

CAPÍTULO 9

**TAREAS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICAS**

DOSIMETRÍA FÍSICA

DOSIMETRÍA BIOLÓGICA

DOSIMETRÍA DE LA CONTAMINACIÓN INTERNA

EFFECTOS DE LA IRRADIACIÓN PRENATAL SOBRE  
EL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL EN DESARROLLO

INDICADORES DIAGNÓSTICOS Y PRONÓSTICOS APLICABLES  
A SITUACIONES DE SOBREEXPOSICIÓN ACCIDENTAL

ASESORAMIENTO MÉDICO EN RADIOPROTECCIÓN

ACTIVIDADES DE LOS LABORATORIOS DE ANÁLISIS RADIOQUÍMICOS

VERIFICACIÓN DEL INVENTARIO DE MATERIAL NUCLEAR EN PLANTAS  
DE ENRIQUECIMIENTO DE URANIO POR DIFUSIÓN GASEOSA

TRATADO DE PROHIBICIÓN COMPLETA DE ENSAYOS NUCLEARES

ACTIVIDADES DE LOS LABORATORIOS DE MEDICIONES DE RADIACIÓN

DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE  
ACTIVIDADES NUCLEARES NO DECLARADAS

DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE RADÓN

ESTUDIOS SOBRE FACTORES DE BIO-CONCENTRACIÓN

EMPLEO DE CÓDIGOS TERMOHIDRÁULICOS PARA  
EVALUACIONES DE SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEARES

DESARROLLO DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA  
EVALUACIONES DE LA SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEARES

DESARROLLOS ELECTRÓNICOS EN APOYO A LAS TAREAS REGULATORIAS

CENTRO DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACELERADORES

**TAREAS CIENTÍFICO-TECNOLÓGICAS**

La ARN cuenta con laboratorios e instalaciones ubicadas en el Centro Atómico Ezeiza, partido Ezeiza, provincia de Buenos Aires, que le permiten efectuar mediciones y determinaciones necesarias para cumplir con su función regulatoria. Las principales tareas llevadas a cabo en esta área son:

- ✓ Desarrollar sistemas de medición de dosis que permitan establecer el cumplimiento de niveles apropiados de protección de las personas.
- ✓ Determinar la presencia de radionucleidos en el ambiente, alimentos y otras matrices biológicas.
- ✓ Participar en la verificación del cumplimiento del Tratado de prohibición total de ensayos nucleares.
- ✓ Realizar estudios sobre transferencia de nucleidos en el ambiente para ser luego utilizados en modelos de evaluación de dosis en el público.
- ✓ Realizar estudios sobre fenomenología y mitigación de accidentes severos en centrales nucleares.
- ✓ Realizar la vigilancia radiológica ambiental en los alrededores de instalaciones nucleares.
- ✓ Efectuar estudios sobre los efectos biológicos de las radiaciones.
- ✓ Evaluar, a través de dosímetros físicos y biológicos, situaciones de sobreexposición accidental.
- ✓ Asesorar sobre la conducta médica a seguir en caso de accidente por radiación.
- ✓ Realizar desarrollos electrónicos en hardware y software como soporte a distintas tareas regulatorias.

Para el desarrollo de estas tareas la ARN cuenta con:

- ✓ Laboratorio de dosimetría física compuesto por:
  - Laboratorio de dosimetría termoluminiscente
  - Laboratorio de desarrollo
  - Sala de calibraciones
- ✓ Laboratorios de radiopatología y dosimetría biológica formados por:
  - Sala de microscopía
  - Laboratorio para técnicas de hibridación
  - Salas de cultivos celulares
  - Laboratorios de mediciones
- ✓ Laboratorios de mediciones:
  - Contador de cuerpo entero
  - Laboratorio de medición por espectrometría gamma
  - Laboratorio de medición por espectrometría alfa y medición de actividad alfa y beta total
  - Laboratorios de medición de actividad de bajo fondo
- ✓ Laboratorios radioquímicos:
  - Laboratorio para el análisis de muestras con altas actividades
  - Laboratorio para el análisis de muestras con bajas actividades
  - Laboratorio para el análisis de muestras con actividades intermedias
  - Laboratorio para medición de estroncio 90

- Laboratorio para medición de tritio
- Laboratorio para medición de carbono 14
- ✓ Laboratorio de apoyo electrónico
- ✓ Laboratorio de detección de partículas de uranio
- ✓ Laboratorio de detección de yodo 129
- ✓ Laboratorio de medición de radón
- ✓ Laboratorio de procesamiento de muestras ambientales
- ✓ Laboratorio de evaluación de la contaminación interna

A continuación se describen las principales tareas rutinarias y de desarrollo llevadas a cabo en los laboratorios mencionados durante 1997.

## DOSIMETRÍA FÍSICA

La medición por medios físicos de las dosis de radiación recibidas por el público y los trabajadores permite realizar evaluaciones respecto de la seguridad radiológica de las instalaciones y de los dispositivos bajo control.

La dosimetría física necesita evaluar y mantener la exactitud y precisión de las mediciones, por lo que se ha desarrollado una metodología de calibración de todos los dispositivos utilizados por la ARN para medir campos de radiación. La calibración de los dispositivos se realiza con patrones de radiación de exactitud suficiente, con el fin de evaluar los dosímetros de monitoreo personal y el instrumental dosimétrico utilizado en las inspecciones.

