

MUNIBE (Ciencias Naturales)	41	31-45	SAN SEBASTIAN	1989-1990	ISSN 0027 - 3414
-----------------------------	----	-------	---------------	-----------	------------------

Recibido. 2 -XII-88

Los trazadores en la hidrogeología kárstica: Metodología de su uso e interpretación de los ensayos de trazado (*)

Tracers in the karstic hydrogeology: Methodology of the use and explanation of the tracing results (*)

PALABRAS CLAVE: Karst, trazadores, ensayos, ordenador.

KEY WORDS: Karst, tracers, tracing, computer.

ANTIGUEDAD, I.*
IBARRA, V.*
MORALES, T.*

RESUMEN

Se exponen las principales cuestiones metodológicas a tener en cuenta en la realización de ensayos de trazado en sistemas acuíferos kársticos, así como los fundamentos de su interpretación. Ello permite obtener la mayor información posible de un ensayo de trazado y, por tanto, un mejor conocimiento del sistema acuífero kárstico investigado.

LABURPENA

Sistema akuifero karstikoetan oso interesgarri gertatzen diren markagai edo trazadoreen erabilpen-metodologia eta hortik lortutako emaitzen ulerkuntza-oinarria bera ere hartzen ditu helburutzat ikerlan honek. Era honetan markagai-saio batetik ahalik eta argibide gehien ateratzea errezten da, horrela aztertutako sistema akuifero karstikoaren jokabide hidrogeologikoa hobeto ezagutuz.

ABSTRACT

In this paper the main methodological questions which must be taken into account when working with tracers in the karstic aquifer systems are presented. Moreover, fundaments for data interpretation are given. This way enables to obtain the best possible information to know the hydrogeological behaviour of the investigated aquifer systems.

1. INTRODUCCION

La realización del proyecto «Aplicación de los trazadores en la investigación hidrogeológica de los acuíferos kársticos»* (ANTIGÜEDAD et al., 1988). por el Grupo de Recursos Hídricos de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea, ha permitido al equipo investigador profundizar en una nueva línea de exploración hidrogeológica (los ensayos con trazadores), que junto con otras anteriormente utilizadas por el Grupo (hidroquímica, hidrodinámica), aportan una cada vez mayor comprensión de los

sistemas acuíferos, kársticos fundamentalmente, del PaísVasco.

Así, se ha llegado a conocer la metodología de uso de los trazadores en los ensayos y de la interpretación de los datos susceptibles de ser recogidos a lo largo de un ensayo. Además, se ofrece en esta publicación una amplia visión sobre el interés y modalidades de este tipo de ensayos, haciendo especial énfasis en la forma en la que se deben realizar los trabajos para que se pueda obtener la máxima información de los ensayos.

* Area de Geodinámica. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.
 Apartado 644. 48080 BILBAO

(*) Proyecto de Investigación n.º 310.09-25/86, financiado por la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.

2. TRAZADORES Y TRAZADOS: INTERES HIDROGEOLOGICO

CASTANY y MARGAT (1977) definen el trazador como todo carácter específico o toda sustancia solidaria de un cuerpo en movimiento, fundamentalmente del agua subterránea que se desplaza, que permite IDENTIFICAR y DESCRIBIR su movimiento; puede estar presente de forma natural o ser añadido artificialmente. En efecto, a pesar de que los trazadores artificiales (colorantes, fundamentalmente) han venido siendo empleados de forma casi exclusiva, el reciente uso de ciertos marcadores propios del agua (físico-químicos y biológicos), como trazadores naturales, amplía las posibilidades de utilización de esta técnica en el campo de la investigación hidrogeológica.

El trazado, ensayo mediante trazadores, es definido por los mismos autores como un procedimiento experimental tendente a hacer aparente y observable el desplazamiento real del agua subterránea en un acuífero según una o varias trayectorias definidas entre un punto de inyección y uno o varios puntos de detección, por medio de un trazador artificial que marca el agua.

Este tipo de ensayos son de uso frecuente en hidrogeología kárstica, con objeto de verificar la existencia de relación entre una o varias pérdidas (sumideros) y una o varias surgencias, pudiendo así delimitar cuencas vertientes (Fig. 1). La puesta en práctica de este tipo de ensayos es simple, bastando con añadir al agua, en las cercanías del sumidero, una masa de trazador suficiente para que su detección en la(s) surgencia(s) sea posible, tanto visualmente (caso de trazadores colorantes) como por medio de determinados reactivos (caso de trazadores químicos).

A pesar de la simplicidad del ensayo, los resultados ofrecen, frecuentemente, dudas respecto al objetivo planteado. En efecto, la constatación de la presencia del trazador en una surgencia evidencia su relación con el punto de inyección; pero su no constatación no necesariamente implica ausencia de relación, ya que la «desaparición» del trazador durante el trayecto subterráneo, su aparición en la surgencia en concentraciones inferiores al límite de detección del método analítico utilizado (ocular, frecuentemente, con trazadores colorantes), o su aparición fuera del período de vigilancia, pueden ofrecer los mismos resultados.

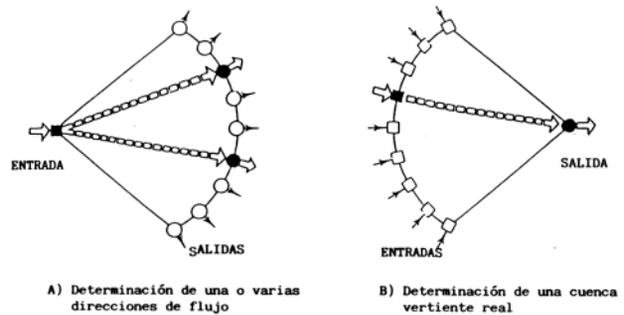


Fig. 1.— Consideraciones-tipo de trazados en el Karst (Molinari, 1976a).

Se ha puesto de manifiesto, incluso, la presencia temporal de fluoresceína natural en las aguas subterráneas, asociada a productos orgánicos disueltos (caso de la importante surgencia de Lez, según MARJOLET, 1977), que puede dificultar, si no se afinan las técnicas analíticas, la interpretación de los trazados efectuados con sustancias fluorescentes. Por otra parte, la larga permanencia que algunos trazadores pueden llegar a tener en el acuífero (caso de la fluoresceína) puede originar su presencia en la surgencia, aunque en débiles concentraciones, antes incluso de su inyección en un nuevo ensayo; por esta razón, algunos autores (MOLINARI, 1976; LUTZ et al., 1987) proponen instaurar una moratoria de empleo de sustancias de larga permanencia en regiones kársticas en las que este tipo de ensayos hayan sido frecuentes.

Pero el objetivo de un trazado no es solamente evidenciar (aspecto cualitativo) una relación entre dos o más puntos, sino que puede ofrecer informaciones más valiosas que sirvan para caracterizar (aspecto cuantitativo) hidrodinámicamente el sector de acuífero visitado por el trazador (LEPILLER y MONDAIN, 1986). Este segundo objetivo es, generalmente, menos frecuente, pero ofrece un mayor interés hidrogeológico y práctico, en la medida que el volumen de agua marcada por el trazador puede ser asimilado a un volumen de agua polucionada, del cual podemos conocer la modalidad de tránsito a través de las diferentes zonas recorridas del acuífero.

Los trazadores han sido utilizados casi de manera exclusiva en el estudio de acuíferos kársticos. La correcta interpretación de la información que ellos suministran se basa, necesariamente, en el adecuado conocimiento de la organización del drenaje en el Karst, ya que esa información es sólo relativa a una parte del sistema acuífero, la recorrida por el agua trazada, y no a su globalidad, de la misma forma que

es también relativa a un momento concreto, período de realización del ensayo, y no puede ser generalizada en el tiempo.

