

TECNICAS DE CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA DE AMBIENTES PROFUNDOS

M. J. Turrero *, P. Gómez * y M. M. García *

RESUMEN

El estudio de los posibles emplazamientos de residuos radiactivos en un medio geológico cualquiera en profundidad, requiere la caracterización de los parámetros hidrogeológicos e hidrogeoquímicos que controlan la migración de los radionucleidos hacia la biosfera. Para llevar a cabo esa caracterización se ha desarrollado una metodología que incluye: (1) estudio sistemático y minucioso de sondeos profundos con el fin de seleccionar zonas favorables para el muestreo del agua y su caracterización; (2) sellado de las zonas seleccionadas mediante obturadores; (3) bombeo de agua de la zona aislada, mediante bombas o sistemas de elevación con gas, con el fin de eliminar la contaminación producida por el agua de perforación. El control de la limpieza se realiza mediante el seguimiento de trazadores y la estabilización de los parámetros físico-químicos del agua; (4) muestreo y análisis *in situ* de agua, gases, partículas, coloides y microorganismos, para lo cual se ha diseñado una unidad móvil de caracterización hidrogeoquímica (UMCH) que permite determinar *in situ* los parámetros más sensibles, evitando así los problemas de alteración debidos al transporte de las muestras.

Palabras clave: Almacenamiento de residuos, sondeos profundos, hidrogeoquímica, técnicas instrumentales, muestreo *in situ*, laboratorio móvil.

ABSTRACT

The characterisation of the hydrogeochemical parameters controlling the radionuclide migration towards the biosphere implicates the development of a methodology including instrumentation and equipment for working in deep boreholes, according with the data in which we are more interested. This methodology consists of a systematic and detailed study of the boreholes (studies on the cores, geophysical parameters, hydraulic tests...) that allows to select zones for water sampling and characterisation. The selected areas are adequately isolated with a double packer system and coupled instrumentation for pumping water (pumps or gas lift systems). The isolated zone is cleaned by pumping, and the tracer concentration, tritium measures or the control of the stabilization of physico-chemical parameters, are good indicators of the representativity of the sample. Water, gases, particles, colloids and microorganisms sampling is made in glove boxes and the analysis are made in a movil laboratory *in situ* for determining the more sensible parameters, avoiding the sample alterations with the transport.

Key words: Radiactive waste repository, deep boreholes, hydrogeochemistry, instrumental techniques, sampling *in situ*, mobil laboratory.

Introducción

La caracterización de las condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas de las zonas más profundas en un medio geológico dado, forma parte de los estudios sobre la seguridad de los posibles almacenamientos de residuos radiactivos, ya que el agua es el medio más común por el que un elemento radiactivo puede alcanzar la biosfera.

Para llevar a cabo estas investigaciones es necesario desarrollar y validar una serie de técnicas que permitan trabajar a grandes profundidades reflejando lo más fielmente posible las condiciones físico-químicas del entorno, y recoger toda la información necesaria para evaluar la magnitud de los procesos geoquímicos que tienen lugar en el medio seleccionado: características del agua a nivel regional y su relación con el lugar donde se sitúen los residuos, posible zona-

* División de Técnicas Geológicas, CIEMAT, Avenida Complutense, 22, 28040 Madrid.

ción de las aguas, procesos de solubilidad, especiación, procesos de retención de radionucleidos sobre superficies minerales, formación de pseudocoloides y su influencia en el transporte de radioelementos, influencia de los microorganismos, etc. Con todos los resultados obtenidos es necesario desarrollar modelos numéricos que indiquen finalmente la tasa de transporte radioelemento-agua a través del sistema geológico que rodeará al almacenamiento.

Las investigaciones sistemáticas en este campo han sido el objetivo de numerosos programas de investigación y se han desarrollado mucho recientemente en todo el mundo. Conviene destacar los trabajos realizados en Suecia, en lugares como la mina de Stripa (Fritz *et al.*, 1979; Andrews *et al.*, 1982; Gidlund, 1978 y Laurent, 1983), Äspö (Almen *et al.*, 1986 y Almen *et al.*, 1991) o Klipperas (Laurent, 1986); en Ontario (Canadá) (Bottomley *et al.*, 1984); en Grimsel (Suiza) (Gautschi *et al.*, 1989) y en varios puntos en Finlandia (Ohberg, 1991). Todos ellos han desarrollado sofisticadas técnicas de instrumentación y de muestreo en sondeos profundos, así como laboratorios móviles dotados con equipos capaces de hacer análisis químicos completos de un agua *in situ*.