El laboratorio de dosimetría física cuenta con una sala blindada, en la que se halla una fuente de cesio 137, para calibraciones de dosímetros sensibles a campos de radiación gamma y sus correspondientes dispositivos de posicionamiento para el instrumental y la fuente. Por otra parte, para las calibraciones de sistemas de medición de neutrones se utilizan fuentes de californio 252 y americio-berilio.

El laboratorio de dosimetría física cuenta con dosímetros personales termoluminiscentes (TLD) de LiF, TLD 600 y TLD 700, utilizados para medir la dosis de radiación en campos de neutrones y fotones, discriminando cada una de las contribuciones y también, un rémetro pasivo, formado por una esfera de polietileno de 24,5 cm con TLD en su centro, para campos de radiación pulsados.

Para realizar mediciones con fines de salvaguardias, se cuenta con un dispositivo de medición de material nuclear fisionable, de alta sensibilidad. El dispositivo consiste en cinco detectores de helio 3, inmersos en polietileno, armando un sistema tipo caja. El espesor de polietileno es el adecuado para la detección de los neutrones de fisión de 1 a 2 MeV. El sistema está rodeado por una lámina de cadmio, con el fin de absorber cualquier radiación de fondo de neutrones térmicos. La electrónica asociada permite realizar tanto mediciones totales como en coincidencia.

Con respecto a las determinaciones espectrométricas de neutrones, en la actualidad la ARN cuenta con dos sistemas independientes, desarrollados en el laboratorio y que cubren distintos rangos de aplicación, por estar basados en dos detectores de helio 3 de distinta sensibilidad.

Los principales servicios y tareas de apoyo a los grupos regulatorios llevados a cabo durante el año, por el grupo de dosimetría física estuvieron relacionados con los siguientes temas:

**Dosimetría personal.** Provisión de dosímetros y evaluación dosimétrica gamma y neutrónica del personal de la ARN y de expertos de organizaciones internacionales, ABACC y OIEA.

**Mediciones especiales.** Se realizaron mediciones por espectrometría de neutrones en diversos reactores y conjuntos críticos, tales como RA 0 (CNEA-Universidad Nacional de Córdoba), RA 1 (CNEA-CAC) y RA 4 (CNEA-Universidad Nacional de Rosario), y en aceleradores de uso médico y de investigación. Se llevaron a cabo evaluaciones dosimétricas, con detectores pasivos, sobre dispositivos de fusión pulsados (Plasma Focus de la FCEyN-UBA) y evaluaciones dosimétricas en la FUESMEN y en la Planta de producción de molibdeno 99 (CNEA-CAE). Además, en el marco del acuerdo de colaboración entre la ARN y la Comisión Nacional de Energía Atómica de la República Oriental del Uruguay, se realizó el relevamiento dosimétrico de 13 dispositivos de teleterapia de dicho país.

**Calibración de dosímetros.** Se realizaron calibraciones de dosímetros portátiles de radiación gamma y neutrónicos y de detectores de contaminación superficial para radiación alfa y beta, con fuentes puntuales y extendidas que permiten verificar el funcionamiento de los mismos. Se ha avanzado en la calibración de los dispositivos de medición neutrónica, diseñándose y construyéndose un sistema que permite controlar la posición de los detectores y de las fuentes durante la calibración.

También se calibraron dosímetros de extremidades (anillo y pulsera), utilizando los correspondientes fantomas definidos por las normas ISO.

**Dosimetría computacional.** La utilización de programas de simulación de transporte de radiación se ha extendido en la dosimetría física, dando lugar a la dosimetría computacional. El laboratorio aplica esta disciplina tanto a la simulación de la respuesta de los detectores neutrónicos, como a la evaluación de dosis gamma en maniqués que permite la calibración de dosímetros gamma.

**Intercomparaciones.** Se efectuó la evaluación de los datos obtenidos y se elaboró el informe del ejercicio de intercomparación que se organizó en el marco del convenio entre ARN, CNEA y OIEA, en octubre de 1996. En el ejercicio de intercalibración de dosimetría personal gamma participaron representantes de nueve países latinoamericanos (responsables de los Laboratorios de Referencia de Calibración Dosimétrica).

Se planificó la realización de una serie de ejercicios de intercomparación entre los servicios de dosimetría personal. Fueron invitados todos los laboratorios de dosimetría personal del país que suman un total de 20, y completaron la encuesta 14 laboratorios. Los dosímetros utilizados por dichos laboratorios son dosímetros pasivos (TLD y Film).

A continuación se describen los proyectos desarrollados durante el año 1997:

#### **Espectrometría de neutrones con detectores gaseosos**

Se implementó un nuevo sistema de espectrometría de neutrones, fácilmente transportable, autónomo y de alta sensibilidad que permite medir la dosis equivalente ambiental en los alrededores de ins-

talaciones tales como reactores nucleares y aceleradores. Además, se realizó el relevamiento del espectro de neutrones en el recinto del reactor RA 1 y en la consola de operación del mismo, evaluándose la dosis equivalente ambiental,  $H^*(10)$ , en cada una de las posiciones estudiadas. Las ubicaciones analizadas son aquellas en las que personal de la instalación desarrolla tareas, durante la operación del reactor.

#### **Mediciones con fines de salvaguardia**

Un método de detección pasivo, no destructivo, para la medición de material nuclear fisionable fue utilizado para la medición de la masa de uranio 235 en cilindros de  $UF_6$  (modelo 5 A). Simultáneamente, se implementó un método de detección activo para cilindros del mismo modelo, exponiendo la unidad a una fuente de americio-berilio y realizando las mediciones de radiación gamma inducida, con un detector de GeHp.

