

# Desarrollo de técnicas isotópicas para la exploración de las aguas en el Sahel

*Un proyecto en Senegal, Malí y Camerún que permitirá a los científicos conocer más sobre los limitados recursos hídricos de la región del Sahel*

por  
Jean François  
Aranyossy,  
Didier Louvat  
y  
Mokdad  
Maksoudi

Los períodos de sequía que han venido afectando a la región del Sahel durante los dos últimos decenios hacen patente la precaria situación de las reservas de aguas superficiales y la necesidad de hacer un uso más sistemático de los recursos de aguas subterráneas. Durante años, se han venido emprendiendo amplios programas relativos a la explotación de aguas subterráneas en toda la región del Sahel, conforme a las recomendaciones formuladas a través del Decenio Internacional para el Suministro de Agua Potable y de Saneamiento. En cuestión de años se han perforado miles de pozos, especialmente en el marco de numerosos proyectos de "suministro de agua a las zonas rurales".

Sin embargo, los acuíferos explotados precipitadamente resultaron ser en muchos casos vulnerables tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. Como resultado de ello, se iniciaron estudios globales paralelos con miras a explorar los recursos hídricos de estos países. Estos estudios abarcaron todos los aspectos de la hidrología y la hidrogeología con el objetivo de desarrollar modelos para el manejo de las aguas basados en el conocimiento más amplio posible de las características de los acuíferos.

En este contexto, a principios del decenio de 1980 el OIEA inició sus primeras actividades en la esfera de la hidrogeología en Malí, Níger y Senegal por conducto de su programa de cooperación técnica. Las actividades incluían, ante todo, estudios de acuíferos locales con isótopos ambientales, los cuales resultaron ser particularmente útiles para obtener información concreta, por ejemplo, sobre la relación entre los acuíferos o entre el agua superficial y la subterránea, y sobre la ocurrencia o no de

recarga reciente. Por otra parte, el OIEA creó la infraestructura básica necesaria para la aplicación de técnicas con trazadores artificiales y el uso de instrumentos nucleares en la hidrología y la hidrosedimentología.

Varios factores apuntaban hacia la necesidad de coordinar las actividades científicas que ya se estaban realizando mediante los proyectos bilaterales existentes. En primer lugar, la corriente de información "horizontal" era muy deficiente a pesar de las similitudes existentes entre los problemas hidrológicos e hidrogeológicos que se encuentran en los tres países. En segundo lugar, las fronteras políticas por lo general no coincidían con los límites de las cuencas hidrológicas, de modo que varios países podían compartir un mismo acuífero. En tercer lugar, la costosa infraestructura establecida por el OIEA en algunos países merecía ser utilizada a nivel regional.

