterráneas procedentes de precipitaciones posteriores al año 1985; c) identificación de acuíferos confinados en base a la ausencia de tritio; d) determinación o estimación del tiempo de renovación del agua en acuíferos de rocas consolidadas carstificadas o fracturadas; e) identificación de zonas de recarga preferencial en acuíferos libres; f) determinación o estimación de la recarga de acuíferos libres a partir del balance de tritio y de la medida de perfiles de este radionucléido, tanto en la zona saturada, como en la zona no saturada, y g) estudio de la contribución de ríos a la recarga de acuíferos.

6. REFERENCIAS

- ANDRES, G.; EGGER, R., (1985): *A new tritium interface method for determining the recharge rate of deep groundwater in the Bavarian Molasse Basin*. J. Hydrol., 82, 27-38.
- LUCAS, L.L.; UNTERWERGER, M.P., (2000): *Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium*. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 105, 541, 2000.
- IAEA (1992). *Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation 2nd ed*. Technical Report Series No. 331. IAEA, Vienna. 784 p.
- LARSON, G.J.; DELCORE, M.R.; OFFER, S., (1987): *Application of the tritium interface method for determining recharges rates to unconfined drift aquifers. II. Non-Homogeneous case*. J. Hydrol., 91. 59-72.
- HERBERT, D., (1990): *Technogenic Tritium in Central European Precipitations*. Isotopenpraxis 26 (1990) 12, pp. 592-595.
- HERVWEIJER, J.C.; VAN LUIJN; APPELO, C.A.J. (1985): *Calibration of a mass transport model using environmental tritium*. J. Hydrol., 78, 1-17.
- JAVANDEL, I.; DOUGHTY, C.; TSANG, C.F. (1984): *Groundwater Transport: Handbook of mathematical models*. Am. Geophys. Union, Washington, D.C., Water Resour. Monogr. Ser., 10, 228 pp.
- DELCORE, M.R.; LARSON, G.J. (1987): *Application of the tritium interface method for determining recharges rates to unconfined drift aquifers. I. Homogeneous case*. J. Hydrol., 91. 59-72.
- PLATA, A.; BAONZA, E.; BRAZ, A., (1981): *Estudio isotópico de un acuífero cárstico en Minas Gerais (Brasil)*, (Proc. Interamerican Symp. on Isotope Hydrology, Bogotá, Colombia, Aug. 1980) IAN, Bogotá, 1981, pp.337-357.
- PLATA, A., (1990): *Parameters of carbonate rock aquifers from tracer methods*, (Proc. Int. Symp. and Field Seminar, AHS, AISH Hacettepe University on Hydrogeological Processes in Karst Terranes, Antalya, Turkey, Oct. 1990) Hydrogeological Processes in Karst Terranes, G. Günay, A.I. Johnson and W. Back, Eds., IAHS Publication No. 207, 1990, pp. 361-380.
- PLATA, A.; PÉREZ ZABALETA, E.; DÍAZ TEIXIRA, M.F.; LUNA RODRIGUEZ, E.; DELGADO VELASCO, C., (1995): *Tiempo de renovación del agua en el acuífero cárstico de Campo de Montiel obtenido a partir del tritio de origen termónuclear*, VI Congreso de Geoquímica de España, 18-22 Octubre 1995, Soria, España.
- PLATA, A., (2001): *Hidrología Isotópica e Hidroquímica de la región Caprivi Oriental, Namibia*. Ingeniería Civil, número 122/2001, pág. 109-118.
- PLATA, A., (2003a): *Hidrología isotópica del acuífero aluvial Valle de Sébaco, Nicaragua*. Ingeniería Civil, número 129/2003, pág. 125-133.
- PLATA, A.; ARAGUAS, L. (2003b): *Evaluation of modern recharge in the Arenales detritic aquifer, central Spain*. International Symposium on Isotope Hydrology and Integrated Water Resources Management, Vienna, Austria, 19-23 May 2003, 89/1500-1520, 2003.
- PLATA, A.; DELLEPERE, A.; ROMA, M.T.; GARAT, S. (2003c): *Determinación de la recarga del acuífero Raigón (Uruguay) a partir del tritio natural*. Ingeniería Civil, número 132/2003, pág. 127-138.
- VOGEL, J.C., (1967): *Investigation of ground water flow with radiocarbon*. In: Isotopes in Hydrology, IAEA, Vienna, pp 355-368.