En este trabajo queda reflejada la metodología y técnicas desarrolladas hasta ahora en nuestro país para un completo estudio hidrogeoquímico en zonas profundas en medios rocosos cristalinos. Actualmente ENRESA-CIEMAT lleva a cabo el desarrollo de una unidad móvil de caracterización hidrogeoquímica (UMCH) (Hernández *et al.*, 1991; Gómez *et al.*, 1992 y García *et al.*, 1992), que será empleada en las diversas fases de los programas de estudios hidrogeoquímicos en las áreas y zonas favorables, preferentes y potenciales.

Sondeos profundos. Selección de zonas favorables para la caracterización hidrogeoquímica

Para una buena caracterización hidrogeoquímica es necesario obtener muestras representativas de las zonas más profundas de los sondeos hechos para tal efecto, intentando evitar la contaminación por los fluidos de perforación. Por ello, para los trabajos de perforación se debe utilizar agua de composición química similar al de las aguas que se espera interceptar en profundidad y es necesario bombear el sondeo tan pronto como sea posible, una vez terminados los trabajos de perforación. Si fuera posible, se puede trazar el agua de perforación con elementos que no afecten la química del agua, como KBr, KI, rodamina..., que nos permitirán cuantificar la contaminación. Hay que hacer un seguimiento exhaustivo del trazador bombeando en distintos puntos hasta observar que los valores son próximos a los del fondo regional o,

en cualquier caso, menores del 2 % de la cantidad inicial añadida. Por otra parte, el contenido en tritio del agua de los sondeos, que da información acerca del tiempo de residencia de un agua en su entorno, es otra medida que proporciona importantes datos acerca del agua muestreada en una zona determinada.

La selección de las zonas más favorables para llevar a cabo los estudios hidrogeoquímicos se hace en función de: 1. observaciones hidrogeológicas durante la perforación; 2. estudios de los testigos de sondeo que informen sobre cambios litológicos en profundidad, densidad de fracturación de la roca y tipos de rellenos fisurales o de productos de alteración que evidencien el paso de agua en las fracturas; 3. orientación de las fracturas; 4. perfiles geofísicos; 5. datos de conductividad hidráulica; y 6. perfiles físico-químicos (pH, Eh,...).

La integración de los estudios en los sondeos permite seleccionar las zonas más interesantes teniendo en cuenta dos criterios: 1. elegir zonas en las que se observen fracturas importantes con circulación de agua suficiente para poder obtener muestras en períodos de tiempo razonablemente cortos sin forzar los flujos naturales; y, 2. seleccionar fracturas interesantes desde el punto de vista de la mineralogía de los rellenos, productos de alteración, etc., para poder hacer interpretaciones de los procesos de interacción radioelemento-agua-roca.

Sellado y limpieza de zonas favorables

Una vez seleccionadas las zonas preferentes de muestreo de agua, se instala un dispositivo de obturadores simple o doble en la sección elegida, para impedir la mezcla vertical de agua que se produce cuando el sondeo está abierto. De esta forma, el tramo queda aislado y se pueda proceder a la limpieza y muestreo del mismo. Los métodos de extracción de agua del tramo aislado que mejor se adaptan al sistema de obturación son dos. El primero consiste en una bomba sumergible de pistón acoplada al sistema de obturadores, que permite elevar el agua desde una diferencia de nivel de 300 m. Con el segundo sistema (fig. 1) el agua se eleva hacia la superficie mediante presión con gas utilizando una mezcla de gases compuesta por un 99 % de N₂ de alta pureza y un 1 % de CO₂. Los niveles piezométricos de cada tramo obturado en un sondeo se controlan, a medida que se bombea, a través de sensores que permiten interpretar si existe o no un buen sellado de la zona de estudio. Este sistema, desarrollado conjuntamente por personal del CIEMAT y del BGS (*British Geological Survey*), ha sido comprobado hasta los 500 m de profundidad con buenos resultados.

