

# TRAZADORES DE AGUAS SUBTERRANEas\*\*

PRINCIPALES CARACTERISTICAS Y APLICACIONES

Juan Manuel Lesser Illades\*

## INTRODUCCION

En determinadas ocasiones es de importancia esencial conocer con exactitud la existencia de conexión entre dos puntos de un acuífero. Para ello desde el siglo pasado se han llevado a cabo experimentos consistentes en mezclar, en el agua de un aprovechamiento subterráneo localizado aguas arriba, una sal o un tinte, el cual puede ser reconocido en otro aprovechamiento localizado a cierta distancia aguas abajo, determinando así, la posible conexión entre dichos puntos. A esta técnica se le conoce como trazadores de agua subterránea.

Este método, se ha aplicado principalmente en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto, y en distancias hasta de 40 km (Zotl, 1970). En menor proporción, se ha llevado a cabo en medios granulares; ya que, por una parte, la velocidad de flujo es relativamente pequeña y, por otra, la arcilla produce absorción e intercambio iónico, por lo cual la aplicación en este medio debe ser en distancias cortas.

Los puntos de inyección más comunes son los ríos subterráneos, localizados dentro de cavernas, siendo los principales puntos de muestreo los manantiales. Con algunas limitaciones, los puntos de inyección y muestreo de trazadores pueden ser también pozos, norias, galerías filtrantes, drenes, lagos y presas.

En algunas ocasiones, se ha utilizado esta técnica para determinar si el agua de manantiales, ríos o drenes, corresponde a filtraciones de una presa o lago;

\* Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.



Ing. Juan Manuel Lesser Illades diserta sobre "El Uso y Aplicación de los Trazadores de Agua Subterránea".

Un buen trazador, debe de reunir las características siguientes: no ser tóxico, soluble en agua, identificable en pequeñas concentraciones; resistente a cambios químicos; tener poca o nula capacidad de intercambio iónico; no ser absorbido o retenido por el suelo o rocas. Su determinación, debe hacerse mediante análisis sencillos y su aplicación resultar económica.

Los principales trazadores son fluoriceínas, sales, esporas e isótopos.

\*\* Trabajo presentado en la IV Convención Geológica Nacional. México 1978.

## FLUORICEINAS

Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente. La longitud de onda de esta luz, varía de una sustancia a otra, propiedad que se utiliza para identificarlas. Las sustancias más comunes utilizadas como trazadores son: Uranina, Eosina, Amidorhodamina G extra, Rhodamina FB y Tinopal CBS-X. A continuación se describen las características de cada una de estas sustancias.

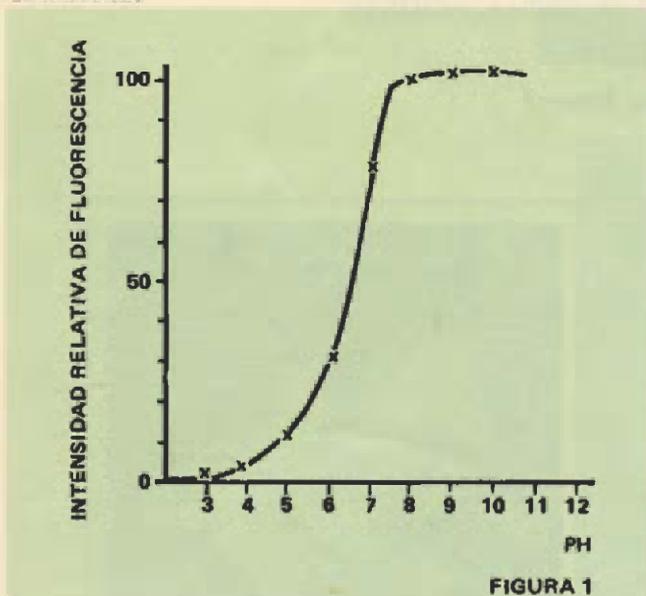


FIGURA 1

**URANINA.**— Es la de mayor aplicación, consiste en una fluoriceína de sodio que presenta un color naranja en soluciones concentradas que cambia a verde-amarillento al ser diluída. La intensidad de fluorescencia depende del pH. En la figura 1, se muestra la relación entre el pH y la intensidad de fluorescencia de la uranina. En aguas muy ácidas pierde su fluorescencia, pero este proceso es reversible, pudiendo recobrarla al añadir un compuesto básico, como KOH o  $\text{NH}_3$ . Esta propiedad puede utilizarse para identificar el trazador.

