

CALCULO DE RECARGA DE ACUIFEROS POR MEDIO DEL TRITIO

por el Ing^o. Héctor R. Gomez

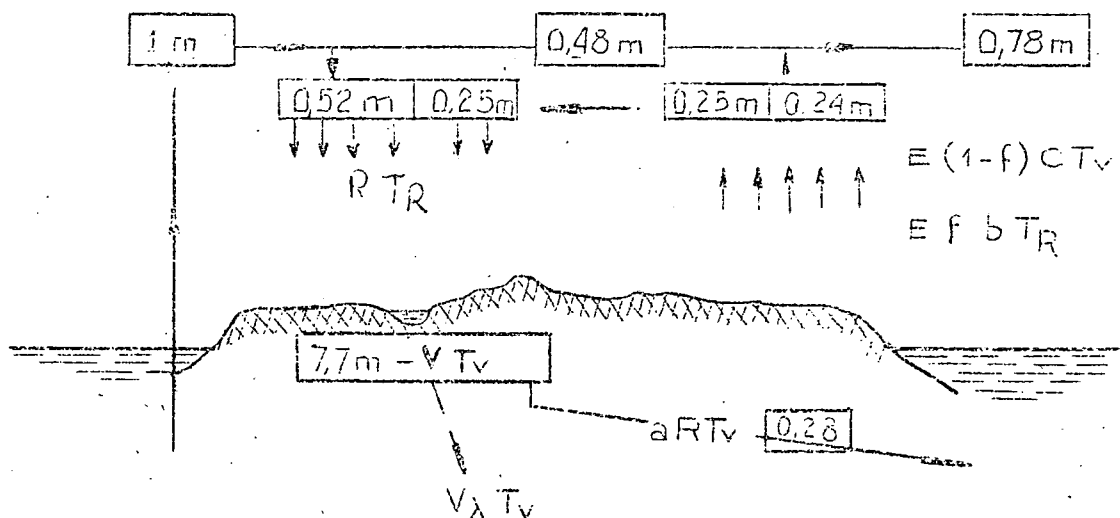
1.1. La diferencia de concentración de T en las aguas de lluvia y subterráneas permite atribuir a éstas últimas una "edad aparente" debido al decaimiento del T al aislarse éste parcialmente del ciclo exterior.-

Cuando la concentración de T es menor de 1 UT puede hablarse de aguas de más de 30 años. Concentraciones de 1 a 10 UT se hallan en aguas anteriores a las explosiones nucleares y altas concentraciones pertenecen ya a aguas posteriores a 1956.-

Este criterio es válido para algunas regiones del hemisferio norte. En nuestro hemisferio las concentraciones son menores.-

Para estimar recarga y volumen de acuíferos se realizaron en el valle del Misisipi evaluaciones midiendo las concentraciones de T en agua de lluvia, ríos, acuíferos. El trabajo se realizó en 1955 aprovechando los altos índices de T en aguas de lluvia posteriores a la operación Castle (3) (4) (9).-

El balance de agua obtenido se representa en la fig.1



El balance de esta extensa área se realiza a partir de la siguiente expresión.-

$$\frac{V}{R} \frac{dT_v}{dt} = (R - Efb) T_{LL} - \left[E(1-f) + \lambda V + aR \right] T_v \quad (1)$$

donde

- T_v - concentración de T en el acuífero
- T_{LL} - concentración de T en aguas de lluvia
- R - lluvias por unidad de área
- E - evaporación
- bc - factores de evaporación
- f - factor debido a deficiente mezcla
- a - fracción de desagüe
- λ - constante de desintegración
- V - volumen de acuífero por unidad de área.

En medios de alta permeabilidad, rápido mezclado con áreas definidas de recarga y drenaje, es posible simplificar la expresión anterior y llegar a la siguiente.

$$R' T_v = R' T_{LL} - \lambda V T_v$$

$$\lambda V T_v = R' T_{LL} - R' T_v \quad (2)$$

$$\frac{V}{R'} = \frac{T_{LL} - T_v}{\lambda T_v} \quad (3)$$

En la fórmula (2) vemos que la diferencia entre la concentración de T en la entrada ($R' T_{LL}$ área de recarga) y salida ($R' T_v$ área de salida) es igual a la concentración perdida por el decaimiento de T en el lapso de la experiencia.