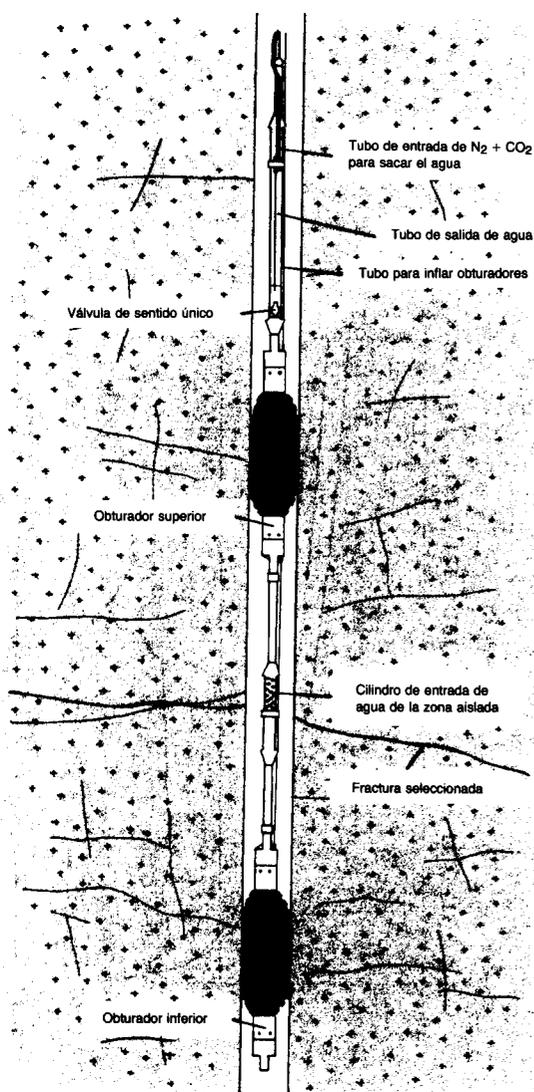


Fig. 1.—Esquema de la instrumentación para muestreo de agua dentro de un sondeo aislando una fractura por la que circula agua. El sistema de muestreo es por elevación con gas.

Se puede instalar un sistema alternativo de obturación que permite aislar de forma permanente y simultánea varios niveles dentro de un sondeo. Existen varios sistemas de este tipo desarrollados por distintos países. Entre ellos está el sistema Westbay Canadiense (Bottomley *et al.*, 1984) o los sistemas de múltiple obturación diseñados por equipos de SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management) para muestreo y seguimiento de sondeos a profundidades de más de 1.000 metros (Almen *et al.*, 1991).

Para la limpieza de la zona aislada es necesario bombear el agua muy lentamente (pocos mililitros por minuto), para no forzar flujos desde otras zonas. Asimismo, para controlar la representatividad del

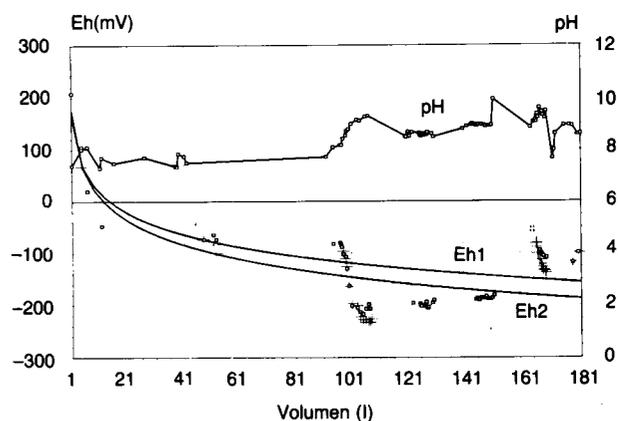


Fig. 2.—Curvas de estabilización de los parámetros físico-químicos del agua de una fractura aislada con obturadores.

agua que estamos obteniendo se mide el contenido en trazador, de la misma forma que se hace para controlar la limpieza del sondeo completo. De forma complementaria, se mide el contenido en tritio de las muestras para conocer el tiempo de residencia del agua en su entorno y la posibilidad o no de contaminación externa. También, es necesario mantener un control exhaustivo de los parámetros físico-químicos del agua (pH, Eh, T, O₂ y C.E) hasta observar una estabilización de los mismos (fig. 2). La limpieza del sondeo en un caso ideal implica una disminución progresiva de la concentración del trazador hasta concentraciones muy bajas o próximas a cero y una estabilización de los parámetros físico-químicos del agua en valores típicos de un agua subterránea. El muestreo de agua se realizaría en el momento en el que se alcanzasen estos requisitos.

El agua bombeada durante este proceso ha de ser controlada sin alterar sus condiciones naturales, por lo que se hace imprescindible efectuar la determinación de estos parámetros físico-químicos a través de una celda de flujo continuo dentro de una cámara de guantes con atmósfera inerte (99% N₂ + 1% CO₂) (fig. 3). La concentración de O₂ dentro de la cámara de guantes no será superior a 200 ppm.

En zonas de baja permeabilidad, la limpieza puede durar varios meses hasta que el agua que obtenemos sea agua de la formación en la zona seleccionada, que ha reemplazado totalmente el agua de perforación.