Así, ensayos realizados en distintas épocas (aguas bajas, aguas altas) en un mismo lugar darán, con toda probabilidad, respuestas diferentes (heterogeneidad temporal), al igual que ensayos realizados en diferentes lugares de un mismo acuífero (heterogeneidad espacial), incluso siendo simultáneos en el tiempo. Es precisamente esta variación espacio-temporal en las respuestas de los trazados, la que sirve para identificar hidrodinámicamente el medio atravesado, no pudiendo, en consecuencia, caracterizar el funcionamiento de un acuífero por medio de un único ensayo.

Desde este punto de vista, Mangin (1975) define el sistema trazado (*systeme traçage*) como un subconjunto del sistema kárstico (Fig. 2): parte del sistema acuífero que ha sido visitada por el volumen de agua marcada por el trazador. La información suministrada en el ensayo es, pues, relativa solamente a las modalidades de tránsito del agua trazada por dicho subconjunto del sistema.

En consecuencia, y a la vista de la esquematización del sistema acuífero kárstico (Fig. 2), ofrecerán informaciones diferentes ensayos realizados mediante inyección en sumideros directamente relacionados con la surgencia a través de los conductos más transmisivos (drenes), o aquéllos en los que la inyección se realice en lugares alejados de la red principal del drenaje kárstico. En el primer caso, la respuesta obtenida será más rápida y relativa al comportamiento de la zona transmisiva del sistema, mientras que en el segundo caso, la respuesta, mucho más lenta, dará información relativa a la hidrodinámica del sector capacitivo visitado. De esta forma, Fourneau y Sommeria (1986) proponen inyectar el trazador en puntos no directamente asociados con los drenes importantes, para poder, así, evidenciar, de manera más adecuada, el comportamiento del acuífero fisurado.

En conclusión, los ensayos mediante trazadores pueden aportar valiosa información sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos investigados (kársticos, fundamentalmente), más allá de la simple verificación de conexión hidráulica entre varios puntos; para ello, es necesario interpretar los datos del ensayo teniendo siempre en cuenta el contexto hidrodinámico (evolución de niveles piezométricos y/o caudales) en el que aquél se ha realizado, y en base a la esquematización del sistema acuífero (Fig. 2, modalidad de infiltración y flujos), y al conocimiento geológico (litológico y estructural) de la formación acuífera investigada, aspectos

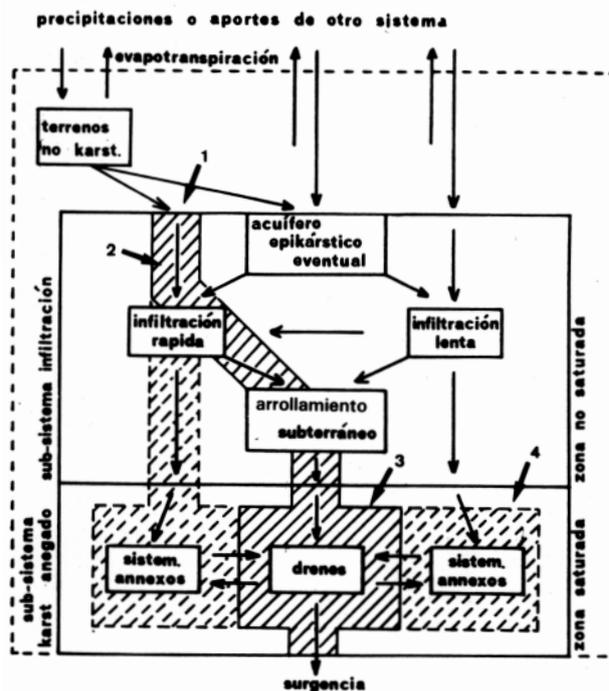


Fig. 2.—Representación esquemática del sistema trazado en el cuadro del sistema kárstico (Lepiller y Mondain, 1986). Las partes del sistema trazado representadas en discontinuo son eventuales.

1. Inyección a partir de una pérdida de una escorrentía superficial.
2. Inyección a partir de una cavidad sede de una circulación.
3. Inyección en un dren.
4. Inyección en un sistema anexo.

éstos necesarios para delimitar el sistema trazado (parte del sistema acuífero visitada por el trazador), de cuyo funcionamiento y organización hidrogeológica informa el ensayo realizado.

2.1. Trazadores: Requisitos y tipos

2.1.1. El trazador ideal

Un trazador ideal será aquél que se mueva a la misma velocidad que el agua, de tal forma que permita determinar el mayor número de factores del flujo. Será por tanto necesario que cumpla las siguientes condiciones:

1. Que sea estable química y biológicamente en el agua ensayada.
2. Que no interaccione ni sea retenido por el terreno; que presente débil absorción y adsorción.
3. Que no altere las características de flujo del acuífero.

Además de ello es importante que cumpla también las siguientes condiciones:

4. Que sea fácil de detectar cualitativa y cuantitativamente, incluso a baja concentración. Ello permitirá el uso de pequeñas cantidades de dicho trazador.

5. Que esté ausente en las aguas naturales o presente en bajas concentraciones.

6. Que no sea tóxico ni molesto para los seres vivos.

7. Que sea fácil de transportar y manejar.

8. Precio económico y que sea fácil de adquirir en el mercado.

9. Que no contamine permanentemente el terreno o durante un largo período de tiempo, lo cual permitirá la repetición del ensayo.

2.1.2. El trazador real

No existe ningún trazador que reúna todas estas condiciones de trazador ideal. Sin embargo, el conocimiento del comportamiento de los diferentes trazadores existentes puede permitir correcciones que hagan aprovechable la información que proporcionan. Cada trazador puede estar especialmente indicado para casos concretos, por lo que en la selección de un trazador determinado habrá que tener en cuenta una serie de principios técnicos, económicos, de disponibilidad y sanitarios que aconsejen su uso.

A continuación se dan algunas de las características más importantes de los trazadores reates más comúnmente utilizados, exceptuando isótopos naturales y radioisótopos artificiales:

A. Marcadores sólidos en suspensión

Características generales: Detección óptica por filtración o recuento microscópico. Aplicables a conductos kársticos bien desarrollados. Su utilidad principal es establecer conexiones hidráulicas. Han sido utilizados históricamente.

Tipos:

1) Bolas de avena, levaduras (cerveza), granos de almidón, salvado de cereales, serrín, etc.

2) Esporas (principalmente esporas de *Lycopodium Clavatum* y esporas coloreadas comerciales), polen, bacterias y microorganismos.

3) Bacteriófagos (virus específicos de bacterias). Ensayos fiables en crecida y estiaje en largas distancias. Muy buena tasa de restitución en sistemas kársticos. Ensayo delicado y costoso. Sin riesgo de infección para animales y vegetales. Existen diver-

sas variedades. Se necesita contar con laboratorio microbiológico. El almacenamiento máximo de las muestras es de 48 horas.

B. Marcadores químicos solubles

Tipos:

1) Cloruro Sódico (ClNa). Normalmente se determina el cloro. Detección hasta una ppm mediante electrodo específico. El sodio se puede determinar por espectrometría de llama hasta 0.1 ppm; es fijado por las arcillas. Altera la fracción arcillosa y modifica la permeabilidad. No es útil en aguas con elevado contenido natural (utilizable si el contenido en cloruros es inferior a 50-100 ppm). Se necesitan soluciones concentradas de mayor densidad que el agua natural, lo cual puede originar molestias en el consumo, además de variaciones en las características de flujo. Utilizable en acuíferos intersticiales y de fractura. El análisis químico se puede realizar por conductivimetría. No tóxico. Asequible, si bien, debido a las grandes cantidades a utilizar, su transporte es complicado (cientos de litros con algunos metros cúbicos de sal).

2) Cloruro Cálcico (Cl₂Ca). No utilizable en aguas naturales con importantes contenidos en cloro y calcio, lo cual es frecuente. Confieren mayor densidad y viscosidad al agua, variando por tanto las características del flujo. Interacciona con el terreno. Puede causar molestias en el consumo, si bien no es tóxico. Presenta una problemática similar al Cloruro Sódico.