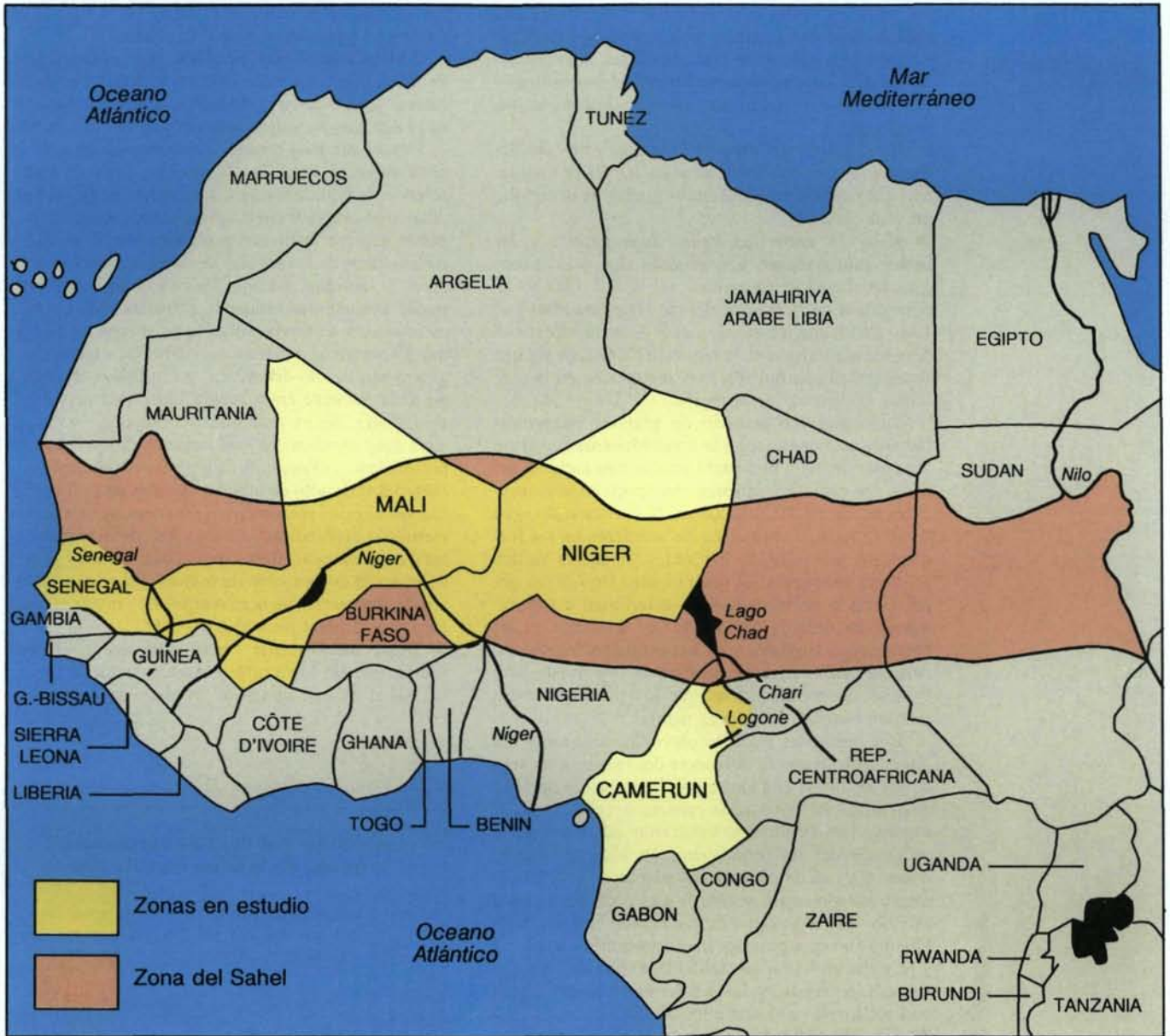
Para hacer frente a estos problemas, hace cuatro años comenzó a ejecutarse en África un proyecto regional para el desarrollo de técnicas isotópicas nucleares en la esfera de la hidrología en los países del Sahel. Entre sus objetivos principales estaban la profundización de los estudios en curso en los países participantes, el fortalecimiento de la capacitación, la promoción del intercambio de información sobre distintos estudios realizados con anterioridad, el fomento de la cooperación entre los distintos institutos que participaban en estos estudios y el robustecimiento de las infraestructuras establecidas por el OIEA y su utilización en la región.

Tras cuatro años de estudios, el proyecto ha dado importantes resultados que dan fe de la activa colaboración de todas las partes participantes. En este artículo se resumen las esferas fundamentales de investigación y los principales resultados obtenidos hasta el momento.

El Sr. Aranyossy es experto regional del OIEA con sede en Dakar, Senegal. El Sr. Louvat es funcionario de la Sección de Hidrología Isotópica del OIEA y el Sr. Maksoudi es funcionario de la División de Programas de Cooperación Técnica del OIEA. Las fotos han sido cedidas gentilmente por el Sr. Aranyossy

## Estudios temáticos conjuntos sobre problemas hídricos

En hidrología suele ser difícil elaborar modelos sobre el manejo de los recursos hídricos subterráneos



La región del Sahel está ubicada en zonas donde la precipitación alcanza entre 50 y 500 milímetros anuales. El régimen de lluvias es irregular, los periodos de sequía son severos y recurrentes y el agua superficial es escasa. En los inmensos acuíferos sedimentarios que se llenaron durante anteriores periodos húmedos en Africa septentrional hay una fuente sostenible de agua potable. Hoy día estos embalses naturales de aguas subterráneas se someten a estudios y exploraciones exhaustivos basados a menudo en el uso de técnicas isotópicas, como es el caso del proyecto regional del OIEA en que participan Senegal, Malí, Níger y Camerún.