Muestreo y análisis de agua representativa. Caracterización hidrogeoquímica

Una vez que se tiene el agua representativa, se procede al estudio exhaustivo de todos los parámetros

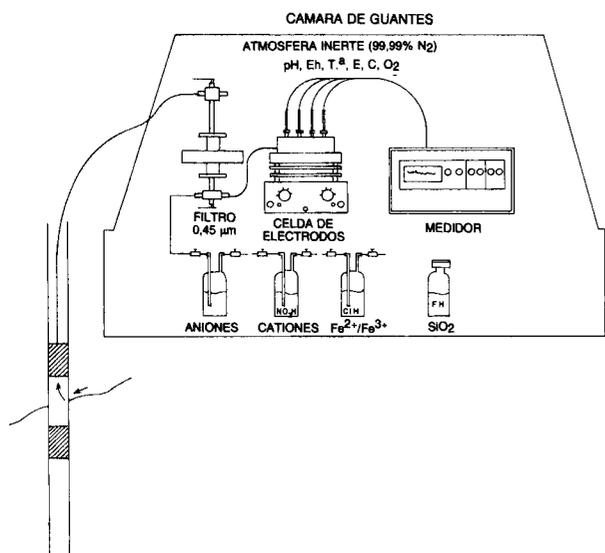


Fig. 3.—Esquema de procedimiento técnico para la determinación de los parámetros físico-químicos del agua en zonas de interés.

del agua que nos permitan hacer una buena interpretación hidrogeoquímica. Para ello, se hace el muestreo y análisis químico e isotópico del agua, muestreo y análisis de gases, partículas y coloides y muestreo para estudios microbiológicos. Para muestrear se utiliza el mismo equipo e instrumentación que se ha descrito para la limpieza de zonas representativas.

Todo el proceso de preparación y análisis de la muestra debe hacerse, en la medida de lo posible, en continuo a medida que se está muestreando, para evitar alteraciones con el paso del tiempo y con el transporte. Estos problemas se solucionan trasladando el laboratorio de análisis al campo, es decir, con el desarrollo de unidades móviles que permiten caracterizar todos los parámetros necesarios y, sobre todo, los más sensibles, en el lugar de interés. Para ello se ha desarrollado una unidad móvil de caracterización hidrogeoquímica (UMCH) en la que se realizarán todos los muestreos y análisis, en cámaras de guantes para mantener unas condiciones inertes que alteren lo menos posible las muestras. Cada tipo de muestreo necesita una metodología específica descrita ampliamente en distintos trabajos, Gómez *et al.* (1992), Nordstrom *et al.* (1985), Moulin *et al.* (1992a) y Gómez *et al.* (1993).

Cada análisis hidroquímico dentro de la UMCH está sometido a un control de calidad, consistente en la verificación de la competencia técnica y la fiabilidad de los equipos utilizados y en hacer múltiples análisis comparativos sobre cada una de las muestras. Para que dicha unidad tenga autonomía propia, en cuanto a muestreo y análisis, consta de dos vehícu-

los, uno dedicado a equipamiento e instrumentación de los sondeos, que permita desarrollar el procedimiento de muestreo, y otro que funciona como laboratorio analítico. A continuación se expone con detalle el desarrollo de dicha unidad.

Diseño y construcción de la UMCH

Objetivos y aplicaciones

Los principales objetivos de la UMCH son:

1. Muestrear y caracterizar las aguas subterráneas en sondeos de hasta 600 m de profundidad y de diámetro superior a 75 mm;
2. Determinar «downhole» los parámetros físico-químicos más sensibles en las aguas: pH, Eh, T, O₂ y conductividad eléctrica mediante la sonda geoquímica Idronaut;
3. Determinar *in situ* los componentes clasificados como muy sensibles y sensibles al transporte, reduciendo así las alteraciones químicas de las muestras debidas a la modificación de las condiciones naturales sufridas durante el transporte;
4. Controlar la representatividad de las muestras en función de: a) la estabilidad del quimismo de las especies iónicas más características de la formación; b) la concentración de trazadores y c) en determinados casos, a través del contenido en Tritio;
5. Minimizar el trabajo manual con funciones automáticas;
6. Monitorizar e interpretar el conjunto de datos obtenidos con programas adecuados compatibles para su uso con cualquier microprocesador;
7. Definir las facies hidrogeoquímicas del área de estudio, así como los procesos termodinámicos del equilibrio agua-roca. Sólo en el caso de no poder hacer un análisis muy específico en la UMCH, la muestra se trasladará a los laboratorios donde se vayan a realizar los análisis, en las mejores condiciones posibles y manteniéndolas a una temperatura de 4° C.

Requisitos

Los requisitos que debe cumplir la UMCH son:

1. Versatilidad de actuación en cuanto a diferentes tipos de aguas y de emplazamientos, lo que implica que la unidad móvil ha de tener la instrumentación adecuada y la posibilidad de acceso a todo tipo de emplazamientos, aún en condiciones topográficas difíciles y,
2. Autonomía en las operaciones de mantenimiento y/o reparación de averías. Para ello se ha de disponer de equipos de fácil mantenimiento y de personal altamente cualificado.