3) Cloruro de Litio (ClLi). Se determina el litio. Fácil de determinar con precisión hasta 1 ppb con fotómetro de llama. El agua natural presenta normalmente bajos contenidos en litio. Interacciona con el terreno menos que la mayoría de los otros cationes utilizados. Presenta buena tasa de restitución en medio kárstico. No tóxico a las concentraciones utilizadas. Fácil de adquirir.

4) Cloruro Amónico (ClNH₄).

5) Hidróxido de Litio monohidrato (LiOH.H₂O). No es tóxico. Acuíferos intersticiales y de fisuras. Se recomienda proteger los ojos. Determinable por espectrometría de llama hasta 1 ppb. Buena tasa de restitución en medio kárstico. Adecuado en medio poroso. Algo fijado por las arcillas. Util principalmente en distancias cortas.

6) Dicromato Sódico (Cr₂O₇Na₂.2H₂O). Bastante soluble. Se puede determinar colorimétricamente con difenil carbacida a una concentración de 0.0002 ppm. Fácil de adquirir. El cromo es tóxico en bajas concentraciones, por lo que su uso debe de estar controlado y restringido.

7) Ioduro Potásico (IK). La determinación de Iodo es dificultosa. Presenta baja retención en acuíferos kársticos y de intersticios. Se recomienda proteger los ojos en la preparación. No es tóxico a las concentraciones utilizadas. Su determinación mediante electrodo específico y comparación con estándares llega hasta 10 ppb. Relativamente inestable en el tiempo y a la luz. Produce un gusto desagradable.

8) Nitrito Sódico (NO_2Na).

9) Acido Bórico (BO_3H_3).

10) Borax o Tetraborato de Sodio ($\text{B}_4\text{O}_7\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Utilizable en acuíferos con porosidad primaria y de fisura. Se fija en la pared de las botellas de vidrio. Análisis por fotometría hasta 0.1 ppm; por fluorescencia hasta 0.1 ppb. Tasa de restitución media. Es tóxico para vegetales. La relación sensibilidad-precio es elevada. El análisis es molesto y gravoso.

11) Bromoformo.

12) Fenoles, Azúcares, Complejos Cianurados, Detergentes comerciales. No suelen introducirse voluntariamente en el sistema dadas sus características tóxicas. Utilizables cuando se detecta su vertido por causas variadas. Son parcialmente destruidos por microorganismos. No son recomendables.

C. Trazadores químicos colorantes

Características generales: Fácilmente solubles, fácilmente detectables, visualmente, con fluorímetros o fotocolorímetros. Gran estructura molecular, lo que favorece su retención. Principalmente utilizados en acuíferos kársticos, donde suelen presentar buenas tasas de restitución. Algo deficientes en acuíferos porosos y poco recomendables en arcillosos. Pueden ocasionar molestias en zonas próximas a la extracción.

Tipos:

1) Uranina o fluoresceína disódica o fluoresceína soluble ($\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_4\text{Na}_2$). Es el más utilizado. Presenta gran solubilidad. Poder colorante fuerte, rojo a verde. Detectable a bajas concentraciones, 0.01 ppm a simple vista y 0.002 ppm con fluoroscopio. Es fijado por sustancias orgánicas, carbonosas, arcillas y reacciona con el CO_2 . Destruído por la luz, algunas bacterias y óxido férrico. Utilización fácil y costo relativamente bajo. Puede ser adsorbido mediante fluorocaptadores de carbón activo, y posteriormente recuperado en una solución alcohólica de potasa. Inofensivo para la salud. Presenta débil retención y buena tasa de restitución en medio kárstico.

2) Rhodamina B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$). Poder colorante fuerte, rojo-violeta. Se utiliza para aguas algo alcalinas. Es más estable que la fluoresceína a cambios de pH, también presenta más estabilidad frente a la luz y bacterias. Similar sensibilidad de detección. Muy sensible a las arcillas. Presenta poca retención en acuíferos kársticos. Puede ser adsorbido a partir de carbón activo. Es tóxico, da lugar a nitrosaminas cancerígenas en presencia de nitritos. Relación calidad-precio similar a la uranina. Su uso debe ser restringido dada su toxicidad.

Rhodamina WT. Similar al anterior, pero más estable debido a su menor sensibilidad frente a las arcillas.

3) Eosina (2', 4', 5', 7-tetrabromofluoresceína, disódica, sal). Poder colorante fuerte, rojo. Utilizable en medios intersticiales y de fisuras. Presenta poca retención. Inestable a la luz. Tóxico en altas concentraciones. Caro. Se puede adsorber con carbón activo y posteriormente liberarlo con dimetilformamida (DMF). Detectable por espectrofluorimetría hasta 0.1 ppb y por cromatografía hasta 0,25 ppb.

4) Azul de metileno. Recomendado en aguas ácidas.

5) Azul de Anilina. Recomendado en aguas ácidas.

6) Fucsina.

7) Pentacil brilliant pink o Sulforhodamina orcoacid o Amidorhodamina G extra (diethyl diamino-3, 6-dimethyl-3, 7 phenyl 9 xanthylum disulfonate-2, 7 sódico 552). Estable a la luz y a pH entre 5 y 9. Utilizable exclusivamente en Karst. Polvo de color rojo a rosa. Detectable mediante análisis por espectrofluorimetría hasta 0.005 ppb, por cromatografía hasta 0.02 ppb. Puede ser atrapado mediante carbón activo. Relación calidad-precio similar a la uranina. Tóxico en elevadas concentraciones. Difícil de adquirir y mala tasa de restitución en acuíferos porosos.

8) Piranina (1, 3, 6-Pirentrisulfónico ácido 8-hidroxitrisódico sal). Color verde. Utilizable en acuíferos porosos y fisurados. Se pueden utilizar fluorocaptadores. Menos sensibles a la luz que la uranina. Buena sensibilidad. Precio elevado.

9) Naphtionate (1-naphtylamin 4 sulfonic acid Na). Acuíferos de intersticios y fisuras. Polvo de color beige. Poco sensible a la luz. Se pueden usar fluorocaptadores. Es ligeramente tóxico. Buena relación sensibilidad-precio. Débil fijación. Puede presentar ruido de fondo en la determinación.

10) Tinopal o Tinopal CBS-X o Triazimylaminos-tilben. Utilizable en acuíferos kársticos. Se utiliza, preferentemente, para colorear esporas. Hay que proteger de la luz. No se pueden utilizar fluocaptos. Es degradable.

Existen otros productos fluorescentes, con nombres comerciales propios de cada fabricante y de difícil identificación del producto, existiendo, asimismo, productos iguales con distintos nombres, según el fabricante.

2.2. Ensayos de trazado: Metodología y Plan de trabajo

La metodología de los ensayos de trazado en la investigación hidrogeológica requiere el marcarse un plan de trabajo detallado a seguir durante la organización y realización de los ensayos, de forma que no se de lugar a improvisaciones y se asegure el buen desarrollo de los trabajos.

Así, es necesario un conocimiento previo, desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, de la zona que se va a estudiar; además de elegir adecuadamente el trazador y la cantidad que va a ser inyectada en el sistema acuífero. Por lo general, se suele emplear un notable exceso de trazador; sin embargo, el obtener un buen ensayo depende más de la calidad del muestreo que de la cantidad de trazador inyectada, si se dispone de una analítica lo suficientemente precisa. De esta forma, el muestreo de los exutorios del acuífero debe de ser sistemático, con un incremento de tiempo de muestreo lo menor posible, ya que será lo que ayude a definir mejor la nube de paso del trazador. Además, para adquirir la función de salida, y poder obtener la curva de flujo másico del trazador, es necesario realizar aforos sistemáticos en los puntos de descarga del sistema. Por otra parte, la analítica que determina las concentraciones de salida del trazador debe de ser fiable y realizarse con una buena cualificación.