El laboratorio de dosimetría física colaboró con la ABACC, en el diseño de un método probabilístico instrumental de detección de material nuclear, con métodos pasivos y activos. Además, realizó mediciones de estas características en la planta de Aramar (Brasil) conjuntamente con expertos de ABACC y de OIEA.

#### **Medición de dosis por radiación cósmica**

La estimación de las dosis recibidas debidas a radiación cósmica, por las tripulaciones a bordo de los aviones de línea, constituye una preocupación creciente en el ámbito internacional.

La complejidad de este campo de radiación hace necesario utilizar diversas técnicas dosimétricas como los detectores termoluminiscentes (TLD), sistemas multiesfera de detección de neutrones y detectores proporcionales tejido equivalente (TEPC) para estimar la dosis recibida por partículas como los mesones y neutrones ultra rápidos.

La necesidad de conocer las dosis recibidas por las tripulaciones aéreas a gran altura y en vuelos transpolares, llevó a este laboratorio a ampliar el desarrollo de técnicas actualmente en uso, colaborando en este tema con el Instituto Nacional de Medicina Aeroespacial (INMAE).

#### **Laboratorio de calibración de dispositivos de medición de neutrones**

En el marco del convenio ARN-NRPB (Gran Bretaña), se han realizado los pasos preliminares para acondicionar un edificio, que reúne características adecuadas, para la instalación de un laboratorio de calibración para dispositivos de medición neutrónica con condiciones ambientales controladas.

#### **Dosimetría de neutrones**

La cantidad de fuentes de neutrones utilizados en la industria e investigación van en aumento año a año. Con el incremento de estas fuentes, existe también el correspondiente incremento en el número de trabajadores que están ocupacionalmente expuestos y que por lo tanto, requieren ser controlados.

Las dificultades que presenta la dosimetría de neutrones surgen de la complejidad de la interacción de los neutrones con la materia, el amplio rango del espectro energético y la fuerte dependencia de la efectividad biológica con la energía de los neutrones.

Para poder satisfacer los requerimientos de monitoreo personal para el personal involucrado en tareas relacionadas con la industria nuclear, se han buscado distintos tipos de detectores, su implementación y calibración.

#### ✓ Detectores termoluminiscentes

Durante el año se ha estudiado la respuesta de dos nuevos materiales TL: ( $\text{Ca}_2\text{F:Mn}$  y  $\text{Ca}_2\text{F:Tm}$ ), y para poder implementar su uso rutinario, se estudió la deconvolución de la curva característica del material, frente a las distintas fuentes de radiación.

#### Medición de detectores termoluminiscentes (TLD)

#### ✓ Detectores de trazas

La necesidad de cubrir un amplio rango energético de neutrones, llevó a la utilización de dosímetros por trazas, los cuales son sensibles a neutrones a través de la interacción de los mismos con materiales de alto contenido de hidrógeno, (llamados conversores), que producen protones de retroceso. El dosímetro de neutrones propuesto está basado en un detector CR-39 y se utilizaron dos diseños básicos distintos.

En el presente año, se caracterizó el material, estandarizando la técnica de revelado, basada en el ataque electroquímico de las trazas y la metodología de adquisición de la información, que consiste en una cámara conectada a una PC y enfocada en un microscopio. Este equipo permite, además, la evaluación bidimensional de tamaños y densidades espaciales de las trazas.

#### ✓ Detectores por activación

El conocimiento del espectro de neutrones es de fundamental importancia para la evaluación de la dosis. Una de las técnicas que permiten su caracterización es la medición de la actividad inducida en distintos materiales. Se implementó el método de activación de hojuelas de oro e indio. Las reacciones utilizadas fueron oro 197 ( $n, \gamma$ ) oro 198; indio 115 ( $n, \gamma$ ) indio 116<sup>m</sup>, para los flujos térmicos y epitérmicos e indio 115 ( $n, \gamma$ ) indio 115<sup>m</sup> para los flujos con energía mayor que 1,2 MeV. La actividad fue medida en un detector de GeHp, previa calibración con una fuente patrón de bario 133.



Con esta técnica se determinaron los flujos térmicos, epitérmicos y rápidos de los canales de irradiación de los reactores RA 1 (CNEA-CAC) y RA 3 (CNEA-CAE), que son utilizados para realizar experiencias por los distintos laboratorios de la ARN.

✓  **Detectores de burbujas**

Los detectores por daño de burbujas presentan pequeñas gotas de líquido sobrecalentado inmersas en un líquido o sólido. Cuando un neutrón interactúa en el interior de la burbuja o en sus inmediaciones, las partículas de retroceso cargadas estimulan la liberación de la energía guardada en las burbujas produciendo su explosión.

Estos detectores, insensibles a fotones y muy sensibles a neutrones, pueden ser aplicados en dosimetría personal y ambiental y como sistema espectrométrico de neutrones. El laboratorio ha iniciado la implementación del sistema de lectura de las burbujas y su correspondiente evaluación.

## **DOSIMETRÍA BIOLÓGICA**

La dosimetría biológica tiene como objetivo la estimación de la dosis de radiación ionizante recibida por un individuo, tanto proveniente de fuentes naturales como de aquellas producidas por el hombre, utilizando muestras extraídas del mismo organismo y procesadas por distintas metodologías. Esta dosimetría complementa las estimaciones dosimétricas realizadas por métodos físicos y en ciertos casos constituye la única estimación posible cuando la dosimetría física encuentra incertidumbres severas, por falta de registros físicos de la dosis o por imprecisa reconstrucción del escenario de la sobreexposición.