Criterios de selección de parámetros a determinar

Los parámetros y operaciones que se van a realizar *in situ* se han de establecer con un criterio de prio-

ridad en función de lo crítico que sea el parámetro a determinar y su sensibilidad frente a los agentes externos. Una clasificación de estos parámetros sería:

1. Parámetros muy sensibles: entre ellos se encuentran las variables principales del agua, pH, Eh, pO_2 y pCO_2 . Es aconsejable medirlos *in situ* mediante sondas geoquímicas. Entre estos parámetros se encuentran también, las caracterizaciones de coloides, bacterias y moléculas orgánicas de alto peso molecular.
2. Parámetros sensibles: se pueden clasificar dentro de este grupo la conductividad, alcalinidad, CO_3^{2-} , PO_4^{3-} y las concentraciones de los pares redox Fe(II)/Fe(III), SO_4^{2-}/S^{2-} , NO_3^-/NO_2^- entre otros.
3. Parámetros menos sensibles: son los elementos mayoritarios tanto de aniones como de cationes, así como los elementos traza.

Vehículos que componen la UMCH

Dado que las actividades de muestreo y análisis están claramente diferenciadas, aunque se complementan, es necesario separar las mismas en dos vehículos: 1. Vehículo para el muestreo, que llevará el material necesario para instrumentar los sondeos, bombear las zonas de interés y realizar el control de niveles en los tramos obturados; y 2. Vehículo de análisis, dedicado a cumplir los objetivos de caracterización hidrogeoquímica, que irá dotado de instrumentación analítica muy sensible y equipamiento propio de un laboratorio (fig. 4). La Unidad se complementará con un tercer vehículo de apoyo al personal para sus traslados. La descripción técnica completa de los vehículos todoterreno se puede encontrar en García *et al.* (1992).

1. Vehículo de muestreo (fig. 5a).

Dentro del vehículo se han instalado, en un lateral, dos balas de gas, con ventilación al exterior que permitirán el inflado del sistema de obturadores. En el interior del furgón se dispone de un banco de trabajo y armarios de herramientas. El vehículo lleva incorporado un grupo electrógeno diesel de 16,2 Kva situado en la parte delantera de la unidad que distribuye energía eléctrica (220 V) a los equipos que así lo requieran y a la iluminación interna del furgón.

El vehículo de muestreo tiene como objetivo principal la obtención de muestras de agua representativas, de zonas hidráulicamente activas aisladas con sistemas de obturadores, y la realización, si fuese necesario, de ensayos específicos para determinar las características hidráulicas de la zona de estudio.

El material necesario para la realización de los ensayos hidráulicos y para instrumentar los sondeos para el muestreo es: Transmisores de presión conectados a data loggers (Terra) que permitirán medir y

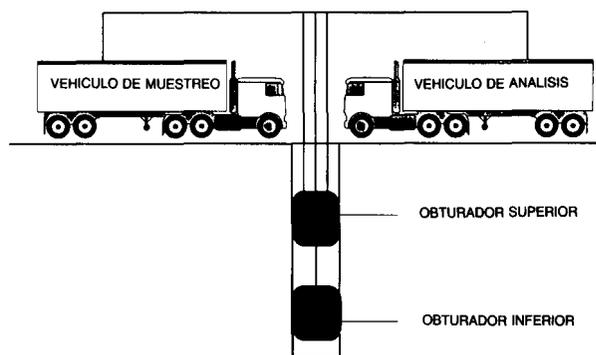


Fig. 4.—Vehículos que componen la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeoquímica (UMCH) con el esquema de procedimiento a pie de sondeo.

almacenar las variaciones de los niveles de agua en los tramos obturados en función del tiempo; obturadores neumáticos que sellen la zona de estudio, cableantes de cables de acero con conductores internos, trípodes extensibles y desmontables, bombas sumergibles de pistón (Bennett) con capacidad de elevación del agua hasta 300 m y un compresor de aire rotativo, indispensable para el funcionamiento de las bombas.

Para la recuperación y tratamiento de datos se cuenta con un ordenador portátil Tandon Notebook 386/sx, un Macintosh de 40 Mb y el software correspondiente.

2. Vehículo de análisis (fig. 5b).

El furgón del vehículo de análisis tiene una puerta lateral con cierre de seguridad y dos ventanas con doble cristal y cámara de aire intermedia. El objetivo es mantener una atmósfera limpia y aislada, en lo posible, de los agentes externos (partículas en el aire, temperatura, etc.). Además se incorporará un extractor de humos, aire acondicionado, dos balas de gas en la parte trasera del furgón y un frigorífico cuya energía proviene de cuatro paneles solares orientables, situados en el techo del furgón y conectados a un acumulador, lo que permite el funcionamiento ininterrumpido durante 24 horas.

Dos grupos electrógenos diesel de 8 Kva cada uno, irán instalados en la zona delantera a cada lado del furgón. La red de encendido y distribución de la energía eléctrica a todos los equipos, se accionará a través de un Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI). Todas las instalaciones eléctricas serán exteriores e irán protegidas mediante un diferencial correctamente dimensionado.