Todo ello permitirá obtener la mayor información posible de los ensayos de trazado, ya que, a pesar de que su carácter cuantitativo precise una toma de datos exhaustiva durante un largo tiempo, de la interpretación y evaluación de los datos recogidos se determinan interesantes variables tales como los parámetros de transferencia de los acuíferos.

2.2.1. Organización del ensayo: operaciones previas y preparativos

2.2.1.1. Análisis del área de estudio: elección de los puntos de inyección y muestreo.

Los puntos de inyección y de muestreo deben ser establecidos en las operaciones previas del ensayo, lo que hace necesario un análisis del área de estudio. Así, la selección de estos puntos será determinada en base a las características hidrogeológicas de la región que se está investigando, se estudiará la bibliografía y cartografía geológica existente, y las eventuales experiencias previas al ensayo. Además, se debe analizar con interés la información al respecto, procedente de la gente que vive en el área.

De esta forma en la zona de alimentación del sistema acuífero se delimitarán las zonas endorreicas con posibles sumideros que pueden servir como punto de inyección del trazador. Por su parte, se establecerán los puntos de muestreo en los cuales el trazador puede aparecer al ser coincidentes con el sentido de la circulación subterránea; si éste es desconocido, es necesario estimar una red de circulación hipotética y elegir las surgencias con probable conexión con el sumidero de inyección; si esta elección fuera dudosa habrá que muestrear todos los exutorios o zonas de descarga del acuífero.

También es aconsejable realizar un análisis previo de la accesibilidad del área de estudio mediante la consulta de los correspondientes planos topográficos y fotografías aéreas. Así, se planteará la posibilidad de acceder mediante vehículos a los puntos de inyección y de muestreo.

En todo caso, si no se conoce en detalle el área de trabajo, conviene realizar un reconocimiento sobre el terreno previo al ensayo, para verificar el estado de los accesos, comprobar la existencia de escorrentía en los sumideros y tener perfectamente ubicados los puntos de descarga del sistema (manantiales, tramo del río, etc.)

2.2.1.2. Elección del trazador y de la cantidad a utilizar

La elección del trazador a utilizar se realizará en función de los objetivos que se esperan conseguir; no obstante, siempre entran en juego un conjunto

de factores, tales como la toxicidad, el precio, la absorción y retención, etc. En el caso de que existan aprovechamientos de abastecimiento en el sistema acuífero, se considera conveniente no perturbarlo con el empleo de trazadores colorantes en cantidades que permitan su visualización a simple vista, dada la lógica alarma que se crearía entre los usuarios ante la coloración del agua.

Se hace necesaria la determinación de la cantidad óptima de trazador a utilizar en un ensayo, a fin de garantizar que el trazador pueda ser suficientemente detectado y medido; pero, siempre hay que tener cuidado de que un cálculo por exceso, para intentar asegurar el umbral de detección, nos lleve a concentraciones y cantidades de difícil manejo, demasiado densas o viscosas, demasiado caras o peligrosas y tóxicas.

Los principales parámetros que influyen en la elección de la cantidad de trazador a utilizar son:

— La sensibilidad del sistema de medición, que aconseja una concentración ideal para su analítica, de forma que la dilución no supere los niveles detectables.

— La posible toxicidad del trazador utilizado a unas concentraciones dadas, por lo que la máxima concentración esperable en los puntos de descarga no debe superar los límites sanitariamente permisibles.

— Las consideraciones económicas, ya que por lo general los trazadores son caros, contribuyen a que se intente afinar lo máximo posible en el cálculo de la cantidad a inyectar.

— Las características hidrogeológicas del sistema acuífero a trazar, tales como son:

- el volumen de agua que va a ser trazado, por estimación de los recursos subterráneos o de la descarga de los exutorios en el período de paso del trazador, que dependerá de las condiciones hidrodinámicas en las que se encuentre el acuífero (épocas de estiaje, crecidas, etc.)

- la capacidad de absorción del medio, el grado de desarrollo de la karstificación, la dispersividad del acuífero (existencia de ramificaciones y sinuosidades), etc.

- Las dimensiones del sistema acuífero (distancia del trayecto, gradientes energéticos, etc.)

Por lo general, la mayoría de estos factores no están bien conocidos y son parcialmente desconocidos por el investigador.

Varios autores proponen fórmulas, con parámetros variables, para realizar un cálculo estimativo de la cantidad de trazador a utilizar en un ensayo. En

general sólo son aplicables a acuíferos carbonatados con permeabilidad secundaria (por fracturación y karstificación).

RAVIER, HOURS y SCHEEBELI (en Schoeller, 1962) establecen para sistemas carbonatados y para dicromato potásico que:

$$P = 3 \frac{QL}{A} + 0.1 V$$

y para la fluoresceína,

$$P = K \cdot \frac{QL}{A} + 0.02 V$$

en los cuales,

P = cantidad de trazador en Kg.,

Q = caudal de los manantiales de descarga en m³/s

A = velocidad real del agua subterránea, en m/día.

L = distancia desde el punto de inyección al punto de muestreo, en m.

V = volumen de reservas de agua subterránea en 10³ m³.

K = 0.5 para circulación por fisuras o canales.

K = 3 en formaciones porosas.

Por su parte, BEKTCHOURINE (en Salbidegoitia, 1970) estima que la cantidad en gramos de fluoresceína, a utilizar por cada 10 m. de recorrido, es de:

5 a 20 gr. en rocas arcillosas.

2 a 10 gr. en arenas.

2 a 20 gr. en rocas fisuradas.

2 a 10 gr. en rocas kársticas.

Para otros colorantes pueden precisarse cantidades hasta 5 veces superior.

MARTEL (en Milanovic, 1981) utiliza una fórmula práctica y exenta de grandes complicaciones:

$$P = N \cdot Q$$

donde,

P = peso en Kg. de fluoresceína.

Q = caudal en m³/s de las surgencias.

N = número de kilómetros en línea recta que hay desde el punto de inyección del trazador hasta el manantial más lejano.

Según el cálculo de FILIP se deben utilizar 40 Kg. de fluoresceína sódica para trazar 1 Hm³ de agua, mientras que DREW y SMITH (1969) aconsejan 60 gramos por kilómetro de recorrido por 5 veces la descarga del manantial más alejado en m³/s.

La principal aplicación de estas fórmulas es la de determinar una cantidad estimativa del trazador a utilizar en un ensayo en unas condiciones específicas. No obstante, el factor más valioso para determinar la cantidad de trazador a inyectar es la experiencia previa del investigador, siendo siempre aconsejable añadir una cantidad adicional ya que es mejor pecar por exceso que no por defecto.

2.2.1.3. Elección del tipo de muestreo a realizar

Es aconsejable llevar una planificación del muestreo a realizar en un ensayo de trazado; para ello es preciso tener en cuenta el tiempo que pueda tardar en reaparecer el trazador y el período de tiempo que puede durar su paso, que estarán en función de la distancia entre el punto de inyección y los de observación y de los rangos de velocidad del tipo de acuífero que se quiere estudiar. La determinación de la distancia a recorrer siempre es difícil, ya que no es sistemáticamente igual al trayecto más corto.

La frecuencia del muestreo no puede ser fijada por ninguna regla absoluta, la elección del intervalo de tiempo de muestreo es fundamentalmente seleccionado en base a la experiencia previa del hidrogeólogo y a un conocimiento preciso de la hidrogeología regional, y siempre es aconsejable adoptar un margen de seguridad a fin de garantizar que la nube de paso será muestreada o utilizar algún trazador colorante de forma que se visualice el paso de los trazadores.