Por lo tanto, el objetivo del laboratorio de dosimetría biológica es asegurar la disponibilidad y proceder al mejoramiento permanente, de dosímetros biológicos que permitan evaluar dosis, en situaciones provenientes de distintos escenarios de sobreexposición: individuales o que involucren a un alto número de personas, cuando la dosimetría es inmediata o retrospectiva, para diferentes calidades de radiación y diferentes volúmenes del cuerpo involucrados en la sobreexposición.

La dosimetría biológica se basa en que la radiación ionizante tiene como blanco principal el material genético (ADN-ácido desoxirribonucleico) de las células, el cual constituye los cromosomas contenidos en el núcleo celular. El paso de la traza ionizante, a través del núcleo, induce rupturas cromosómicas y la maquinaria enzimática de reparación del daño radioinducido puede sellar rupturas, que se han recombinado en forma ilegítima, dando origen a las llamadas aberraciones cromosómicas y sus derivados citológicos, los micronúcleos. Estos indicadores biológicos de dosis son los más ampliamente convalidados y utilizados en los laboratorios de dosimetría biológica del mundo. La estimación de la frecuencia de aberraciones cromosómicas, la cual correlaciona con la dosis, constituye la base de la dosimetría citogenética.

El hecho de que existan distintos escenarios de sobreexposición hace que se requiera la utilización de distintos tipos de indicadores citogenéticos. En todos los casos, las muestras biológicas obtenidas para efectuar la dosimetría son de sangre periférica, a partir de las cuales se efectúan cultivos celulares, a fin de obtener una población representativa de un tipo celular, los linfocitos, que expresan el daño cromosómico radioinducido durante la división celular.

Para desarrollar sus tareas el grupo de dosimetría biológica dispone de:

- ✓ Sala de cultivo equipada con un flujo laminar, donde realiza la preparación de los cultivos celulares en condiciones estériles. Cuenta con sistemas de incubación con condiciones de temperatura, humedad y flujo de gases controlados.
- ✓ Sala de microscopía donde se hallan instalados cinco microscopios ópticos, binoculares y con equipamiento fotográfico acoplado y para adquisición de imágenes por video.
- ✓ Laboratorio acondicionado para la realización de técnicas de hibridación, con temperatura controlada y limitación de radiación ultravioleta, equipado con microcentrifugas, baños termostatzados y microscopía de epifluorescencia.

Con el fin de implementar nuevos indicadores biológicos, mejorar la aplicación de aquéllos corrientemente en uso, efectuar desarrollos tendientes a ampliar las capacidad de respuesta del laboratorio, así como, para llevar a cabo las líneas de investigación básica en el campo de la radiobiología, durante el año, se encararon trabajos en distintas áreas.

#### **Técnicas dosimétricas para la evaluación de sobreexposiciones accidentales**

Con el objeto de poder evaluar casos de sobreexposiciones accidentales, se trabajó en las siguientes técnicas dosimétricas:

##### ✓ **Aberraciones Cromosómicas Inestables (ACI)**

El uso de las ACI constituye la base fundamental de la dosimetría citogenética, principalmente, para la evaluación dosimétrica inmediata de situaciones de presunta o confirmada sobreexposición aguda. En este campo, se procedió a implementar, en forma rutinaria, técnicas de cultivo de linfocitos complementarias a las tradicionales en uso, tales como: Intercambio de Cromátidas Hermanas (ICH) y Fluorescencia plus Giemsa (FPG), con el fin de mejorar e incrementar la información proveniente de la estimación de la frecuencia de ACI obtenida por el método tradicional. La técnica de ICH provee información referida a una posible condición del individuo a evaluar, relacionada con defectos en su sistema enzimático de reparación de rupturas cromosómicas, tanto espontáneas como radioinducidas.



**Análisis de metafases por microscopía**

La técnica de FPG permite asegurar la estimación de la frecuencia de ACI, exclusivamente sobre células en primera división, lo cual constituye un reaseguro contra la pérdida de información resultante del transcurso de sucesivas divisiones celulares de los linfocitos en cultivo.

- ✓ **Construcción de una curva de calibración in vitro, en base a la frecuencia de ACI para radiación neutrónica**

Con el fin de disponer de datos propios que puedan ser comparados con los obtenidos por otros laboratorios, para la dosimetría citogenética por irradiaciones de neutrones de distintas energías, se procedió a evaluar la factibilidad de utilizar, como fuente de irradiación, el reactor RA 1 (CNEA-CAC). Con tal fin, se realizaron estimaciones por dosimetría física de las columnas térmica y rápida, determinándose las dosis de neutrones térmicos, epitérmicos, rápidos y radiación gamma, así como la relación entre la dosis de neutrones y la dosis debida a radiación gamma, a fin de establecer el protocolo adecuado de irradiación de las muestras biológicas, para la construcción de la curva dosis-efecto, efectuándose dos irradiaciones de prueba.

- ✓ **Frecuencia de micronúcleos**

Cuando la sobreexposición accidental involucra varios individuos, es conveniente la implementación de un dosímetro biológico que permita, por sus condiciones de rápido procesamiento, obtener una estimación inicial de las dosis involucradas. En estos casos es de utilidad emplear la frecuencia de micronúcleos. Al respecto, se continuó con el análisis de la influencia de distintos factores individuales y ambientales, sobre la frecuencia de micronúcleos espontánea y radioinducida, particularmente, para el rango de dosis entre 0 y 2 Gy para radiación gamma de cobalto  $^{60}\text{Co}$ , en el marco de la renovación del Contrato de Investigación con el OIEA (Research Contract N° 8369/R1).