Bajo el tórrido sol del desierto de la región de Bilma, en la zona oriental del Níger, un equipo de investigadores del proyecto toma muestras de arena en una duna para el análisis isotópico de la humedad del suelo. Esta información permite cuantificar las pérdidas de agua que se producen en el nivel piezométrico de los acuíferos profundos por la evaporación a través de la zona no saturada.

en regiones áridas y semiáridas. Las dificultades radican fundamentalmente en la estimación de la recarga y la evaporación real, la escasa información disponible sobre las características hidrodinámicas y las condiciones existentes en los límites de los acuíferos.

En el marco del proyecto regional estos problemas se abordan mediante estudios temáticos conjuntos, que han alcanzado distintos grados de desarrollo en cada país.

● **Relación entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas.** Los grandes ríos y los pocos grandes lagos permanentes (el Lago Guiers en Senegal, el delta interior del río Níger en Malí y el Lago Chad) son las únicas masas de agua superficial perenne que existen en la región del Sahel, de ahí que desempeñen una función muy importante en la economía tradicional de la región.

La entrada en servicio de grandes estructuras hidráulicas (por ejemplo, la presa Manantali en el río Senegal) sin duda fomentará un uso más racional del agua. Sin embargo, sabemos muy poco de las consecuencias de esta regulación de la corriente de agua sobre la recarga natural de los acuíferos en las formaciones aluviales de los valles, o acerca de los acuíferos sedimentarios de la región. Uno de los objetivos de la investigación era determinar los mecanismos de recarga natural de los acuíferos en las formaciones aluviales y en los acuíferos sedimentarios regionales adyacentes. Esto es importante para evaluar las consecuencias que las presas fluviales podrían tener en la recarga natural.

Los resultados iniciales obtenidos a lo largo del Níger indican que la influencia del río en la recarga de los acuíferos a la altura del Tombouctou en Malí abarcaría a lo sumo unas cuantas decenas de kilómetros. Los resultados mostraron además que la influencia del río sería menor en Niamey, Níger, donde el canal de poco caudal parece estar prácticamente aislado de los acuíferos aluviales. En Senegal estudios que se llevan a cabo en colaboración con la Oficina francesa para las investigaciones científicas y técnicas en Ultramar (ORSTOM) han demostrado que el lago Guiers y los acuíferos adyacentes están casi totalmente aislados unos de otros.

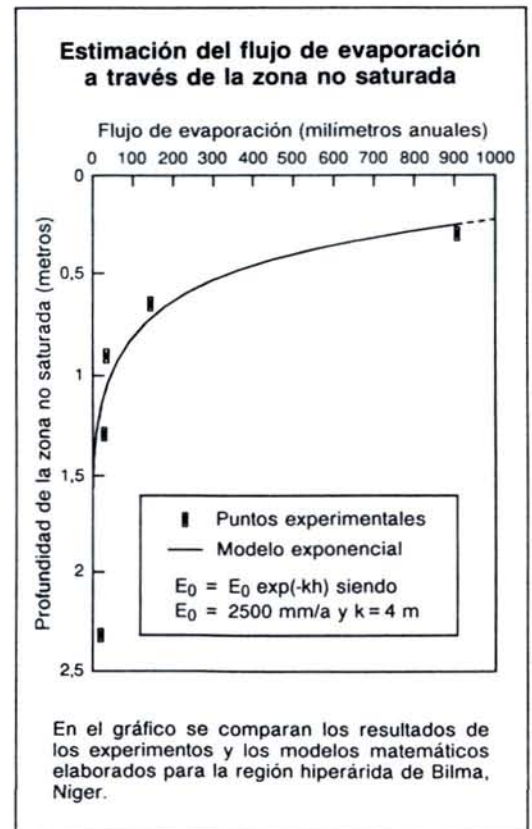
● **Transferencia de agua a la zona no saturada.** Estos estudios se basan fundamentalmente en la interpretación de los perfiles químicos e isotópicos del agua retenida en el suelo entre la superficie y el nivel de las aguas subterráneas. Estos métodos se han aplicado principalmente en Senegal y Níger en colaboración con el British Geological Survey y el Laboratorio de Hidrología y Geoquímica Isotópica de la Universidad de París XI en Francia.