En todo caso, se pueden tomar algunos valores orientativos, por ejemplo en distancias comprendidas entre 1 y 10 Km el intervalo de tiempo puede ser de 4-6 horas, y para grandes distancias, donde se prevea que la nube tardará varios días en salir, se puede muestrear diariamente. Asimismo, los intervalos de muestreo deben ser adecuados al tiempo transcurrido desde el instante de la inyección, y tanto más dilatados cuanto mayor es el tiempo; por ejemplo, en observaciones realizadas en períodos en los que se estima la salida de las máximas concentraciones conviene muestrear a intervalos cortos (1 ó 2 horas); sin embargo, después de un amplio período de tiempo, puede bastar con 1 ó 2 muestras diarias.

2.2.1.4. Preparación de los materiales

Una vez realizado el pesaje del trazador se procede a la preparación de la disolución. En el caso de la fluoresceína, por cada kilogramo se requieren aproximadamente 40-50 litros de agua, y se añaden, con objeto de mejorar la calidad de la solución, los siguientes aditivos:

- de 2 a 5 litros de alcohol, que permite poder identificar concentraciones hasta de 1:6.109, lo que facilita su detección.

- de 0.15 a 0.25 litros de amoniaco, que incrementa la solubilidad de la fluoresceína, lo que hace desaparecer los grumos y homogeneizar la disolución.

- un 7% de sosa cáustica (proporción 1:2) que multiplica por 8 la intensidad de coloración.

Generalmente, la preparación de la disolución se realiza en el lugar considerado para la inyección, pero usando contenedores de plástico ya que nunca se debe de echar el polvo anaranjado de fluoresceína directamente sobre el punto de inyección. Al diluir la fluoresceína toma un color rojo intenso, debido a la fuerte concentración en que se encuentra, y después al verter sobre el agua adquiere su color verde característico.

Por su parte, se prepararán los fluocaptore, que consisten en una cantidad de 15 a 25 gr. de carbono activo, en grano de dimensiones similares al arroz, que se introduce en un recipiente poroso que debe estar lleno para evitar la agitación de los granos y su desgaste, ya que es la superficie del carbón la que recoge mayor cantidad de fluoresceína. Son muy adecuados los contenedores a modo de bolsas fabricadas con tela de nylon.

En lo que respecta a las disoluciones preparadas con cloruro de litio se deben tomar ciertas precauciones a la hora de manipularlas, ya que se produce una reacción exotérmica y además su contacto con la piel y ojos produce irritaciones, por lo que se recomienda portar guantes durante su preparación. La disolución debe poseer una concentración netamente inferior a la solubilidad límite para evitar la reprecipitación en caso de enfriamiento de la disolución. En todo caso, se aconseja que las disoluciones se preparen unos días antes de la inyección, al objeto de homogeneizarlas perfectamente.

Por otra parte, se prepararán los frascos necesarios para la toma de muestras debidamente referenciados.

2.2.2. Realización del ensayo: transporte, inyección y muestreo

2.2.2.1. Transporte y manejo: precauciones

Se deben adoptar medidas de precaución durante el transporte y manipulación de las disoluciones a inyectar para evitar contaminaciones. Así, su transporte se realizará en bidones con cierres de seguridad y, en el caso de que se produjeran fugas, se lavará completamente el interior y exterior del vehículo, fuera de la zona de trabajo. Además, el vehículo utilizado para el transporte del trazador no debe usarse para realizar la recogida de muestras. Asimismo, es aconsejable que las personas que vayan a realizar el muestreo no participen en la preparación e inyección de las disoluciones, ni tan siquiera en calidad de espectadores y, del mismo modo, el personal encargado de la inyección no debe acercarse a los puntos de muestreo, ya que transportan partículas de trazador en sus ropas, pelo, manos, etc.

Todo este tipo de medidas precautorias deben considerarse cuando se trabaja con trazadores colorantes; sin embargo los peligros de contaminación son menores si se utilizan trazadores químicos no colorantes.

2.2.2.2. Inyección del trazador en el acuífero

Existen dos tipos de técnicas de inyección: la continua a caudal constante, y la instantánea o masiva de corta duración.

La inyección continua no es aplicable en la realización de ensayos de trazado, ya que el consumo de trazador sería prohibitivo; además, para poder obtener la respuesta impulsional del sistema y estudiar la transferencia de la masa de trazador inyectada, es indispensable que la inyección sea instantánea. Este método consiste en inyectar, de forma instantánea o en un período de corta duración, un volumen de una disolución con una concentración de trazador conocida. De esta disolución «madre» conviene tomar una muestra, previamente a la inyección, para verificar su concentración.

Una inyección instantánea es fácilmente realizable, siempre que el caudal del sumidero sea elevado; sin embargo, no es aconsejable su realización si es menor de 1 l/s, ya que el caudal de vertido de la disolución debe ser inferior al caudal del sumidero, con objeto de que el trazador sea constantemente evacuado por el agua. Es necesario aforar el caudal de entrada al sistema en el sumidero de inyección para poder construir la función de entrada del flujo del trazador.

2.2.2.3. Muestreo y toma de datos: adquisición de la función de salida

En primer lugar, previamente a la inyección, se cogerán las muestras de referencia en cada punto de muestreo seleccionado, a fin de determinar el «blanco» o un posible «ruido de fondo»; si se trabaja con fluocaptadores se instalará alguno en un período precedente al ensayo.

Con objeto de obtener las funciones de salida del trazador se procederá a realizar un muestreo sistemático de todos los exutorios que, supuestamente, están en relación con el punto de inyección, para determinar la cantidad de trazador en el agua, expresada en unidades de concentración. Además, es necesario medir la descarga de los manantiales mediante un registro de altura del agua en los exutorios, entre el momento de la inyección y el fin de la restitución, con la ayuda de un limnógrafo o regleta; para obtener los caudales se establecerá la curva de gastos de la estación de medida mediante varios aforos.

En el caso de trabajar con fluocaptadores se colocarán sumergidos en las posibles surgencias, en las zonas de máximo flujo, atados a un soporte fijo, de forma que, ante posibles decrecidas o crecidas del caudal, no queden en lugar seco o, por el contrario, sean arrastrados por la corriente; tampoco se deberán depositar en fondos lodosos que puedan taparlos.

Los fluocaptadores que se van retirando durante el muestreo se introducen en frascos para su preservación; por su parte, las muestras de agua que puedan contener colorante deben ser almacenadas al resguardo de la luz. Cada frasco de muestreo debe llevar la referencia del punto e instante de la toma, llevándose su control en una tabla, preparada a tal efecto, en la que se incluirán los datos de altura de los niveles del agua y de los aforos realizados, además de las posibles medidas de conductividad que se realicen con objeto de identificar el paso del trazador. No obstante, la relación conductividad-trazador en disolución, sólo se pondrá de manifiesto en el caso de que se utilicen grandes cantidades de trazador, que harían económicamente prohibitivo el ensayo; además, la interpretación de los resultados siempre es dificultosa debido a las variaciones naturales de la conductividad de las aguas.

La posibilidad de muestrear automáticamente, mediante un aparato tomamuestras, permite aligerar considerablemente los trabajos de muestreo y realizar un muestreo ajustable en el tiempo. De todos modos, siempre conviene tomar alguna mues-

tra de forma manual, simultáneamente con el aparato, para corroborar los resultados y poder detectar posibles contaminaciones en su mecanismo de toma.

A ser posible, se mantendrá contacto con el laboratorio de analítica durante el período de muestreo, de forma que se ayude a centrar la intensidad del muestreo y se confirme positivamente que la ola de trazador ha pasado por los puntos de observación, con lo que se daría por concluido el ensayo.

2.2.3. Resultados del ensayo: detección y analítica

Existen diversos métodos de detección, que varían según el tipo de trazador; entre ellos citaremos los siguientes:

— Observación óptica:

- a simple vista, por observación directa (colorantes, sustancias sólidas).
- al fluoroscopio (colorantes).
- al microscopio (bacterias, levaduras, etc.).