### **Técnicas dosimétricas para evaluaciones retrospectivas**

Las principales tareas realizadas en esta área fueron:

- ✓ **Aberraciones Cromosómicas Estables (ACE)**

Cuando la evaluación dosimétrica debe realizarse tiempo después de producida una sobreexposición aguda, o en los casos en que la irradiación se produjo en forma prolongada o crónica (exposición ocupacional), es necesario recurrir a las ACE como indicador citogenético. En este tema, se continuó mejorando el ajuste de la curva de calibración para radiación gamma de cobalto  $^{60}\text{Co}$ , basada en las frecuencias de ACE identificadas mediante la técnica de Bando G, incrementando el número de puntos de dosis en el rango de 0 a 1 Gy.

- ✓ **Hibridación in situ por Fluorescencia (FISH)**

La utilización de técnicas moleculares para el reconocimiento de las ACE, ha expandido considerablemente el alcance de este dosímetro, tanto en la velocidad de procesamiento de la información como en la disminución del límite de detección. En tal sentido, se ha implementado y estandarizado la técnica de FISH, utilizando sondas de ADN de cromosomas enteros. Además, se comenzó la validación de la técnica, procediendo a estimar la eficiencia de detección de las ACE y el modelo de extrapolación al cariotipo completo. Se utilizó como patrón de referencia las frecuencias obtenidas a

partir de la curva de calibración para ACE, identificadas por Bando G, para distintas dosis de radiación.

### **Análisis automatizado de ACI**

Con el propósito de ampliar la capacidad de respuesta del laboratorio, se continuó con el desarrollo de un programa para el análisis automatizado de imágenes de ACI. En esta etapa de avance, el programa produce una salida alfanumérica y gráfica del cariotipo completo, a partir de metafases sin superposiciones y una aberración por metafase. Se comenzó con el desarrollo de algoritmos de integración de algoritmos parciales, previos a la evaluación de la eficiencia del programa.

### **Estudios sobre Eficiencia Biológica Relativa**

A fin de contribuir al conocimiento de los mecanismos de acción de distintas calidades de radiación, para la producción del daño sobre el material genético, se realizaron estudios relativos a la eficiencia biológica relativa de fotones de alta energía en base a la producción de ACI y micronúcleos, en el marco de la renovación del contrato de investigación con el OIEA. En colaboración con el Departamento de Efectos Biomédicos del NRPB (Gran Bretaña), se procedió al ajuste de protocolos de irradiación y procesamiento de muestras biológicas irradiadas con partículas alfa aceleradas en el acelerador de partículas TANDAR (CNEA-CAC). Este trabajo se realiza con el fin de obtener datos experimentales de la producción de ACI y ACE, identificadas por distintas técnicas, y contribuir al diseño del modelo de producción de aberraciones cromosómicas en función de la Transferencia Lineal de Energía (LET).

## **DOSIMETRÍA DE LA CONTAMINACIÓN INTERNA**

La utilización de material radiactivo en actividades del ciclo de combustible nuclear, de la industria y la medicina, expone a los trabajadores y a las personas del público al riesgo de incorporación de radionucleidos, ya sea por inhalación, ingestión o a través de la piel sana o por heridas. La determinación de la cantidad incorporada de ese material radiactivo es parte esencial en la evaluación dosimétrica.

Para la estimación de la contaminación interna, se analiza la actividad retenida y/o excretada para determinar la dosis recibida por los diferentes órganos y tejidos. Esto permite, tanto verificar el cumplimiento de las normas vigentes, en cuanto a la limitación de dosis por radiación en trabajadores y en miembros del público, en condiciones normales de trabajo, como identificar una situación anormal y evaluar la gravedad de la misma, para decidir las acciones a tomar.

La estimación dosimétrica se basa en mediciones directas de todo el cuerpo, de órganos en particular o de heridas, o en el resultado de métodos indirectos, en los que se realiza la determinación de radionucleidos en excretas o en el ambiente de los lugares de trabajo.

El grupo dedicado a la dosimetría de la contaminación interna, evalúa el resultado de las mediciones directas e indirectas, teniendo en cuenta factores tales como las características físicas y químicas de las sustancias radiactivas, el modo de incorporación y los procesos metabólicos involucrados. Para ello, interpreta y aplica los modelos biocinéticos y dosimétricos recomendados por especialistas internacionales, principalmente por la ICRP. Como herramientas de cálculo se utilizan los códigos

LUDEP 2.04 y CINDY v 1.4, que permiten estimar incorporación y dosis en base a datos de mediciones. También, participa en la elaboración de los planes de monitoreo aplicables a las instalaciones, así como, en la obtención de Límites Anuales de Incorporación (ALI) específicos para un dado ambiente de trabajo.

Durante 1997, el grupo de dosimetría de la contaminación interna realizó evaluaciones dosimétricas en base a las determinaciones de actividad retenida en órganos y/o excretada, respondiendo a consultas que involucraban la incorporación de material radiactivo por parte de trabajadores y de miembros del público, debido a prácticas médicas. También, realizó evaluaciones dosimétricas en base a los datos obtenidos de la mediciones de concentración de radionucleidos en aire en diferentes lugares de trabajo, análisis que fue utilizado en las inspecciones regulatorias para controlar el cumplimiento de las normas vigentes en cuanto a la limitación de dosis en trabajadores.