El laboratorio incluye dos depósitos de agua: uno de agua limpia con una capacidad de 400 l, provisto con una bomba eléctrica para el suministro de agua

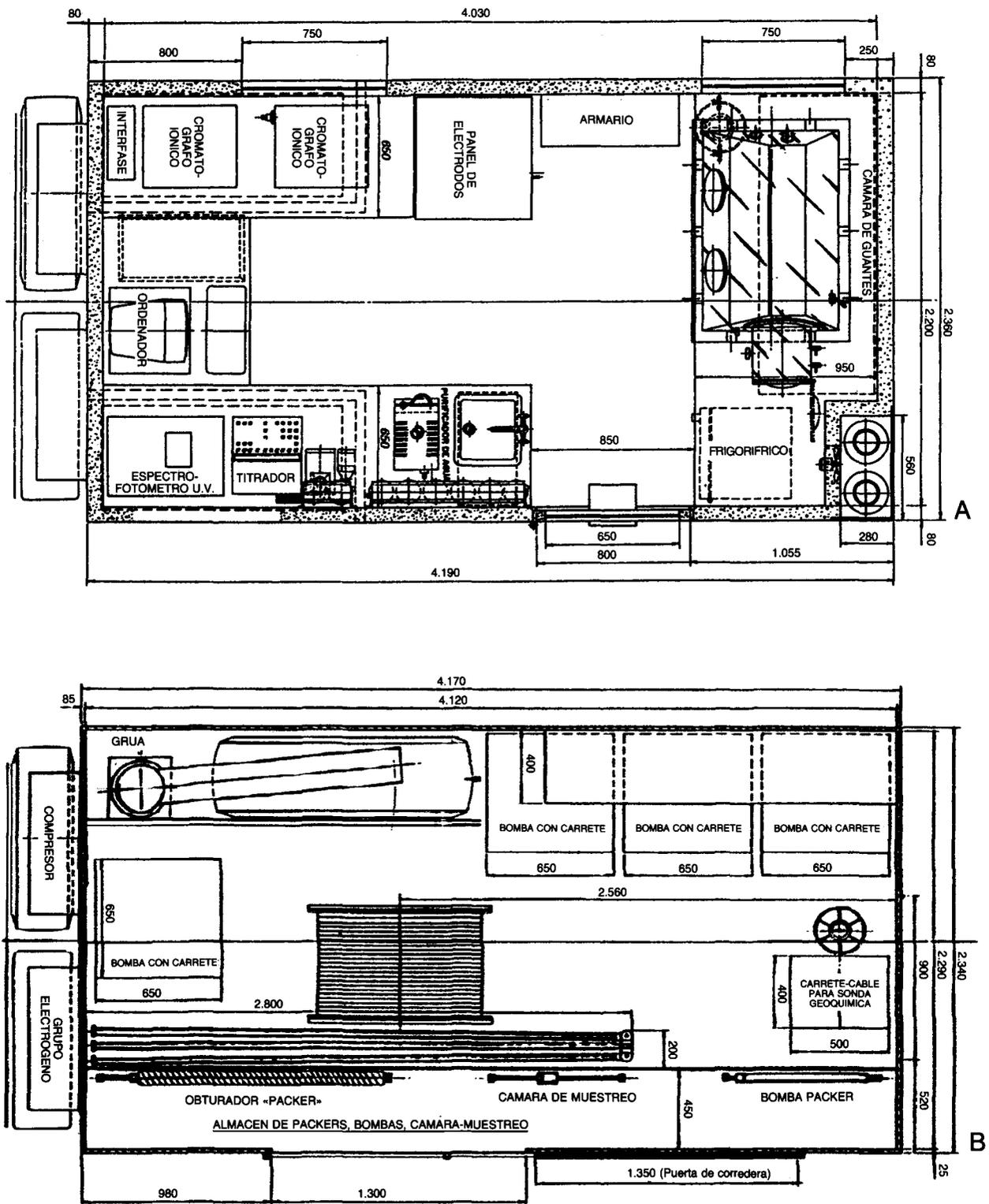


Fig. 5.—Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeoquímica (UMCH): a) Esquema del diseño del vehículo de muestreo; b) Esquema del vehículo de análisis.

al fregadero y a la línea de tratamiento de agua (desionizador y purificador), y otro depósito de agua residual con capacidad para 75 l.

El vehículo de análisis transportará en su interior todo el equipamiento necesario para las determinaciones *in situ* de los parámetros químicos considerados como más críticos. Ello implica que los equipos analíticos de tecnología sofisticada y delicada deberán sufrir lo menos posible las vibraciones y movimientos bruscos debido al transporte y deberán contar, por ello, con una suspensión especial que ha sido diseñada en el CIEMAT (Figarola, 1993) para este vehículo.