— Análisis químico (sustancias químicas, solubles):

- colorimetría (bicromato sódico).
- espectrofotometría (cloruro de litio, fluoresceína, etc.)
- espectrografía de masas (isótopos y radioisótopos naturales, O^{18} , deuterio)
- medición de la radiactividad (radioisótopos artificiales).
- medición de la conductividad o resistividad eléctrica (sales)

En el caso de la fluoresceína, los niveles de detección son los siguientes!

— a simple vista a concentraciones mayores de $2 \cdot 10^{-8}$ (0.02 mg/l).

— con el fluoroscopio Trillat a la concentración de $2 \cdot 10^{-9}$ y a veces de $1 \cdot 10^{-9}$ (0.001 mg/l).

— con el fluoroscopio eléctrico Dienert a la concentración de $2 \cdot 10^{-9}$.

— con la lámpara de cuarzo a concentraciones por encima de $0.5 \cdot 10^{-9}$.

— en el espectrofluorímetro hasta concentraciones de $1 \cdot 10^{-9}$ (para la medida de la fluorescencia directamente de muestras de aguas hay que añadir KOH o NaOH hasta alcanzar un pH=12)

El uso de fluorocaptadores de carbono activo, que absorben la fluoresceína, permite que las posibilidades de detección lleguen hasta umbrales más bajos, hasta de $1 \cdot 10^{-11}$, ya que la concentración de la fluoresceína extraída del carbono es muy superior a la del

agua estudiada. La fluoresceína se recupera en un 50% al introducir los granos de carbono en una solución alcohólica de potasa al 5 ó 10% (10 gramos de KOH por 100 ml de etanol), durante 15 ó 30 minutos. En el caso de que el carbono contenga fluoresceína aparece enseguida una coloración verde superficial sobre los granos, que puede extenderse a toda la solución. Las muestras se filtran en las mismas condiciones a $0.45 \mu\text{m}$ y el fluido se examina en el espectrofluorímetro o espectrofotómetro.

Las muestras serán analizadas por un laboratorio bien equipado que mantenga a punto los patrones y curvas de calibrado.

A partir del análisis de las muestras y de la descarga de los manantiales, se determina la cantidad de trazador que sale en el flujo de cada surgencia. Así se concluyen las relaciones prioritarias del flujo del agua entre los sumideros y los manantiales. Además, se puede calcular la cantidad de trazador que ha salido por los exutorios controlados y, por tanto, estimar la cantidad de trazador que ha sido retenido o que ha fluído por otros manantiales no incluidos en el plan de muestreo.

2.3. Información obtenida e interpretación del ensayo con trazadores

La interpretación de los resultados de una operación de trazado se funda en el estudio de las modalidades de tránsito del agua marcada por el trazador, en el espacio (sistema trazado) que ella recorre (GUIZERIX y MARGRITA, 1976; LEPILLER y MONDAIN, 1986).

Desde un punto de vista sistemático (concepto de sistema) esto conlleva la necesidad de conocer, no sólo la respuesta del sistema-trazado (curva de concentración del trazador en la surgencia, evolución de caudales en la misma a lo largo del ensayo) sino también su señal de entrada, es decir, la modalidad de inyección del trazador y la evolución de caudales a lo largo de esa inyección, en el punto donde ella tiene lugar. Así, la respuesta observada en la(s) surgencia(s) dependerá del tipo de inyección realizada (conocida) así como de la organización de los flujos en el sector del acuífero visitado, que es precisamente lo que se trata de conocer. La interpretación se basa, por tanto, en la consideración conjunta del tránsito del agua trazada (cantidades de trazador) y de la transferencia de energía, relativa esta última a los caudales de agua puestos en juego antes y durante el trazado (Fig. 3)

En el caso más generalizado, la inyección del trazador puede considerarse como puntual, instantánea (impulsión unitaria), de forma que la respuesta

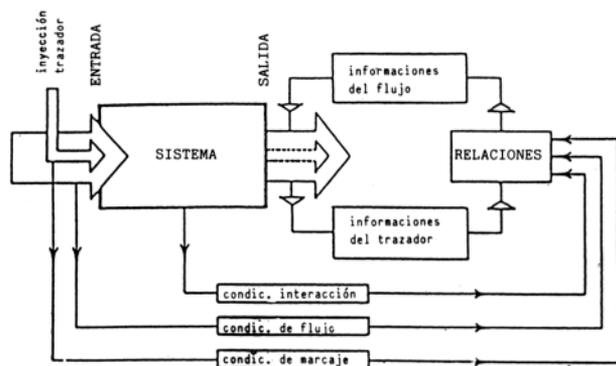


Fig. 3.—Interpretación de un trazado, considerando conjuntamente la evolución de la masa del trazador y la evolución de los caudales durante el ensayo (según Guizerix y Margrita, 1976). Concepción sistemática.

del sistema trazado a esta impulsión puede considerarse como la respuesta impulsional (Molinari, 1976a). que caracteriza a ese sistema para las condiciones concretas de realización del ensayo.

A partir de los datos recogidos durante el ensayo de trazado, tanto en lo que se refiere a la función de entrada (momento y condiciones de la inyección) como a la de salida (control de la nube de paso de trazador en las surgencias y control de caudal en éstas), se establece una serie de curvas, cada una de las cuales representa un determinado aspecto a considerar (Tabla 1.) La representación gráfica de estas curvas se obtiene mediante un programa informático, puesto a punto en el Area de Geodinámica de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Un ejemplo de representación puede observarse en la Figura 4. Estas curvas son:

A. Curva de concentración del trazador (nube de paso). Expresa la evolución temporal (días) de la concentración (mg/l) del trazador en la surgencia. De esta curva se deducen una serie de parámetros relativos a la velocidad de tránsito (de las partículas trazadas más rápidas, de las más lentas y la modal), a la concentración (máxima y media) del trazador, y a la duración de su restitución. Esta curva representa, por tanto, la transferencia de materia a través de la parte del sistema acuífero visitada por el trazador.

Los tiempos se miden tomando como referencia ($t=0$) el momento mismo de la inyección. La distancia utilizada para el cálculo de las velocidades es la existente entre el punto de inyección y el punto de

muestreo, que viene dada, por lo general, por su distancia en línea recta en un plano horizontal, si bien, en ocasiones, es posible conocer mejor la distancia real recorrida por el agua trazada, en base a criterios estructurales (fracturas, estratificación, ejes de plegamiento...).

Diversos autores (citados en Jamier, 1976) proponen métodos de cálculo de la dispersión longitudinal a la que se ve sometido un trazador en un fluido, a partir de parámetros deducidos de la curva de concentración; en cualquier caso, la toma en consideración de la dispersión transversal, importante a veces, y de la no constancia de los caudales (Q no constante) durante el ensayo, dificultan el tratamiento.

El interés principal de la curva de concentración reside en que la respuesta observada puede ser asimilada a la que daría el tránsito de un agua polucionada, siempre considerando las mismas condiciones hidrodinámicas (aguas altas, medias, bajas). Se puede así conocer, mediante diversos ensayos, la influencia espacio-temporal que una polución origina en un acuífero.

B. Curva del caudal (hidrograma). Expresa la evolución temporal (días) del caudal (l/s) en la surgencia y, en consecuencia, representa la transferencia de energía operada, en su globalidad, por el sistema funcional durante el periodo de duración del ensayo. Se conocen así los volúmenes de agua puestos en juego antes y durante el periodo de restitución del trazador.

Esta curva representa, portanto, las condiciones hidrodinámicas habidas durante el ensayo, y supone la referencia obligada para la correcta interpretación de la nube de paso del trazador. Cuando el régimen no es permanente (hay variación de caudal) es preciso trabajar con los flujos (mg/s) del trazador, y no con sus concentraciones (mg/l).