**Estimación de la infiltración efectiva.** La búsqueda del valor máximo de la curva de distribución del tritio derivado de anteriores ensayos termonucleares en la atmósfera es, en estos momentos, prácticamente inaplicable en zonas templadas húmedas (ya que el tritio, por lo general, ha llegado al nivel de las aguas subterráneas). Sin embargo, el método de investigación sigue siendo muy útil en zonas áridas y semiáridas donde la infiltración es escasa y la zona no saturada es muy profunda. Investigaciones realizadas en el norte del Senegal así lo han demostrado a 25 metros de profundidad. Los cálculos de la infiltración efectiva concuerdan con los cálculos

del balance de cloruros existente entre el agua de lluvia y el agua de la zona no saturada.

**Estimación de las pérdidas por evaporación.** Estudios teóricos y experimentos realizados en laboratorio o en columnas de sedimento en condiciones naturales han permitido conocer que la evaporación concentra isótopos pesados fundamentalmente en la parte superior, entre las zonas dominantes de transferencia de líquido y vapor. La estimación de las pérdidas por evaporación en condiciones estacionarias puede hacerse mediante la elaboración de modelos matemáticos de los perfiles de isótopos estables de la zona no saturada. Además, la tasa de infiltración se puede evaluar determinando el balance de cloruro entre el agua de lluvia y el agua de la zona no saturada. Experimentos llevados a cabo en diversas regiones semiáridas del África, y resultados obtenidos en fecha reciente en la región hiperárida de Bilma, en el Níger, demuestran que esta evaporación disminuye muy rápidamente con la profundidad del nivel piezométrico. (Véase el gráfico). La evaporación superficial sería sólo de algunas decenas de milímetros cuando el nivel piezométrico estuviera situado a dos metros de profundidad. En las zonas de descarga natural de grandes acuíferos regionales, la mejor forma de evitar la evaporación de millones de metros cúbicos de agua sería entonces bombear y utilizar el agua para que el nivel piezométrico baje.

● **Agua subterráneas "muy antiguas" y paleohidrología.** En los acuíferos regionales de la región del Sahel existen inmensos recursos de aguas sub-



terráneas. En un buen número de estos acuíferos, los estudios isotópicos iniciales han demostrado la presencia de aguas fósiles, cuyo período de recarga data de más de 40 000 años (límite para la datación con carbono 14) y que, por lo tanto podrían calificarse de "muy antiguas". Es por ello que el estudio de estos acuíferos requiere el empleo de nuevas técnicas basadas en el uso de isótopos de período muy largo (cloro 36 e isótopos de uranio) y elementos de marcado apropiados para las condiciones paleohidrológicas, como por ejemplo, los gases nobles.

El cloro 36 se utiliza para la datación de aguas subterráneas muy antiguas porque tiene un período de vida sumamente largo (su período de semidesintegración es de  $3,01 \times 10^5$  años) y porque los cloruros son altamente solubles y poseen propiedades conservativas en las reacciones geoquímicas. No obstante, para aplicar el cloro 36 es necesario conocer a fondo la geoquímica del acuífero, ya que éste puede provenir de diversas fuentes (cósmicas, ensayos termonucleares anteriores y ensayos terrestres, tanto subsuperficiales como a grandes profundidades). En condiciones geoquímicas favorables el conocimiento de la actividad inicial del uranio 234 (cuyo período de semidesintegración es de  $2,5 \times 10^5$  años) permite aplicar la fórmula estándar de datación mediante desintegración radiactiva. La disolución de los gases nobles (argón, xenón, kriptón y neón) en el agua de infiltración depende fundamentalmente de la temperatura ambiente. La concentración resultante se mantiene entonces teóricamente constante debido a la inercia química de estos elementos. De ahí que al determinar su concentración en las aguas fósiles, es posible reconstruir las condiciones climáticas reinantes en el momento de la recarga de los acuíferos.