Los equipos de caracterización incorporados en el vehículo son los siguientes:

Espectrofotómetro: El espectrofotómetro es un Diodo-Array Helwett-Packard 8452A, con un rango de longitud de onda de 190-820 nm \pm 2 nm.

Cromatógrafo iónico: Este equipo es un Dionex-300 equipado con columnas aniónicas y catiónicas.

Titroprocesador: El modelo del titroprocesador es Metrohm 682 con una bureta automática y tres unidades intercambiables con distintas soluciones títantes.

Microprocesador: El ordenador que controla los programas de cada uno de los equipos es un Tandon 486/33 MHz, con un disco duro de 200 Mb y cuatro puertos de serie y tres paralelo.

Panel de electrodos: Su finalidad es la medida a través de celdas de flujo continuo de los parámetros físico-químicos más sensibles y de algunas concentraciones de haluros con electrodos selectivos. Las medidas se realizarán preservando las condiciones anóxicas del sistema y el control de los resultados de cada uno de los electrodos se realizará a través de un microprocesador 386/33 MHz.

Cámara de guantes: construida en plástico acrílico rígido que elimina la posibilidad de porosidad al oxígeno. Dentro de la cámara se prepararán las muestras que deban ser determinadas *in situ* en el vehículo de análisis, y las que deban ser transportadas para otras determinaciones. La obtención de los concentrados de coloides y su fraccionamiento (ultrafiltración), también será efectuada en esta cámara.

Desionizador de agua: Es una línea de tratamiento de agua con el objeto de obtener agua con una calidad de 20 microsiemens (filtrada por 0,22 micras) y a una producción diaria de 50 l en 8 horas.

Balanza analítica: modelo Sartorius BA210S, con una capacidad máxima de 210 g y calibración externa automática.

Sonda geoquímica: modelo Idronaut Ocean Seven 501. Está equipada con seis sensores de medida: presión, temperatura, pH, Eh, conductividad eléctrica y

Tabla 1.—Parámetros determinados *in situ* en el vehículo de análisis e instrumentación analítica empleada

Parámetros	Instrumentación
Parámetros muy sensibles <i>downhole</i> pH, Eh, T, Cond. Eléctrica Oxígeno disuelto	Sonda Geoquímica «Ocean Seven 501»
pH, Eh, T, Cond. Eléctrica O ₂ , Cl ⁻ , I ⁻ , Br ⁻ , S ⁼ , NH ₄ ⁺ , CO ₂	Sondas de Medida y Electrodo Selectivos
Alcalinidad (HCO ³⁻), Ca ₂ ⁺ , Mg ₂ ⁺	Titroprocesador Metrohm 682
Li ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁺ , Mg ₂ ⁺ , Ca ₂ ⁺ , Sr ₂ ⁺ , Ba ₂ ⁺ , F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , SO ₄ ⁼ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻	Cromatógrafo Iónico «Dionex DX-300»
Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , SiO ₂ , Cu, NH ₄ ⁺ , PO ₄ ⁼ , S ⁼ , NO ₂ ⁻	Espectrofotómetro (Diodo-Array) HP 8452A

Tabla 2.—Parámetros determinados fuera del laboratorio móvil, en distintos laboratorios de análisis

Parámetros	Instrumentación
Al	Cámara de Grafito
Elementos Traza	ICP
U	Fluorimetría
TOC	Analizador C orgánico
Gases: N ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂	Cromatografía de gases
Isótopos: 86Sr/87Sr, 13C/14C, 18O, 129I, D, 3H, 234U/238U, 36Cl, 34S	

oxígeno disuelto. La profundidad de trabajo es de 600 m en sondeos de diámetro superior a 75 mm.

Los parámetros que serán medidos *in situ* y la instrumentación analítica empleada para cada determinación quedan reflejados en la tabla 1. Las muestras para la determinación del resto de parámetros de interés se prepararán adecuadamente y se analizarán en los laboratorios de CIEMAT o en otros laboratorios. Estos parámetros son los indicados en la tabla 2.

La instrumentación analítica del vehículo laboratorio ha sido definida en función de los parámetros a determinar, expuestos anteriormente. Los equipos que se han elegido, así como, los métodos de trabajo, permiten determinaciones rápidas y fiables.

El sistema de compatibilización y conexión de los distintos equipos analíticos, se resuelve a través de interfaces que conectan cada uno de los equipos con el ordenador 486/33, siendo éste quien gobierna las funciones a través de los programas de software originales de cada instrumento. La forma de trabajo será gestionada y coordinada en forma de unitarea.

Tratamiento de los resultados

La interpretación de los datos analíticos obtenidos se hace mediante tratamientos estadísticos y con la ayuda de los códigos de especiación geoquímica (WATEQ4F, PHREEQE...). El resultado final debe ser el desarrollo de un modelo de funcionamiento hidrogeoquímico de la zona y de modelos numéricos que indiquen finalmente la tasa de transporte radioelemento-agua a través del sistema geológico que rodeará el almacenamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de la asociación ENRESA-CIEMAT.