Con el propósito de optimizar y certificar la evaluación de las incorporaciones individuales y las herramientas computacionales disponibles, se participó de un ejercicio de intercomparación y validación de modelos biocinéticos auspiciado por el OIEA. Los casos propuestos en esta intercomparación involucraban diferentes radionucleidos y vías de incorporación. En la resolución de los casos propuestos, se utilizaron los modelos metabólicos y dosimétricos propuestos por la ICRP y, particularmente, para los casos de inhalación, se utilizó el modelo pulmonar de la publicación 66 de la ICRP. En algunos casos, los parámetros de los modelos metabólicos fueron modificados en base a los datos de retención disponibles. Se completó la evaluación preliminar de cinco de los nueve casos propuestos y se está encarando la evaluación definitiva.

### **EFFECTOS DE LA IRRADIACIÓN PRENATAL SOBRE EL SISTEMA NERVIOSO CENTRAL EN DESARROLLO**

Las irradiaciones prenatales constituyen el motivo más frecuente de consulta médica especializada, en el ámbito de la radiopatología. La frecuente incerteza acerca del conocimiento del estado de gravidez, así como la enorme importancia que revisten los métodos radiológicos de diagnóstico en la práctica médica, hacen que haya innumerables casos de irradiaciones intraútero, de los cuales sólo una pequeña minoría son comunicados. Entre los efectos generados por irradiaciones prenatales, los que conciernen al sistema nervioso central en desarrollo, son los más deletéreos y pueden dar lugar a la generación de retraso mental severo, como consecuencia de ciertas dosis administradas en los momentos de máxima sensibilidad.

Aún cuando, globalmente, el sistema nervioso central en desarrollo revela una extrema radiosensibilidad a dosis muy bajas, la complejidad estructural del mismo determina, que no todas las estructuras se comporten del mismo modo cuando son irradiadas, siendo la corteza cerebral uno de los blancos más sensitivos.

Aunque todavía no existe un consenso absoluto en relación a la dosis mínima necesaria para verificar efectos deterministas, se ha podido comprobar que con dosis de algunos decenas de miligray pueden verificarse, experimentalmente, alteraciones ostensibles en algunas estructuras, y efectos sobre el comportamiento durante la vida postnatal.

El objetivo es estudiar ciertos mecanismos de producción de daño y su correlación con la dosis. En este sentido, inicialmente se abordó el estudio de la generación radioinducida de especies activas del oxígeno, el comportamiento de los sistemas de defensa enzimáticos correlacionados con pérdida celular y alteraciones de la sinaptogénesis. Además, se estudió la excitotoxicidad, mecanismo que se postula como vía final de la muerte de células nerviosas por diversas causas.

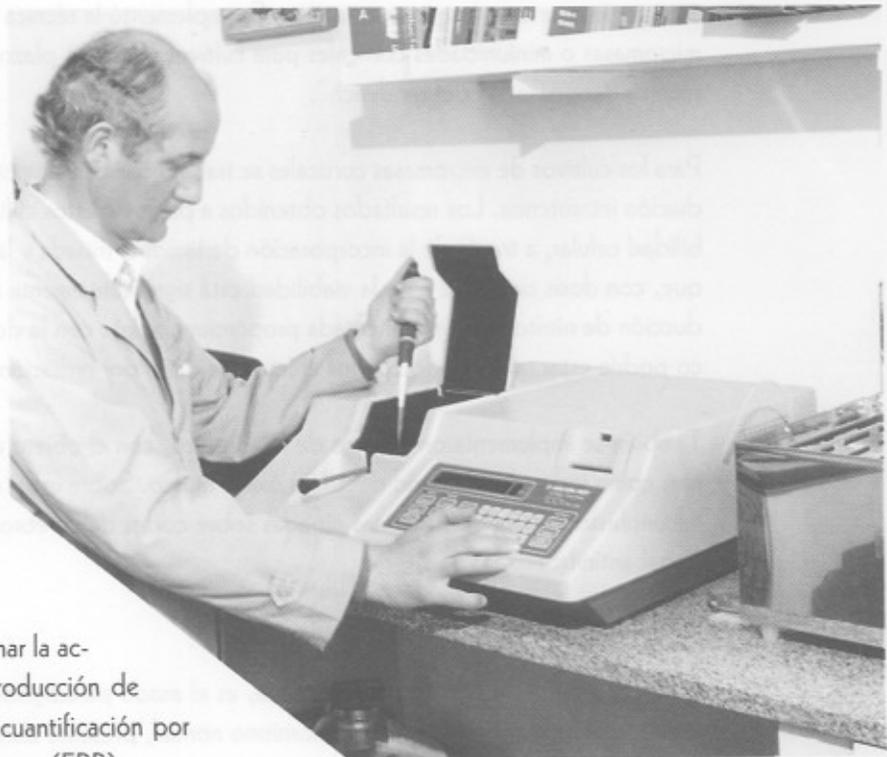
Para llevar a cabo estos estudios, se trabajó con un modelo animal de irradiación intrauterina, utilizando ratas Wistar en el día 17 de edad gestacional que fueron irradiadas, en forma prenatal, con una dosis de 1 Gy. Se obtuvieron muestras de corteza cerebral entre 1 y 24 horas postirradiación y durante los días 2 y 9 de vida postnatal. Sobre estas muestras, y otras irradiadas in vitro, se desarrollaron estudios bioquímicos, enzimáticos y celulares descriptos a continuación:

#### **Estudio del comportamiento de las enzimas óxido nítrico sintetasa neuronal (NOSn) y DT diaforasa**

El óxido nítrico aparece en diversos sistemas relacionado con mecanismos de comunicación intercelular y es el principal modulador de la liberación de glutamato. Este es el principal neurotransmisor excitatorio del sistema nervioso central, ya que actúa sobre un receptor postsináptico, generando la despolarización de la célula nerviosa. Un exceso en la estimulación del receptor lleva, a través de distintos mecanismos, a la muerte celular (excitotoxicidad). En el sistema nervioso central en desarrollo, el óxido nítrico participa, presumiblemente, en el control de mecanismos de migración de neuronas, que podrían verse alterados al variar la concentración de óxido nítrico por efecto de la radiación.