De esta manera, en ensayos de algunos días de duración, una evolución de los caudales, a causa, por ejemplo, de precipitaciones, tiende a deformar la curva de concentración del trazador (posible aspecto plurimodal) pudiendo conducir a interpretaciones erróneas (¿diferentes caminos de acceso a la surgencia?). Por otra parte, el conocimiento de la curva de paso del trazador ayuda en la interpretación del hidrograma, pudiendo diferenciarse el flujo rápido (portador del trazador) del flujo lento, procedente de las reservas, exento del mismo. Se conocen así las modalidades del flujo.

Curvas utilizadas	Parámetros Calculados	Informa sobre:
Concentración: $C_s(t)$	— tiempo de tránsito de las partículas más rápidas: t_1 — tiempo de tránsito de las partículas más lentas: t_2 — duración de la restitución: $t_r = t_2 - t_1$ — tiempo modal de tránsito: t_m — velocidad modal de tránsito: $v_m = L/t_m$ — velocidad de las partículas más rápidas: $v_{max} = L/t_1$ — concentración máxima de salida: C_{smax} — concentración media de la nube de trazador: $\bar{C}_s = \int_0^{\alpha} C(t) dt/tr$	Simulación del tránsito de un polucionante.
Caudales: $Q(t)$	— volumen de agua drenado por la surgencia antes de la restitución: V_1 — volumen de agua drenado por la surgencia durante la restitución: V_2 * Estos volúmenes pueden ser descompuestos en flujo de crecida y flujo de base.	Condiciones hidrodinámicas durante el trazado.
Flujo másico: $\varnothing(t)$ $Q = \text{cte: } \varnothing(t) = Q C(t)$ $Q \neq \text{cte: } \varnothing(t) = Q(t) C(t)$	— Masa de trazador restituída: M_r $Q = \text{cte: } M_r = Q \int_0^{\alpha} C(t) dt; \quad Q \neq \text{cte: } M_r = \int_0^{\alpha} Q(t) C(t) dt$ — Tasa de restitución (%): $r = M_r/M_0$	Crítica de los resultados. Situación de la restitución en el contexto espacio-temporal del sistema kárstico.
Distribución de los tiempos de estancia (DTS): $h(t) = \frac{\varnothing(t)}{M_r}$ $Q = \text{cte: } h(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\alpha} C(t) dt}$ $Q \neq \text{cte: } h(t) = \frac{C(t) Q(t)}{\int_0^{\alpha} C(t) Q(t) dt}$	— tiempo medio de estancia: $\bar{t} = \int_0^{\alpha} t h(t) dt$ — velocidad media de tránsito: $\bar{V} = L \int_0^{\alpha} \frac{1}{t} h(t) dt$ — velocidad aparente de tránsito: $V_{ap} = L/\bar{t}$	Modalidades del tránsito del agua. Simulación del tránsito de un polucionante.

Tabla 1.— Diferentes parámetros calculados a partir de los resultados de un trazado (deducido de Lepiller y Mondain, 1986). L = distancia punto de inyección-punto de restitución. M_0 = masa de trazador inyectado.

C. Curva de flujo del trazador (flujo másico). Esta curva, obtenida como producto de las dos curvas anteriores para cada valor de t, representa la evolución temporal (días) del flujo del trazador (mg/s). La integración de esta curva permite calcular la masa de trazador restituído. La relación entre esta masa restituída y la masa inicialmente inyectada determina la tasa de restitución, cuyo conocimiento permite criticar los resultados del ensayo (LEPILLER y MONDAIN, 1986).

En efecto, una baja tasa de restitución del trazador en la surgencia implica, a pesar de la posible belleza de la curva, la existencia de fenómenos que no habían sido considerados a priori, tales como:

- Inyección inadecuada (mala dilución del trazador).

- Otros puntos de salida del trazador no controlados.

- Concentraciones de salida próximas a los límites del ruido de fondo.

- Adsorción del trazador utilizado (inadecuada elección del mismo).

- Restitución de parte del trazador fuera ya del período de control de la surgencia, debido a un cierto almacenamiento temporal del mismo en el acuífero.

- Mal conocimiento de la evolución de caudales durante el ensayo.

En una tal situación, los datos proporcionados por el ensayo deben ser utilizados con prudencia. En

cualquier caso, un ensayo con baja tasa de restitución informa sobre las precauciones a tomar para la realización de posteriores trazados.

D. Curva de distribución de los tiempos de estancia (DTS) (Fig. 5). Esta distribución representa la función de densidad de probabilidad que tiene una molécula de agua trazada de residir en el sistema un tiempo comprendido entre t y $t+dt$ (MOLINARI, 1976a). Constituye la respuesta impulsional de la parte del sistema involucrada en el ensayo (considerando la inyección puntual en el tiempo), en las condiciones concretas de realización del mismo. Se obtiene como relación entre el flujo másico y la masa de trazador restituída, y tiene validez siempre que la tasa de restitución sea aceptable.

A partir de la DTS se pueden calcular los siguientes parámetros (ver formulación en Tabla 1:)

Tiempo medio de estancia: Tiempo correspondiente a la abscisa del centro de gravedad de la curva (ha pasado la mitad de la masa restituída del trazador), contado este tiempo a partir del momento de la inyección.

Velocidad aparente de tránsito: Corresponde a la velocidad de desplazamiento del centro de gravedad de la nube del trazador a lo largo del trayecto entre el punto de inyección y el de restitución. Hace referencia, por tanto, únicamente al transporte hidráulico del trazador, sin considerar los fenómenos que le pueden afectar. La velocidad aparente puede ser relacionada con la conductividad hidráulica (Mangin, 1975).

Velocidad media de tránsito: Esta velocidad traduce macroscópicamente la media estadística de un conjunto de velocidades intergranulares microscópicas reales (CASTANY y MARGAT, 1977). Toma, por tanto, en cuenta todos los fenómenos físicos susceptibles de afectar al trazador (difusión, dispersión, adsorción-desorción...) a lo largo del trayecto subterráneo, ya que considera la DTS en su globalidad. Para una mejor simulación del tránsito de un eventual poluante es esta velocidad la que interesa.

Según MOLINARI (1976), la DTS es la información más completa de la que se puede disponer para conocer la modalidad de propagación del fluido a través del sistema. Permite además, caracterizar el sistema y compararlo bien con otros sistemas, bien con el mismo sistema pero en condiciones distintas.

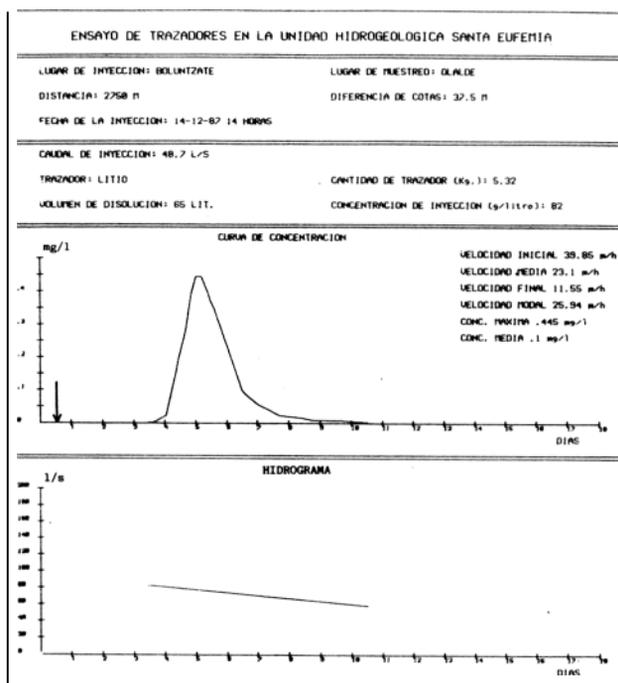


Fig. 4.— Ejemplo de representación gráfica, mediante ordenador, de las curvas deducidas de los datos de un ensayo con trazadores (datos de la inyección, curva de concentración, parámetros característicos, hidrograma).