Referencias

- Almen, K. E., Anderson, O., Fridh, B., Johansson, B. E., Sehlstedt, M., Gustafsson, E., Hanson, K., Olson, O., Nilsson, G., Axelsen, K. y Wikberg, P. (1986). Site investigation equipment for geological, geophysical, hydrogeological and hydrochemical characterization. *SKB Technical Report*, 86-16.
- Almen, K. E. y Zellman, O. (1991). Äspö Hard Rock Laboratory. Field Investigation methodology and instruments used in the preinvestigation phase, 1986-1990. *SKB Technical Report*, 91-21, 140 págs.
- Andrews, J. N., Giles, I. S., Kay, R. L. F., Lee, D. J., Osmond, J. K., Cowart, J. B., Fritz, P., Barker, J. F. y Gale, J. (1982). Radioelements, radiogenic helium and age relationships for groundwaters from the granites at Stripa, Sweden. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 1533-1543.
- Bottomley, D. J., Ross, J. D. y Graham, B. W. (1984). A Borehole Methodology for hydrogeochemical Investigations in Fractured Rock. *Water Resour. Res.*, 20, 1277-1300.
- Figarola, J. M. (1993). Vehículo de análisis laboratorio. Suspensión especial neumática y distribución del carrozado. *Informe CIEMAT-1993*.
- Fritz, P., Barker, J. F. y Gale, J. E. (1979). Geochemistry and isotope hydrology of groundwaters in the Stripa Granite. *Rep. LBL-8285*, Univ. of Calif., Lawrence Berkeley Lab., Berkeley.
- García, M. M. y Gómez, P. (1992). Anteproyecto de la Unidad Móvil de Caracterización Hidroquímica. Versión 2. *Informe CIEMAT-1992*.
- Gautschi, A. y Scholtis, A. (1989). Technique d'échantillonnage et analyses des eaux souterraines des forages profonds. *Cédra informe 3 + 4/89*. Cédra. Gidlung, G. (1978): Analysis and age determinations of groundwater at great depths. *KBS Tech. Rep.*, 62, Swedish Environ. Res. Inst., Stockholm.
- Gómez, P., García, M. M. y García, M. (1992). Anteproyecto de la Unidad Móvil de Caracterización Hidroquímica. Versión 1. *Informe CIEMAT-1992*.
- Gómez, P. y Turrero, M. J. (1992). Ciemat's groundwater and colloid sampling program. EB-CIEMAT(92)49. Interim Report.
- Gómez, P., Turrero, M. J., Moulin, V. y Magonthier, M. C. (1992). Characterization of natural colloids in groundwaters of El Berrocal, Spain. In: *Water-Rock interaction 7* (Kharaka, Y. K. y Maest, A. S. edit.) 797-800.
- Gómez, P., Turrero, M. J., Mingarro, M., Tejedor, E. y Collado, P. (1993). First approach in the hydrochemical model of El Berrocal. EB-CIEMAT(93)9. Interim Report.
- Hernández, A., Gómez, P. y García, M. (1991). Anteproyecto de la Unidad Móvil de Caracterización Hidroquímica. Versión 0. *Informe CIEMAT-1991*.
- Laurent, S. (1983). Analysis of groundwater from deep boreholes in Svartboberget. *KBS Tech. Rep. TR-83-19*, Swedish Environ. Res. Inst., Stockholm.
- Laurent, S. (1986): Analysis of groundwater from deep boreholes in Klipperas. *SKB Tech. Rep. TR-86-17*, Swedish Environ. Res. Inst., Stockholm, 34 págs.
- Moulin, V., Magonthier, M. C., Theyssier, M., Petit, J. C., Dran, J. C., Pieri, J., Goudard, F., Bioret, A., Milcent, M. C., Della Mea, G., Wolfrum, C., Gómez, P., Turrero, M. J., Rivas, P., Grindrod, P., Brown, R. y Gealy, N. (1992a). The role of colloids in the transport of radionuclides in geological media. 1st semestrial report. DSD n.º 54.
- Nordstrom, D. K., Andrews, J. N., Carlsson, L., Fontes, J.-C., Fritz, P., Moser, H. y Olsson, T. (1985). Hydrogeological and Hydrogeochemical Investigations in Boreholes - Final report of the phase I geochemical investigations of the Stripa groundwaters. *Technical Report SKB*, 85-106.
- Ohberg, A. (1991). Site investigation equipment developed by Teollisuuden Voima Oy. *Report YJT-91-06*, S&R Cons. Eng., Helsinki, 49 págs.
- Turrero, M. J. y Gómez, P. (1990). Estudio hidroquímico de las aguas de El Berrocal. Informe interno. CIEMAT 1990.