#### **Medición de actividad enzimática de DT diaforasa por espectrofotometría**

Se procedió a la determinación de la actividad enzimática de los dos tipos de NOSn (constitutiva e inducible) y de la DT diaforasa, en células de cerebro del modelo animal de irradiación intrauterina. Los resultados obtenidos evidencian que durante las primeras (1-6) horas postirradiación, se verifica un aumento significativo de la actividad de las enzimas en estudio, con respecto a los grupos control no irradiados.



Además, con el fin de correlacionar la actividad de las enzimas con la producción de óxido nítrico, se implementó su cuantificación por resonancia paramagnética electrónica (EPR).

### **Estudio de la producción de lipoperóxidos radioinducidos en el sistema nervioso central**

Se estudiaron los productos de lipoperoxidación, en el marco del fenómeno del stress oxidativo radioinducido, utilizando células de cerebro del modelo animal de irradiación intrauterina. Se obtuvieron muestras durante el período prenatal y postnatal, con el objeto de estudiar el fenómeno en forma tardía y coincidente con el período de extensión de membranas y acumulación de ácidos grasos poli-saturados, durante la sinaptogénesis.

Las determinaciones se llevaron a cabo a través de la técnica de medición de sustancias reactantes con el ácido tiobarbitúrico. Se observó que había un aumento en la producción de estas sustancias en muestras irradiadas, con respecto a los controles, en las muestras extraídas 2 y 9 días de vida postnatal, es decir, como fenómeno tardío y relacionado con el fuerte incremento en la extensión de membranas durante la sinaptogénesis.

### **Comportamiento de radicales orgánicos y ascorbilo**

El ácido ascórbico constituye uno de los más importantes sistemas antioxidantes no enzimáticos, siendo la oxidación del mismo un indicador biológico de eventos oxidativos. Se estudiaron estos sistemas por resonancia paramagnética electrónica y los resultados obtenidos no resultaron concluyentes, continuándose el estudio de la medición de la concentración de ácido ascórbico total, por la técnica de cromatografía líquida de alta performance.

### **Cultivos de células nerviosas**

El cultivo de células nerviosas (gliales y neuronales) puede configurar un instrumento de gran utilidad para el estudio de los efectos radioinducidos en el sistema nervioso central, ya que permiten trabajar con un sistema dinámico y aislado, sobre el que se puede intervenir sin el riesgo de efectos sistémicos, como ocurre en los sistemas in vivo. Se implementó la técnica de cultivo de células nerviosas de micromasas o miniunidades corticales para cultivos de corto plazo, y cultivos de largo plazo con la técnica denominada "del sandwich".

Para los cultivos de micromasas corticales se trabajó con células obtenidas del modelo animal de irradiación intrauterina. Los resultados obtenidos a partir de estos cultivos, en los que se determinó viabilidad celular, a través de la incorporación de timidina tritiada y la producción de nitritos, muestran que, con dosis de 1 y 2 Gy, la viabilidad está significativamente disminuida, al tiempo que la producción de nitritos está incrementada proporcionalmente con la dosis, sugiriendo que el óxido nítrico podría estar relacionado con los efectos de daño por radiación en el sistema nervioso central.

También se implementaron cultivos de largo plazo, con el objeto de estudiar la nitración de proteínas, como indicador de daño debido a óxido nítrico. Sobre estos cultivos se realizó la identificación inmunohistoquímica de proteínas nitradas sobre cortes de cerebro, utilizando un anticuerpo monoclonal antinitrotirosina.

### **Estudios sobre apoptosis radioinducida**

La apoptosis o muerte celular programada, es el modo paradigmático de muerte radioinducida durante el desarrollo. Se trata de un mecanismo normal, presente durante todo el desarrollo embrionario del sistema nervioso central, pero que en presencia de ciertos neurotóxicos se incrementa hasta generar pérdida celular.

Se realizaron experiencias con la técnica de micromasas corticales, irradiadas in vitro, tomando muestras entre 3 y 9 horas postirradiación y analizadas por microscopía óptica, microscopía de fluorescencia y citometría de flujo, para la observación de la apoptosis. Los resultados preliminares obtenidos señalan que este fenómeno es verificable, en un lapso entre 4 y 6 horas postirradiación.

### **INDICADORES DIAGNÓSTICOS Y PRONÓSTICOS APLICABLES A SITUACIONES DE SOBREENEXPOSICIÓN ACCIDENTAL**

Frente a una situación accidental, en la que se presume la existencia de individuos sobreexpostos a radiaciones ionizantes, la estimación temprana de las dosis involucradas constituye un paso esencial e indispensable, previo a la toma de decisiones relacionadas con la conducta terapéutica. Junto a la dosimetría física y a la evaluación clínica temprana, el desarrollo de indicadores biológicos, constituye una prioridad para la estimación de la dosis absorbida y el establecimiento de criterios diagnósticos y pronósticos.