El balance de aguas representado en la fig.1 es el primer intento de evaluación de acuíferos con miras a un balance continental. Con los mismos datos, aunque con hipótesis de circulación distintas, otro grupo de expertos (7) llegó a resultados que difieren considerablemente.-

Evidentemente es fundamental importancia el conocimiento litogeológico de las zonas en estudio para poder aplicar-

el método.-

Sin embargo, a pesar de estas discrepancias, es, precisamente en el balance de grandes áreas - con vistas al mejor conocimiento del ciclo hidrológico mundial - donde el método a de manifestar sus amplias posibilidades.-

1.2.- Recarga de acuíferos en áreas reducidas.-

En regiones con características hidrológicas y meteorológicas bien conocidas, suelos de alta permeabilidad y lluvia intensas en lapsos de pocos meses (8) es posible evaluar la recarga durante la época de lluvias midiendo:

- a) El contenido de tritio en aguas pluviales durante la temporada de lluvias.
- b) El contenido de tritio en muestras del acuífero antes de la temporada de lluvia (T_A).-
- c) El contenido de tritio en muestras del acuífero estratégicamente elegidas, durante la temporada de lluvias (T_B)-
- d) El contenido de tritio (T_C) al final de la temporada de lluvia.-

Con estos datos se construyen las isocurvas de igual precipitación y las isocurvas de igual concentración de T en las diversas etapas de la temporada.-

La recarga (V_i) se calcula a partir del volumen llovido (V_{LL}) sobre el área estudiada.-

$$V_i = V_{LL} \frac{(T_A - T_B - T_C)}{T_{LL}} = V_{LL} \cdot \bar{T}$$

El gasto G_{LL} de infiltración correspondiente al tiempo de lluvia será:

$$G_{LL} = \frac{V_i}{t}$$

El volumen medio infiltrado:

$$V_{mi} = A \bar{P} \bar{T}$$

donde:

A : área de infiltración

\bar{P} : lluvia media

V_{mi} : volumen medio de infiltración anual

En base a estos valores es factible evaluar, además, la dirección del flujo de aguas subterráneas y el gasto anual con fin de riego o suministro de agua a poblaciones.-

Los volúmenes calculados por ambos métodos son generalmente volúmenes mínimos de infiltración pues no hay corrección por decaimiento y se supone una mezcla completa en todos los niveles.-

APENDICE

TRAZADORES RADIACTIVOS

2.- Introducción.-

Numerosos problemas de hidrología e ingeniería sanitaria han sido solucionados con el aporte de los radioisótopos. El uso de trazadores radiactivos en aguas superficiales y subterráneas se han generalizado en la última década desplazando unas veces a las técnicas clásicas o complementándolas con el fin de obtener una mejor información y abordar así problemas sin solución con otros métodos.-

Hasta el presente, no obstante la probada eficiencia de las técnicas desarrolladas, sólo una pequeña fracción de estos métodos se han incorporado al control rutinario o sistemático de aguas subterráneas o superficiales. Esta inercia reside quizá en la escasa comunicación que existe entre las diversas ramas de la ingeniería y los técnicos profesionales encargados de difundir, aplicar y desarrollar métodos radiactivos a estas disciplinas.-

En nuestro país se realizaron en 1961, trabajos de medición de caudales en ríos de mediano caudal. Se usó ^{198}Au como trazador y en la detección se empleó una sonda con cuatro detectores tipo G.M. asociada a escalímetro transistorizado y portátil.-

El método usado (1) es instrumental, es particularmente apto para medir caudales intermedios en regímenes turbulentos.-

La primera aplicación en gran escala se realizó con el fin de seguir el movimiento de arenas en las cercanías de la escollera norte del puerto de Mar del Plata y evaluar la procedencia de los bancos que se forman en el acceso a este puerto. Se usó ^{110}Ag con muestreo y medición en laboratorio (2).-

La Comisión Nacional de Energía Atómica o firmas privadas han resuelto también numerosos problemas de localización de fugas en cañerías no accesibles y conductos subterráneos (Colegio "Sagrado Corazón" de Castelar, "La Fabril S.A.", Dep. de vivienda colectiva, etc.).-

3.- Los trazadores radiactivos en aguas superficiales y subterráneas.