El poder de la uranina puede disminuir por medio de procesos fotoquímicos como la luz ultravioleta, por agentes oxidantes como el cloro y el ozono, y en algunos casos por procesos biológicos.

Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Antiguamente se utilizaban lámparas de luz ultravioleta para identificarla cuando se encontraba en concentraciones bajas. Actualmente las concen-

traciones entre  $1 \times 10^{-2}$  y  $2 \times 10^{-6}$  ppm son medidas con espectrofluorómetro.

La intensidad máxima de fluorescencia se detecta a una longitud de onda de  $515 \times 10^{-9}$  m. A mayor o menor longitud de onda la intensidad disminuye en forma simétrica (figura 2) y la forma de la curva distingue a la uranina de otra fluoriceína. Para concentraciones menores a  $2 \times 10^{-6}$  ppm, se utiliza carbón activado (W.B. WHITE, 1967, F. BAVER, 1972), el cual se coloca en el agua durante un tiempo que varía de un día a semanas, donde la uranina es absorbida y concentrada de 50 a 500 veces por el carbón y su concentración medida posteriormente.

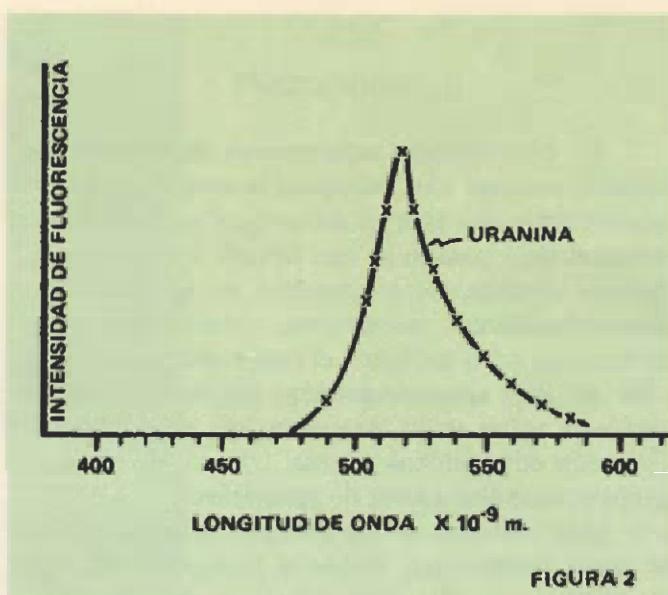


FIGURA 2

Para extraer la uranina del carbón, se le agrega a éste algunas gotas de alguna de las siguientes preparaciones:

- Una parte de alcohol etílico al 95 por ciento y una parte de hidróxido de potasio, diluído al 15 por ciento en agua destilada.
- Ocho partes de N - NDimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de  $\text{NH}_3$ .

Por último, la uranina es resistente a la absorción por arcillas y su uso no es tóxico para el hombre o animales.

**EOSINA.**— Presenta una fluorescencia naranja-rosa, cuya máxima intensidad se detecta a una longitud de onda de  $535 \times 10^{-9}$  m.

Cuando se presentan valores mayores de 0.01 ppm, es visible al ojo humano. Entre 0.01 y  $50 \times 10^{-6}$  ppm, puede detectarse con espectrofluorómetro. Concentraciones menores se concentran con carbón activado, del cual puede extraerse añadiendo una sustancia compuesta por ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Al utilizarse junto con Rhodamina FB o Uranina, se producen interferencias por lo que su aplicación conjunta es limitada.

**AMINORHODAMINA G EXTRA.**— Conocida anteriormente como Sulforhodamina G extra, presenta una fluorescencia naranja-rosa en soluciones concentradas, que cambia a verde al ser diluida. Su mayor intensidad se presenta a una longitud de onda de  $554 \times 10^{-9}$  m. Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm y con espectrofluorómetro pueden detectarse hasta  $6 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores pueden concentrarse por medio de carbón activado, del cual puede ser extraída la fluoriceína, por medio de una solución de ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Esta fluoriceína presenta inconvenientes, ya que es difícil de disolver y fácilmente absorbida por arcillas. En presencia de uranina, rhodamina FB o cosina, se producen interferencias.