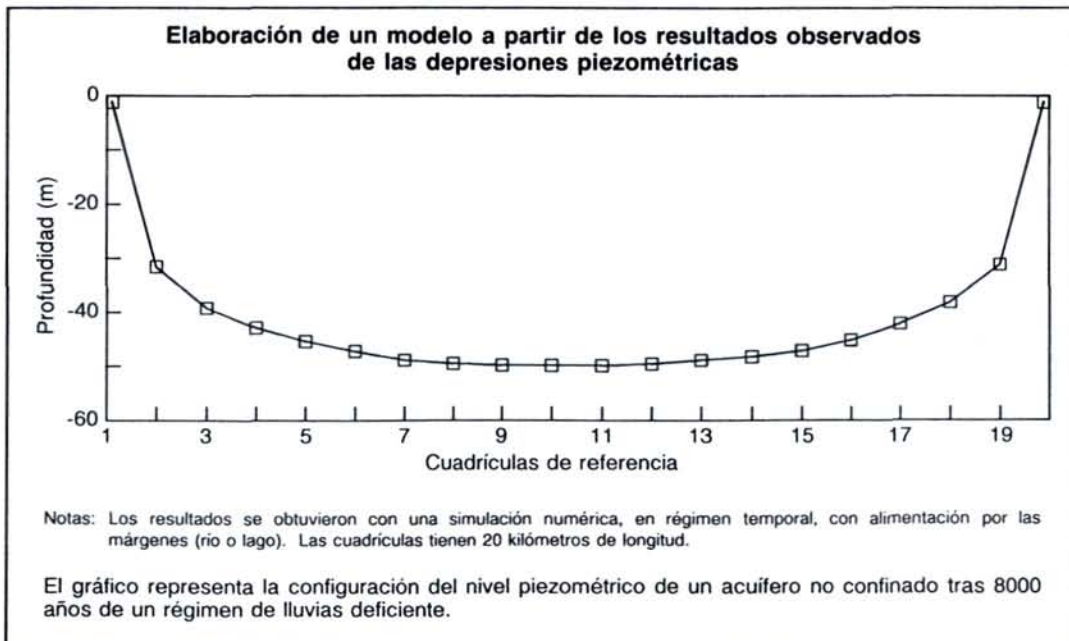
En la actualidad estas técnicas son utilizadas por el personal africano que participa en el proyecto, en

colaboración con laboratorios especializados de Europa (el Laboratorio de Hidrología y Geoquímica Isotópica de la Universidad de París XI, Francia, y la Escuela de Química de la Universidad de Bath, Reino Unido), en el estudio del acuífero de Maastrichtian, Senegal, y el de Continental Intercalaire (Malí y Níger).

● **Origen de las depresiones piezométricas.** El descubrimiento de grandes depresiones piezométricas se remonta al decenio de 1950, época en que se realizaron por primera vez estudios hidrogeológicos en África. Desde entonces se han realizado numerosas investigaciones en toda la región del Sahel; por ejemplo, en los acuíferos de la región de Ferlo, en el Senegal; en los de Nara graben, Gondo y Azaouad, en Malí; y en los de Trarza, en Mauritania; Kadzell, en Níger; y Yaérés (región del Lago Chad), en Camerún.

Hasta el momento ninguna de las distintas teorías que se han expuesto para explicar este fenómeno han ganado la aceptación general. Sin embargo, esta polémica no es meramente académica, ya que para el manejo de los recursos hídricos a largo plazo es necesario seleccionar un modelo de circulación conceptual y conocer las condiciones de los límites de estos grandes acuíferos.

Actualmente hay varios estudios en ejecución sobre este tema en el marco del proyecto regional. Los resultados preliminares obtenidos en Senegal, Malí y Camerún parecen demostrar que el balance existente entre la infiltración y la evapotranspiración desempeña un papel decisivo. Como parte del proyecto se ha elaborado, en colaboración con un profesor investigador senegalés, un modelo de simulación matemática que tiene en cuenta esta hipótesis. Este modelo reproduce satisfactoriamente la forma de las depresiones piezométricas observadas. (Véase el gráfico.)