Un trazador radiactivo es una sustancia -soluble en agua- utilizada para marcar agua y seguir su evolución por medio de la radiación emitida.-

El tipo de radiación (alfa, beta o gamma), energía y concentración determinan si las mediciones se realizarán "in situ" o bien se tomarán muestras para luego ser medidos en laboratorios.-

3-1.-Características a tener en cuenta para la selección del trazador.-

- a) El compuesto a usar ha de ser soluble en agua y seguir su movimiento sin intercambio químico con otros elementos del proceso, precipitación o adsorción en cualquier fase del mismo.-

El tritium (H^3 o T) es el isótopo de masa 3 del hidrógeno. Como está presente en la molécula del agua, es el trazador ideal a pesar de la baja energía de la radiación beta emitida, que hace imposible la detección "in situ".-

Entre los trazadores salinos se ha orientado la búsqueda hacia los aniones ya que la mayoría de los cationes son fijados por muchos terrenos.-

Otra solución es incorporar el metal a un anión complejo o fijarlo en moléculas orgánicas sin polarización.-

Las pérdidas por adsorción pueden disminuirse aumentando la concentración con el isótopo no radiactivo, ("portador") del mismo elemento que se usa como trazador.-

- b) La concentración del trazador en las aguas cercanas a los centros de consumo será inferior a la máxima permisible. En tabla I se dan valores de concentración máxima admisible para los distintos nucleidos seleccionados.-
- c) El período de semidesintegración ha de ser compatible con la duración de la experiencia. El uso de radioisótopos de corto período es aconsejable por razones de seguridad.-

Al cabo de un período la actividad del trazador decae a la mitad. Es una ley exponencial y el trazador resulta difícil de seguir más allá de 6 ó 7 períodos.-

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-0,693 t/T}$$

Nº de periodos	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% actividad residual:	100	50	25	12,5	6,25	3,12	1,56	0,78	0,39	0,20	0,10

- d) Disponibilidad y costo: con reactores de baja potencia es posible producir radioisótopos de períodos cortos (horas, días) con actividades compatibles con las necesidades de la hidrología subterránea y superficial.-

En el reactor RAI de la CNEA se han producido y usado como trazadores el ^{82}Br (35,6 hs.), ^{198}Au (2,7 días), ^{24}Na (15 hs.), ^{131}I (8 días) y ^{110}Ag (270 días).-

Con cantidades impoderables, gracias a la alta sensibilidad de detección es posible marcar grandes volúmenes de agua a bajo costo.-

El peso de 1 Curie de ^{82}Br con el flujo de neutrones térmicos disponible en el reactor RAI, es del orden del microgramo, y el precio para el uso en hidrología sería inferior a los \$10.000.- Con esta actividad es posible medir 5 caudales del orden de los 20 m³/seg.-

En cualquier reactor nuclear irradiando el elemento elegido durante un lapso igual al período del radioisótopo buscado es posible obtener la mitad de la actividad que se obtendría en una irradiación a tiempo infinito.-

- e) El tipo de radiación, energía e intensidad condicionan el método, detector e instrumental a utilizar. La radiación gamma y beta de alta energía puede ser detectada "in situ". Con los emisores alfa o beta de baja energía se toman muestras representativas de la fase o etapa que se sigue y se mide después en laboratorios.-

Si la actividad del trazador es del orden de magnitud del fondo natural (baja concentración), dada la naturaleza estadística de la radiación nuclear, es necesario acudir a técnicas elaboradas de bajo nivel de cuentas, y medir en laboratorios con instrumental apropiado y blindaje adecuado.-

- f) La forma, estado y actividad específica del trazador, puede ser también factor decisivo en la elección.-

3-2.- Trazadores artificiales, pseudo naturales y naturales.-

La mayoría de los trazadores salinos son producidos en reactores nucleares.-

El ^{82}Br y el ^{131}I son de frecuente uso en hidrología. En experiencias de laboratorio se ha podido apreciar que pueden atravesar columnas de arena y arcilla de 1 m. de alto sin retención apreciable.-

El T producido a partir del ^6Li y adicionando al agua en forma de agua tritiada (HT_2O ; T_2O) tiene características físicas y químicas prácticamente iguales al agua comun.-

Kaufman y Orlob (3) han demostrado que el agua tritiada puede intercambiar con una fracción del agua de constitución asociada a ciertos minerales. En la mayoría de los terrenos, la diferencia causada por este intercambio, es despreciable.-

Los trazadores "pseudo naturales" son aquellos producidos por las explosiones nucleares. A esta categoría pertenece el T, ^{131}I , ^{90}Sr , etc.-