**RHODAMINA FB.**— Presenta un color púrpura y fluorescencia roja. su mayor intensidad se detecta a una longitud de onda de  $578 \times 10^{-9}$  m. Es visible al ojo humano en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Con espectrofluorómetro se detectan hasta  $10 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores pueden ser concentrados por medio de carbón activado, del cual se extrae por medio de una de las soluciones siguientes:

- a) Cinco partes de propanol y 5 partes de hidróxido de amonio.
- b) Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

La rhodamina FB, presenta interferencias al combinarse con uranina, eosina o aminorhodamina G extra. Es tóxica cuando se inhala en soluciones concentradas. Por otra parte, en presencia de arcillas es altamente absorbida.

**TINOPAL CBS-X.**— Presenta un color verde con fluorescencia azul. Su mayor intensidad se

determina a una longitud de onda de  $430 \times 10^{-9}$  m. Es visible solamente en concentraciones mayores de 1 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta  $440 \times 10^{-3}$  ppm. Valores menores son concentrados por medio de carbón activado, del cual la fluoriceína puede extraerse agregando unas gotas de una solución que contenga ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada. Este producto, es absorbido por arcillas.

### EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORICEINA

Con el propósito de ilustrar su aplicación, a continuación se presentan los resultados obtenidos en un experimento llevado a cabo en la región cársica.

Se propuso conocer la conexión entre el agua de un río que se infiltraba dentro de una dolina y dos manantiales situados a 5 kilómetros de la primera. Para ello, se inyectaron 3 kg de uranina en el agua de la dolina, obteniéndose muestras de agua cada dos horas en los manantiales "H" y "S".

En el manantial "S", no se detectó uranina, por lo que se concluye que éste no tiene conexión con la zona de recarga donde se inyectó el trazador.

En el manantial "H", se empezó a detectar uranina 56 horas después de la inyección, y la concentración del trazador fue aumentando hasta llegar a  $32 \text{ mg/m}^3$ , según muestra en figura 3.

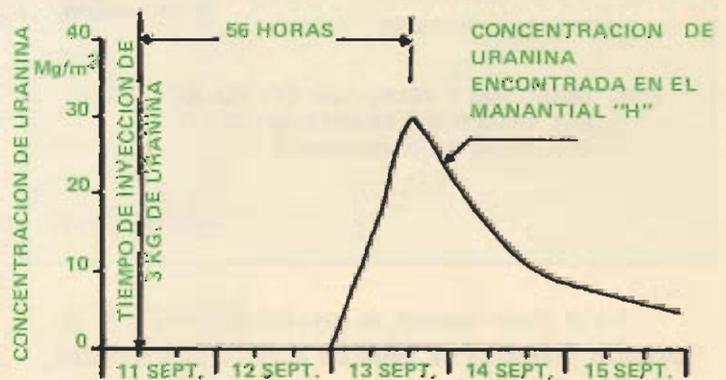


FIGURA 3

Tomando en cuenta el tiempo requerido por el trazador para circular entre los puntos de inyección y muestreo, y la distancia entre ellos se obtuvo la velocidad mínima de circulación, la cual fue de 3.7 km/día.

Otro ejemplo ilustrativo de la aplicación de trazadores, ahora en acuíferos granulares someros es el siguiente:

En un valle aluvial que presenta un acuífero freático a 3 m de profundidad, se perforaron 9 pozos de 3" de diámetro y 5 m de profundidad, distribuidos en la forma como se ilustra en la figura No. 4.



En el pozo central, se inyectó uranina y se obtuvieron muestras de agua en el resto de los pozos, cada 20 minutos.

Después de 3 horas 20 minutos de la inyección, se detectó uranina solamente en los pozos 4

y 5, de donde se puede obtener que el agua subterránea fluye en dirección sureste, a una velocidad de 1.5 m/hr.

Este método es utilizado en zonas sin información y su aplicación queda limitada por la profundidad a que se encuentre el nivel estático, ya que mientras mayor es ésta, mayor es el costo de los pozos de muestreo e inyección.

## SALES

Las sales son el trazador artificial conocido, de agua subterránea, más antiguo que se haya aplicado con éxito. Los productos utilizados más comunes son: sal de cloruro de sodio y sal de cloruro de potasio.

La sal es disuelta en agua y posteriormente incorporada al acuífero. Una de las desventajas que presenta este método, es que requiere que en la zona de inyección el caudal de agua que entre al acuífero sea grande. Por otra parte se necesita una gran cantidad de sales en cada experimento.