## Hidrología e hidrosedimentología

**Hidrología.** La hidrología de los países del Sahel se caracteriza por una red superficial muy dispersa; sólo las corrientes de agua de gran caudal (principalmente los ríos Níger, Senegal, Logone y Chari) son perennes, mientras que las violentas y esporádicas inundaciones que tienen lugar durante la temporada de lluvias (de junio a septiembre) llenan la red de zonas de inundación que permanecen secas el resto del año. Esta característica dificulta mucho las mediciones de las corrientes líquidas.

Malí, que es sin duda el país con la mayor red de pequeñas corrientes de agua no perennes, fue el primero que se benefició con la introducción de las técnicas de trazadores artificiales para la medición de las corrientes líquidas. Hoy día cuenta con el personal competente y el equipo necesario para realizar operaciones sobre el terreno. Este personal es el único de su tipo especializado en la región y actualmente es capaz de realizar trabajos en el extranjero y de capacitar a técnicos de otros países.

### Intercambios regionales de información

La celebración periódica de reuniones científicas y talleres regionales es la mejor forma de intercambiar experiencias, compartir resultados y capacitar a ingenieros de los distintos organismos nacionales que participan en el proyecto. En este marco, los proyectos han llevado a cabo las actividades siguientes:

- Un curso sobre hidrología organizado en Bamako en agosto de 1987, en que 15 ingenieros y técnicos de Malí, Níger y Senegal recibieron capacitación en las técnicas con trazadores para la medición de las corrientes de agua.
- Un taller regional sobre el desarrollo de las técnicas isotópicas en hidrología e hidrogeología, celebrado en Niamey, en noviembre de 1988. En este taller, al que asistieron 38 participantes de 8 países, se presentaron 24 ponencias sobre el desarrollo de las técnicas isotópicas en la región que brindaron muchos ejemplos de su aplicación.
- Un curso de capacitación regional sobre la aplicación de las técnicas isotópicas en el desarrollo de los recursos hídricos, celebrado en Dakar, en junio de 1989. Este curso fue organizado por el OIEA y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y a él asistieron 10 participantes asociados con el proyecto regional.
- Dos nuevos cursos de capacitación de larga duración sobre hidrología e hidrosedimentología, celebrados en Malí durante 1990 y 1991.
- Un taller regional sobre hidrosedimentología nuclear, celebrado en Bamako en diciembre de 1990, que proporcionó capacitación a dos ingenieros de cada país participante.

A principios de 1990 comenzó a desarrollarse un programa de intercambio de técnicos e ingenieros investigadores. Un experto de Malí dictó varias conferencias sobre sedimentología nuclear en Dakar; un investigador senegalés participó en una misión sobre el terreno en Níger, y un científico de este último país ofreció cursos de capacitación en Dakar sobre análisis de datos geográficos y cartografía automática.

En el marco del proyecto regional, en Malí se han celebrado varios talleres y sesiones de capacitación práctica sobre el terreno para ingenieros y técnicos. (Véase el recuadro.)

**Hidrosedimentología.** Las corrientes de agua de la zona del Sahel transportan grandes masas de sedimentos que se depositan en los embalses superficiales reduciendo así su capacidad y vida útil. El flujo torrencial de las corrientes de agua dificulta la evaluación del transporte de sedimentos con métodos convencionales.

Para ayudar a resolver este problema, el OIEA dotó a Malí de un laboratorio de hidrosedimentología que cuenta con un equipo convencional y otro con instrumental nuclear. El equipo nuclear tiene un medidor de sedimentos para medir las tasas de sedimentación (mediciones de laboratorio); un equipo para la medición *in situ* de los sedimentos en suspensión (adaptado especialmente para trazar mapas de los depósitos de sedimentos en embalses y canales); y un equipo para la medición *in situ* (y el registro automático continuo) de la concentración de sedimentos en suspensión en las corrientes de agua.