En algunas zonas del hemisferio norte, la concentración de T en aguas de lluvia aumentó de 10 a 200. Este aumento de la concentración de T en la atmósfera y aguas de lluvia fué aprovechado para realizar evaluaciones de recarga, capacidad y balance continental de agua dosando el agua de lluvia, ríos, acuíferos, con posterioridad a las explosiones de 1954 (operación Castle), 1955 (URSS) y 1956 (operación Redwing) (4) (5).-

El T natural es producido por la rad. cósmica al interaccionar con el N siendo rápidamente oxidado y al combinarse con el vapor de agua, es arrastrado por las lluvias.-

TABLA I

Radioisótopo	Período de semidesintegración	radiación		Conc. máx adm. en agua $\mu\text{C}/\text{m}^3$
		Beta máx. MeV	Gamma(1) MeV	
^3H	12,46 años	0,018		0,2
^{14}C	55,68 años	0,155		3×10^{-3}
^{32}P	14,3 días	1,701		2×10^{-8}
^{35}S	87,1 días	0,167		5×10^{-3}
^{90}Sr	19,9 años	0,61		8×10^{-7}
^{193}Pr	13,95 días	0,932		5×10^{-4}
^{147}Pm	2,6 años	0,765		2×10^{-3}
^{24}Na	15,6 horas		2,75	8×10^{-3}
^{72}Ga	14,3 horas		2,51	5×10^{-4}
^{140}La	40 horas		2,5	3×10^{-4}
^{194}Ir	19 horas		2,1	
^{76}As	26,8 horas		1,2	2×10^{-4}
^{142}Pr	19,2 horas		1,59	
^{110}Ag	270 días		1,51	
^{60}Co	5,27 años		1,33	4×10^{-4}
^{72}Br	35,87 horas		1,31	
^{59}Fe	45,1 días		1,28	10^{-4}
^{46}Sc	85 días		1,12	4×10^{-4}
^{65}Zn	250 días		1,12	2×10^{-3}
^{198}Au	64,8 horas		0,68	2×10^{-3}
^{131}I	8 días		0,8	6×10^{-5}

4.- Detección de los trazadores en hidrología.-

Cuando el tipo de radiación, energía y concentración lo permiten, la detección se realiza "in situ".-

Para ello se utilizan sendas de inmersión, estancas, con detectores tipo cámara de ionización, contadores Geiger Müller o cristales de centelleo.-

La sensibilidad depende de la naturaleza y energía de la radiación, geometría, esquema de desintegración y eficiencia de detección.-

La sensibilidad, aquí como en cualquier otro instrumental es la pendiente de la curva de calibración.-

$$\frac{ds}{S} = \frac{k dX}{X}$$

S = señal

X = variable que se mide

k = sensibilidad

Para comparar la sensibilidad de los distintos detectores, en iguales condiciones de geometría, se usa en primera aproximación la denominada cifra de mérito dada por la relación:

$$\frac{E^2}{V_F}$$

E = eficiencia

V_F = fondo

Las cámaras de ionización por su sensibilidad y robustez son apropiadas para medir en campaña. La baja sensibilidad limita en hidrología su campo de aplicación.-

En las mediciones "in situ" la CNEA ha utilizado sondas de detección de 4 tubos Geiger Müller cada una, asociadas a escalímetro transistorizado y portátil.-

Con este instrumental es posible medir una concentración de 2 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ de ^{82}Br , en geometría "infinita" bajo error estadístico, en pocos minutos.-

Los cristales de centelleo resultan muchas veces insustituibles debido a la gran sensibilidad de detección de la radiación gamma.-

La energía máxima de la radiación β del T y C 14 son difíciles de medir con detectores sólidos, particularmente en el caso de hidrología donde se miden bajas concentraciones.-

Para evitar la autoabsorción, la muestra se disuelve junto con el detector o centelleador líquido en un solvente adecuado. Se obtiene así una geometría 4π ya que los radioisótopos están totalmente rodeados de moléculas del centelleador.-

Otra técnica de medición consiste en convertir el agua tritiada en gas de hidrógeno y medir con contador proporcional.-

Los límites de conteaje para ambas técnicas son del orden de $0,5 \mu\text{C}/\text{m}^3$.-

$$1 \text{ UT} = \frac{T}{H} = 10^{-10} \approx 3,2 \cdot 10^{-3} \mu\text{C}/\text{m}^3$$

Para aumentar la sensibilidad y poder llegar a medir concentraciones similares a la del agua natural se acude al enriquecimiento electrolítico.