En zonas cársticas, para distancias entre 3 y 5 km, se requiere inyectar un mínimo de 500 kg de sal (Zolt, 1975). La cantidad más grande que se ha llegado a inyectar en un experimento de trazadores, fue de 50 toneladas de NaCl (W. Kass, en H. Batsche et al., 1970), donde después de 4 días, se encontró en uno de los manantiales de observación un incremento de cloruros de solo 39 ppm.

Los grandes volúmenes de trazadores requeridos mediante este método, hacen que su uso sea limitado. La ventaja consiste en que pueden efectuarse determinaciones cuantitativas.

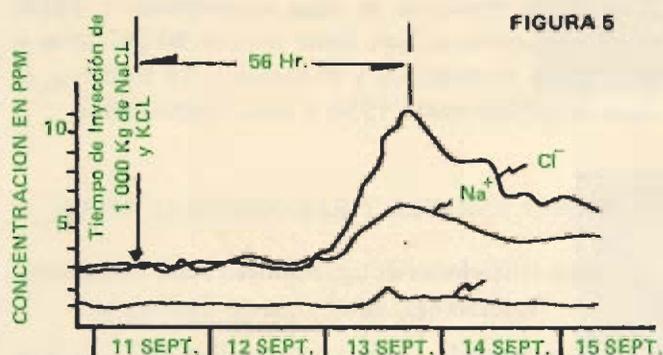
## EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES

Durante los trabajos realizados para conocer la posible conexión entre el agua de un río que se infiltraba en una dolina y dos manantiales localizados a 5 kilómetros de ésta, como se mencionó en párrafos anteriores, se inyectaron 600 kg de cloruro de sodio y 400 kg de cloruro de potasio.

Posteriormente se obtuvieron muestras de agua con intervalos de dos horas cada una, tanto en el manantial "H" como en el "S", las cuales se analizaron químicamente, determinándose el contenido de cloruros de sodio y potasio.

Al igual que en los resultados obtenidos para la fluoriceína (párrafos anteriores), en el manantial "S" no se detectó incremento alguno en su contenido salino, por lo cual se concluyó que este manantial no tiene conexión con el agua de infiltración de la dolina.

Por lo que se refiere al manantial "H", los resultados de los análisis se graficaron en la figura 5,



donde se observa que 56 horas después de la inyección de las sales, se detectó un incremento en los iones determinados, ratificando la comunicación entre la dolina y el manantial.

Considerando el tiempo que tardó en aparecer el trazador en el manantial y la distancia entre éste y la dolina, se obtuvo la velocidad de flujo del agua de este acuífero.

Por otra parte, con estos resultados y los de los análisis químicos y volúmenes aforados, es factible determinar el volumen mínimo de agua almacenado, así como conocer en que proporción el agua del manantial proviene de la infiltrada en la dolina.

## ESPORAS

Las esporas utilizadas como trazadores corresponden al tipo *Lycopodium Clavatum*. Tienen un diámetro de 30-55 micras y un color amarillo pálido (1 micra =  $10^{-4}$  cm).

Su forma es similar a la de un triángulo isósceles con lados convexos. Sus orillas forman cadenas de semicírculos cóncavos (figura 6). Están cubiertas por una fina membrana insoluble por lo que al ser incorporadas al agua son transportadas en suspen-

sión. No se sedimentan y tienen la propiedad de no ser absorbidas o intercambiadas con el suelo o rocas.



En el año de 1953, A. Mayr, trató de emplear las esporas como trazador debido a las propiedades que se presentan pero su identificación resultó problemática. J. Zotl y V. Maurin, idearon teñir las esporas de diferentes colores para facilitar su identificación, lo cual resultó exitoso. De esta manera, pueden mezclarse en agua esporas de diferentes colores y, posteriormente, detectarse en cierta zona de muestreo, identificándose por el color, con cuales sitios tienen conexión.

El muestreo de esporas se lleva a cabo instalando redes para plancton, las cuales se pueden dejar por tiempo indefinido en el lugar de muestreo. Al preparar la muestra para observarla en el microscopio, se ha visto que se obtienen resultados satisfactorios si se lleva a cabo lo siguiente:

A las muestras de campo se le agregan 3 gotas de hidróxido de potasio al 10 por ciento, 3 gotas de formol al 35 por ciento y una pizca de urea; posteriormente se calienta en baño de María por tres minutos. Se centrifuga y el sedimento se concentra en un tubo al que se le agrega una gota de ácido etílico. Se coloca una pequeña parte de la preparación en una lámina delgada para su análisis al microscopio.