Este laboratorio ya está en funcionamiento y cumple dos objetivos, a saber, la realización de estudios para la Dirección de Recursos Hídricos y otras entidades y, además, la capacitación teórica y práctica de los estudiantes de último año de la Escuela Nacional de Ingenieros de Bamako.

### Objetivos y perspectivas futuras

De conformidad con las recomendaciones de la primera reunión de coordinación (Bamako, diciembre de 1989), en la actualidad el proyecto persigue los objetivos siguientes:

- Obtener apoyo operacional y en equipo para las infraestructuras con el objeto de promover el aumento progresivo de la autosuficiencia en materia de análisis en la región, así como fomentar el uso de los laboratorios existentes;
- Obtener apoyo en materia de documentación y capacitación mediante un mayor intercambio de técnicos entre los países que integran el proyecto y la participación más activa de su personal en los talleres, seminarios y conferencias regionales;
- Conseguir más recursos financieros para las actividades mediante el aumento de la contribución del OIEA y la búsqueda de contribuciones de otros organismos internacionales o países, o ambos, a través de la cooperación bilateral.

En este contexto, el OIEA ha aprobado en 1991 cuatro nuevos proyectos de cooperación técnica en Malí, Senegal y Níger en el marco de las actividades de los proyectos regionales. Estos proyectos facilitarán, en particular, la aplicación de técnicas de marcado hidrológico en el Senegal y el Níger, así como la continuación de esa actividad en Malí; el fortalecimiento de algunos laboratorios y la promoción de su utilización en la región.

En consecuencia, el laboratorio de análisis para carbono 14 instalado por el OIEA en Niamey estará



En la región de Ferlo, en el norte del Senegal, los pozos manuales excavados hasta 60 y 100 metros de profundidad son las principales fuentes de agua. Uno de los objetivos más importantes de la investigación hidrológica es conocer si las aguas subterráneas se recargan con la precipitación atmosférica.

dotado de un contador de centelleo líquido, que muy pronto se empleará para analizar las muestras tomadas en la región con fines hidrológicos y arqueológicos. Además, el laboratorio nuclear de hidrosedimentología de Bamako podría utilizarse para realizar estudios fuera de Malí, y el laboratorio de suelos de la Universidad de Dakar, que cuenta con una línea de extracción por destilación al vacío, procesaría las muestras que anteriormente se enviaban a Europa.

En las esferas de investigación y capacitación se ha previsto la celebración de cuatro talleres regionales con vistas a la capacitación local. Un proyecto se dedicará al estudio de la zona no saturada (Dakar, noviembre de 1991); otro, a la preparación del carbono 14 y su medición (Niamey, 1992); el tercero se dedicará a la hidroquímica (Yaoundé, 1992); y el cuarto, a la elaboración de modelos matemáticos hidrogeológicos (Dakar). Además, se ha propuesto la ejecución, con financiación externa, de un proyecto de investigación regional para evaluar la tasa de recarga y evaporación de los acuíferos no confinados de la zona del Sahel.



### Fructífera colaboración

Dados los relativamente escasos recursos financieros del proyecto regional, habría sido prácticamente imposible alcanzar los resultados obtenidos hasta el momento si no hubiera sido por los proyectos hidrológicos que ya se desarrollaban en estos países y la estrecha colaboración que se ha forjado entre organismos nacionales, bilaterales e internacionales. El proyecto se ha beneficiado en especial con la labor de las principales contrapartes, entre las que figura el Departamento de Geología del Senegal de la Universidad de Dakar y su Dirección de Estudios de Recursos Hídricos, Ministerio de Recursos

Hídricos; el Ministerio de Recursos Hídricos y Energía de Malí y la Escuela Nacional de Ingenieros, Bamako; el Departamento de Geología del Níger, la Universidad de Niamey y la Dirección de Recursos Hídricos del Ministerio de Recursos Hídricos; y el Instituto de Investigaciones Geológicas y de Minería de Yaoundé, Camerún. Asimismo, muy valiosa ha sido la colaboración con los proyectos de recursos hídricos que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) lleva a cabo en los tres países, con el Canadian International Development Research Centre (IDRC), el Fonds d'Aide à la Coopération, de Francia, el Institut Universitaire Etudes Développement (IUED), de Suiza, y la

Un especialista de Malí enseña a un colega el uso de las técnicas de dilución con trazadores para evaluar la dinámica del transporte de sedimentos en la cuenca del río Dourou, en Malí. Al fondo, junto a la pared, puede observarse un pequeño calibrador nuclear colocado para registrar de forma continua el transporte de sedimentos durante las crecidas del río.