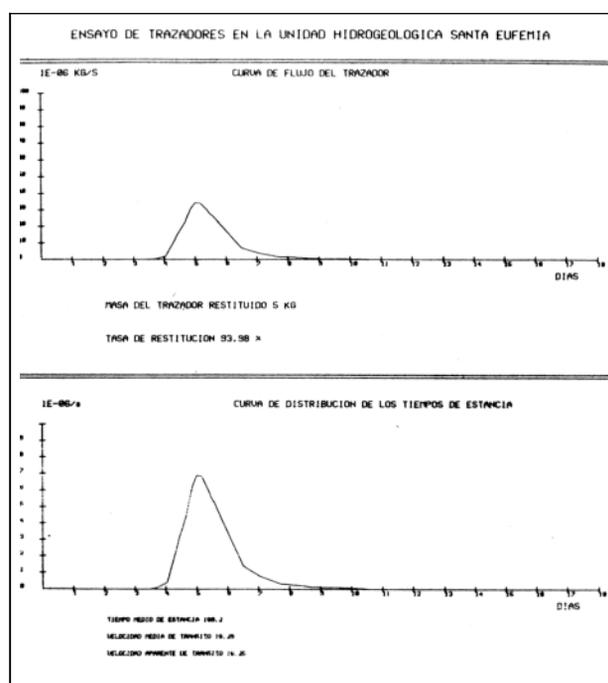


Fig. 4.— (Cont.) Curva de flujo del trazador, curva de distribución de los tiempos de estancia (DTS), y parámetros característicos.

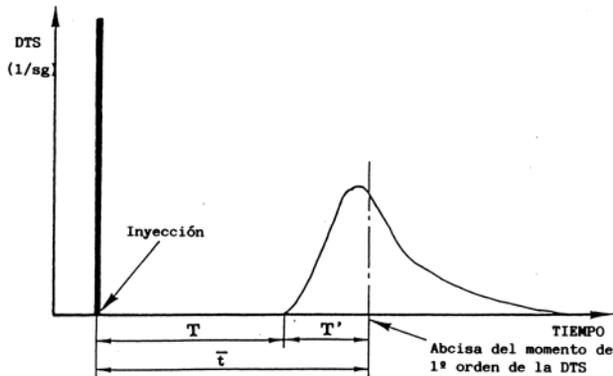


Fig. 5.— Determinación del tiempo medio de estancia del trazador en el sistema a partir de la DTS (Muet, 1985). DTS = Distribución del Tiempo de Estancia (Distribution du Temps de Séjour).

La DTS, considerada como respuesta impulsional de una inyección puntual, presentará diversas formas, para un mismo sistema acuífero, según el momento de realización del ensayo (aguas altas, estiaje) y según también el lugar de la inyección del trazador (pérdida conectada directamente con la surgencia mediante un dren; pérdida relacionada con un bloque capacitivo, de menor transmisividad).

MANGIN et al. (1976) encuentran curvas DTS estrechas y puntiagudas, con velocidades aparentes superiores a 100 m/h, en zonas de alta transmisividad (drenes), mientras que esas curvas se ensanchan, y proporcionan velocidades aparentes mucho

menores, en zonas de baja transmisividad (sistemas anexos), relacionado todo ello con las diferentes modalidades de flujo en el sistema trazado.

En consecuencia, esos mismos autores proponen establecer, para un mismo sistema acuífero, un catálogo de DTS que caracterice su funcionamiento hidrodinámico en las diferentes situaciones. He aquí el interés de la obtención e interpretación de la DTS y, por tanto, de la propia realización de los ensayos con trazadores.

3. CONCLUSIONES

Los fundamentos expuestos en este trabajo permiten la divulgación de la técnica de trazadores entre sus posibles utilizadores, entre los que se encuentran un importante número de grupos espeleológicos; ello favorecerá el que se realice un uso más experto de los trazadores y una interpretación adecuada y de carácter cuantitativo de los ensayos. Así, el objetivo de un trazado no será solamente la simple verificación de conexiones hidráulicas, ya que se pueden obtener informaciones de gran interés, tales como la modalidad de propagación y los parámetros de transferencia, que sirven para caracterizar hidrodinámicamente la parte del acuífero visitada por el trazador y, en definitiva, para alcanzar una cada vez mayor comprensión de la dinámica de las aguas en el karst.

BIBLIOGRAFIA

- ANTIGUEDAD, I. MORALES, T. & IBARRA, V.
1988 «Aplicación de los trazadores en la investigación hidrogeológica de los acuíferos kársticos». Bilbao. Proyecto de Investigación. UPV/EHU. 82 pp.
- CASTANY, G. & MARGAT, J.
1977 «Dictionnaire français d'hydrogéologie». Paris B.R.G.M. 250 pp.
- CUSTODIO, E.
1976 «Trazadores y técnicas radioisotópicas en hidrología subterránea». Hidrología subterránea. Barcelona. Ed. E. Custodio y M. R. Llamas. Ediciones Omega, Barcelona, Vol. II (12): 1161-1312.
- DREW, D. & SMITH, D.
1969 «Techniques for the Tracing of subterranean drainage». *British Geomorphological research group. Technical Bulletin* 2: 37 pp.
- FOURNEAUX, J. C. & SOMMERIA, L.
1986 «Utilisation de la méthode des traçages pour l'étude des aquifères en milieu calcaire». *Karstologia* 7:21-24.
- GUIZERIX, J. & MARGRITA, R.
1976 «Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masses». *La Houille Blanche* 3-4: 187-196.
- IBARRA, V., RAMON-LLUCH, R. ANTIGUEDAD, I. & MORALES, T.
1988 «Tratamiento en microcomputador de ensayos de trazado en sistemas hidrogeológicos». *II Congreso Geológico de España. Granada, Vol. II: 535-538.*
- JAMIER, D.
1976 «Interprétation des essais de traçage des eaux karstiques». 2.º Colloque d'hydrologie en Pays calcaire. *Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie, 3.º série, 25: 229-240.*
- LEPILLER, M. & MONDAIN, P.
1986 «Les traçages artificiels en hydrogéologie karstique». *Hydrogéologie* 1: 33-52.

LUTZ, T., PARRIAUX, A. & TISSIERES, P.

- 1987 «Traçage au gouffre du Chevrier (Préalpes vaudoises) et méthode d'identification de l'uranine à faible concentration». Bull. Centre d'Hydrogéologie, 7 pp 139-168. Neuchatel.

MANGIN, A.

- 1974, «Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques». Annales Spéléologie 29 (3): 233-332; 29 (4): 494-601; 30 (1): 21-124.

MANGIN, A., MOLINARI, J. & PALOC, H.

- 1976 «Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères». *La Houille Blanche* 3/4: 261-267.

MARJOLET, G.

- 1977 «Contribution à l'étude de la vulnérabilité à la pollution de l'aquifère karstique de la source du Lez». C.E.R.G.A. 5 pp. Montpellier.

MILANOVIC, P.T.

- 1981 «Application of tracers in karst hydrogeological investigations». *Karst Hydrogeology, WRP*: 268-289.

MOLINARI, J.

- 1976a «Perspectives offertes par l'utilisation rationnelle des traceurs naturels et artificiels en hydrologie karstique. Commentaires de nombreux exemples récents de multitraçages». *Annales scientifiques de l'Université de Besançon, Géologie*, 3.^a série, 25: 275-306.

MOLINARI, J.

- 197613 «Interactions avec le milieu et développements récents dans l'emploi de traceurs artificiels» *La Houille Blanche* 3/4: 197-204.

MUET, P.

- 1985 «Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du Causse de Martel (Corrèze)». Thèse de Doctorat de spécialité, Université d'Orléans, Laboratoire souterrain du CNRS, Moulis, 386 pp.

SALBIDEGOITIA, J. M.

- 1970 «Trazadores». *Kobie* 2: 25-37.

SCHOELLER, H.

- 1962 «Les eaux souterraines». Paris. Masson & Cie, 642 pp.