## ISOTOPOS

Los principales isótopos utilizados como trazadores en agua subterránea se dividen en estables (Deuterio y Oxígeno 18) y radioactivos (Tritio y Carbono 14). A continuación se describen sus principales características.

**DEUTERIO Y OXIGENO 18.**— Son identificados con las siglas D 18 O. Se encuentran en el agua de mar en promedio de 320 y 2 000 ppm respectivamente. Sus concentraciones son representa-

das mediante las relaciones D/H Y 18 O/16 O y expresadas en unidades como sigue:

$$D = \frac{(D/H)_{\text{MUESTRA}} - (D/H)_{\text{SMOW}} \times 1000}{(D/H)_{\text{SMOW}}}$$

La evaporación produce un fraccionamiento isotópico, y en el agua de lluvia de zonas con climas moderados es lineal y en la proporción siguiente:

$$D = 8.180 - 10$$

Un fraccionamiento isotópico, está en relación con la temperatura y altitud.

Tomando en cuenta los procesos de propiedades de estos isótopos, es posible diferenciar agua superficial sujeta a evaporación, de agua de lluvia, o de agua infiltrada a diferentes alturas.

**TRITIO.** Tiene una vida media de 12.26 años. Antes del año de 1953, cuando se efectuaron las primeras pruebas con bombas atómicas, el agua de lluvia, contenía entre 5 y 10 unidades de tritio (U.T.). Como resultado de dichas explosiones, el contenido de tritio, en la atmósfera, se incrementó llegando a medirse hasta 800 U.T. en algunos lugares. La concentración de este isótopo en el agua, varía con la latitud y los cambios estacionales.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede decir que el agua con contenidos bajos de tritio, menores de 1 U.T. corresponde a agua infiltrada hace más de 50 años. Si tiene concentraciones de hasta 10 y 20 U.T. indica que el agua es de lluvia o de reciente infiltración y si tienen más de 20 U.T. corresponden a agua que tiene entre 10 y 50 años de infiltrada.

**CARBONO 14.** Este isótopo, junto con los mencionados anteriormente, es de los de mayor aplicación en hidrología y tiene una vida media de 5 730 años. El carbono 14 contenido en el agua, empieza a desintegrarse al incorporarse al acuífero; por lo cual, al medir su contenido en algún punto, es posible determinar el tiempo que ha permanecido en el acuífero. Pueden detectarse edades hasta de 30 000 años.

La edad del agua por medio del carbono 14, se complementa con la del tritio, debido a los di-

ferentes rangos que abarcan. Cuando la concentración del tritio es menor de 2 U. T., o sea infiltrada antes de 1954, se dice que es negativa y, para valores mayores, o sea posteriores a 1954, se dice que es positiva. Respecto al carbono 14, si se detecta alguna concentración significa que el agua tiene menos de 30 000 años y se dice ser positiva, pero si no se detecta, entonces, tendrá más de 30 000 años y es negativa.

Combinando estos isótopos, tenemos que si ambos son positivos el agua es posterior a 1954; si son negativos es que tiene más de 30 000 años y si el tritio es negativo y el carbono 14 positivo, el agua se infiltró entre 1954 y hace 20 000 años.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los trazadores de agua subterránea más comunes son: fluoriceínas, sales, esporas e isótopos.

Este método es de mayor aplicación en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto. En medios granulares, dado que, por una parte, la velocidad de flujo es relativamente pequeña y, por otra, la arcilla produce absorción e intercambio iónico. Se utiliza para distancias cortas.

Dentro de las fluoriceínas, la que ha reportado mejores resultados es la uranina. Su utilización permite determinar, principalmente, la conexión entre dos puntos de un acuífero; pero es también posible conocer velocidades y direcciones del flujo de agua subterránea.

el uso de sales es restringido debido a la gran cantidad de trazador requerido en cada experimento. Es recomendable para distancias cortas.

Las esporas son el trazador más novedoso aplicado con éxito. Su manejo es sencillo, económico y puede utilizarse para distancias hasta de 40 kilómetros.

Por las características que presentan el deuterio y el oxígeno 18, es factible, a partir de su determinación, diferenciar aguas superficiales sujetas a evaporación, del agua de lluvia o de aguas infiltradas a diferentes alturas.

Los isótopos tritio y carbono 14, son utilizados para datar el agua, abarcando un rango de prácticamente cero a 30 000 años.