5.- Determinación de la edad de un acuífero.

Este tema está estrechamente vinculado con la recarga, capacidad y balance de aguas.-

Edad de un acuífero, es el tiempo transcurrido desde que el líquido quedó separado de las aguas superficiales.-

La determinación de edad se realiza con ^{14}C y T. Carbono para aguas antiguas y tritio para aguas de menos de 30 años.-

El ^{14}C decae con un período de semidesintegración de 5570 ± 30 años. Los átomos de ^{14}C producidos, son oxidados y forman CO_2 para luego pasar a formar parte del ciclo de carbono: atmósfera-océanos - materia orgánica.-

La producción de ^{14}C en la alta atmósfera es prácticamente constante, habiéndose ya por consiguiente, estabilizado y alcanzado en la tierra, el estado de equilibrio en el cual la velocidad de formación y desintegración de ^{14}C son iguales.-

Si un acuífero se aísla, deja de participar de este ciclo, y la concentración disminuye siguiendo la ley mencionada: $C = C_0 e^{-\lambda t}$

Con la técnica del ^{14}C es posible determinar la edad de las llamadas "bolsas de agua" de muchos miles de años y conocer su origen geológico.

Los resultados pueden verse falseados si no se tiene en cuenta la posible modificación de la relación

$$\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C} + ^{13}\text{C}}$$

por procesos de intercambio de aguas y suelos.-

La edad se calcula comparando la actividad específica del acuífero y el agua superficial.-

$$\text{En el acuífero } A = A_0 e^{-\frac{0,693 t}{T}}$$

$$\text{En el agua de lluvia: } A_1 = A_{01} e^{-\frac{0,693 t_1}{T}}$$

Dividiendo ambos miembros:

$$\frac{A}{A_1} = \frac{A_0 e^{-\frac{0,693 t}{T}}}{A_{01} e^{-\frac{0,693 t_1}{T}}}$$

Como $A_0 = A_{01}$ y $t_1 \ll T$ resulta:

$$\frac{A}{A_1} = e^{-\frac{0,693 t}{T}}$$

$$\ln \frac{A}{A_1} = \frac{-0,693 t}{T}$$

$$t \text{ (años)} = \frac{(5570 \pm 30)}{0,69} \cdot \ln \frac{A}{A_1}$$

donde

A = actividad específica del agua en la muestra del acuífero.

T = período de semidesintegración del ^{14}C

A_1 = actividad específica del agua en la muestra superficial

A_0 = actividad específica al tiempo $t = 0$

El T tiene un período de 12,4 años y sólo es posible analizar muestras de menos de 30 años.-

Aquí el concepto de edad cambia, ya que en los acuí-

feros donde se utiliza la técnica del T, el agua se renueva sin dejar de participar totalmente del ciclo hidrológico.-

Surge entonces la denominada edad aparente ζ correspondiente a la edad media de la mezcla de aguas de distinta edad.-

REFERENCIAS

- 1.- Hull D.E., The total count techniques a new principle in flow measurements - Ind. J. Appl. Rad. Isotopes - Dec. 1958.-
- 2.- Lachica F. y Baró G., Informe Nº100 - Estudio del movimiento de arenas en las cercanías del puerto de Mar del Plata usando arena marcada con ^{110}Ag .-
- 3.- Kaufman W.J., Orlob G., Measuring ground water movement with radioactive and chemical tracers - J. Am. Water Work Assoc., 48, 5 May 1956.-
- 4.- Kaufman and Libby W., The natural distribution of tritium - Physical Review. Vol. 93 - Nº6.- March, 1954, 1337-1344.-
- 5.- Begeman F., and Libby W., Continental water balance, ground water inventory and storage times, surface ocean mixing rates and world wide water circulation patterns from cosmic-ray and bomb tritium. Geoch. and Cosmoch. Acta 12, 277 - 296, 1956.-
- 6.- Applications de la radioactivite a l'hydraulique souterraine. R. Hours DC/R/AR/60-12 - May 1960.-
- 7.- The possible use of tritium for estimating ground water storage - Tellus, Vol.10, Nº4, Nov.1958, 472-478.-
- 8.- Cálculo de recarga de aguas en reservorios subterráneos (acuiferos) por medio del tritio s/n.-