Actividades	Senegal		Mali		Niger		Camerún	
Estudio de acuíferos con isótopos ambientales	Cap Vert Horst Ndiass	(1)	Acuíferos fracturados en la base				Mt. Mandaru	(2)
	Casamance	(1)	Bougoni, Kolokani	(1)	Liptako, Air	(1)		(2)
	Ferlo	(2)	Acuíferos regionales (Continental Terminal y Continental Intercalaire)				Llanura Yaérés	
	Senegal oriental	(3)	Nara, Azaouad Gondo	(2) (1)	Irhazer Niger oriental	(1) (2)		
Relación entre el agua superficial y el agua subterránea	Casamance	(2)	Río Niger	(2)	Río Niger	(2)	Llanura aluvial	
	Río Senegal	(2)	Delta interior	(3)	Niamey	(2)		
Zona no saturada	Louga Ferlo	(2) (2)	Azaouad	(2)	Niamey Bilma	(2) (3)	Yaérés	(3)
Agua muy antigua	Casamance Ferlo	(2) (2)	Azaouad septentrional	(2)	Llanura de Irhazer	(2)		
Depresiones piezométricas	Ferlo	(2)	Nara, Azaouad	(2)	Kadzell	(3)		
Actividades concretas	Estudio isotópico de la materia orgánica		Hidrología superficial		Estudio sobre el origen de los nitratos			
Laboratorios	Zona no saturada	(2)	Hidroquímica	(1)	Hidroquímica	(1)	Hidroquímica	(2)
	Hidroquímica	(3)	Hidrosedimentología	(2)	Carbono 14	(2)		
Seminarios, talleres, capacitación	Hidrología isotópica	(1)	Taller sobre hidrología	(1)	Hidrología isotópica	(1)		
	Taller sobre zona no saturada	(3)	Capacitación en hidrología	(2)	Taller sobre hidroquímica	(3)		
	Taller sobre modelos matemáticos	(3)	Taller sobre sedimentología	(3)	Taller sobre carbono 14	(3)		
Nuevas actividades	Utilización de trazadores artificiales	(3)			Uso de trazadores artificiales kori Téloua	(3)		

Nota: Los números entre paréntesis indican las actividades completadas (1), en ejecución (2), y planificadas (3) en el marco del proyecto regional.

### Actividades del proyecto regional del Sahel

Oficina Francesa para la Investigación Científica y Técnica en Ultramar (ORSTOM).

Esta asistencia había permitido previamente seleccionar proyectos de investigación de interés común para los países sobre la base de análisis detallados de los problemas hidrológicos e hidrogeológicos regionales y las posibilidades de aplicar técnicas nucleares en ellos. Se seleccionaron otras actividades según sus posibilidades locales y su importancia. (Véase el cuadro.)

Aparte de los resultados concretos alcanzados, el proyecto regional ha hecho valiosas contribuciones a la puesta en práctica de los programas científicos existentes. Ello se ha logrado gracias al suministro de equipo y medios para el análisis isotópico, al envío de expertos y consultores, y a la concesión de becas de capacitación. Igualmente importante ha sido la cooperación regional facilitada por la presencia de un experto residente y por la importancia concedida al frecuente intercambio de información técnica. Estos canales de intercambio incluyen la publicación y difusión de todos los logros científicos, el intercambio entre países de conferencistas, ingenieros y

técnicos especializados, y la organización periódica de cursos de capacitación, talleres regionales y seminarios.

Mediante estas y otras actividades, el proyecto ayuda a los científicos e ingenieros nacionales del Sahel a crear las bases técnicas para la exploración y el manejo eficaces de los valiosos recursos hídricos de la región.