Con el objeto de disponer de dosímetros e indicadores biológicos que permitan la estimación temprana del rango de dosis absorbida, se encararon las siguientes tareas:

#### **Estudio de los efectos radioinducidos en subpoblaciones linfocitarias**

La médula ósea contiene el tejido hematopoyético, en el que un célula única (célula fuente o "stem cell") da origen a los distintos linajes celulares. La radiación induce daño a nivel del tejido hematopoyético, de intensidad variable según la dosis. El linfocito es una célula muy radiosensible, por lo que la disminución en el número de linfocitos circulantes, constituye uno de los signos más precoces de sobreexposición a radiaciones ionizantes. La serie linfocítica se compone de distintas subpoblaciones morfológicamente similares, pero funcionalmente diferentes: linfocitos B, linfocitos T inductores, linfocitos T supresores y linfocitos NK y es posible identificarlas a través de la marcación con anticuerpos monoclonales de ciertos antígenos, característicos de su membrana celular.

La citometría de flujo es una técnica que permite analizar, cuantificar y clasificar células en suspensión, en base a parámetros tales como tamaño y granulosidad. Con la utilización de anticuerpos conjugados con colorantes fluorescentes, que se fijan específicamente a distintas estructuras de la célula, es posible obtener información adicional relacionada con la intensidad de fluorescencia emitida. El advenimiento de esta técnica ha permitido automatizar las técnicas de cuantificación celular, mejorar la precisión y la rapidez del análisis.

Se estudiaron las variaciones radioinducidas en las distintas subpoblaciones linfocitarias y la dinámica de su repoblación post-irradiación, con el objeto de evaluar su aplicabilidad en situaciones de sobreexposición accidental.

Se realizaron ensayos in vivo, con muestras de sangre de pacientes sometidos a irradiaciones terapéuticas de cuerpo entero, previas a trasplantes de médula ósea. Las muestras fueron tomadas inmediatamente antes (control) y 24 horas después de una dosis de 3 Gy en todo el cuerpo. También, se realizaron ensayos in vitro, con muestras de sangre de donantes adultos sanos, que fueron irradiadas con una fuente de cobalto 60.

Se realizó la cuantificación, por citometría de flujo, de las subpoblaciones linfocitarias, observando que todas experimentaban una caída en los valores absolutos, siendo los linfocitos B los que presentaban mayor radiosensibilidad. También, se observó un subtipo de linfocitos NK relativamente más radiorresistente. Esta radiorresistencia podría jugar un rol en el desarrollo de los fenómenos de rechazo, observados luego de un trasplante de médula ósea alogénico en las aplasias medulares radioinducidas, ya que los linfocitos NK tiene una función en la vigilancia inmunológica, a través de su actividad citotóxica, contra una variedad de células tumorales, células infectadas por virus y células alogénicas.

Se estudiaron también las alteraciones sobre la actividad funcional de los linfocitos NK, a través de ensayos de citotoxicidad concluyéndose que, la exposición a radiaciones ionizantes no solo disminuye el número absoluto de linfocitos NK sino que además, afecta su actividad funcional citotóxica.

Los resultados obtenidos permiten inferir que el análisis del comportamiento de subpoblaciones linfocitarias por citometría de flujo, puede constituir una herramienta útil para el diagnóstico y seguimiento evolutivo en casos de sobreexposición accidental. La facilidad para la obtención de las muestras de sangre venosa periférica, y la rapidez en la obtención de los resultados, dentro de las primeras 24 horas, permitirían una evaluación precoz del alcance de la afectación medular en pacientes sobreexpuestos a radiación.

#### **Evaluación de indicadores de stress oxidativo radioinducido**

La producción de especies activas del oxígeno se postula como el principal mecanismo indirecto de daño radioinducido en sistemas biológicos. Existe un delicado equilibrio entre la generación de radicales libres y la capacidad funcional de los sistemas de defensa antioxidante, representados por enzimas y otras moléculas orgánicas. La pérdida de este equilibrio, resulta en un estado denominado stress oxidativo, en el que se desencadena una secuencia de eventos autosostenidos, que culminan en la afectación de estructuras claves de la célula tales como la molécula de ADN y la peroxidación de los lípidos de las membranas celulares, ocasionando daño celular.

En el estudio del stress oxidativo, se evaluaron las modificaciones radionducidas en la capacidad antioxidante total del plasma (TRAP), en respuesta a la injuria oxidativa y su relación con los niveles plasmáticos de lipoperóxidos (TBARS). Asimismo, se evaluó la generación de óxido nítrico sistémico, a través de la determinación de nitrato en plasma y se correlacionaron los resultados con el curso clínico de la aplasia medular radioinducida. Los resultados de los estudios, sugieren que el incremento del nivel de TBARS y la disminución de la TRAP, pueden ser de utilidad en la evaluación temprana de la magnitud del daño asociado a una irradiación corporal total y que la recuperación de los valores basales de TBARS, entre la primera y segunda semanas post-irradiación, podría constituir un indicador para el pronóstico evolutivo de los pacientes sobreexpuestos a radiación.

#### **Implementación de la técnica de resonancia paramagnética electrónica**

La dosimetría biofísica basada en la espectroscopía de resonancia paramagnética electrónica, en muestras sólidas de hueso y diente de individuos expuestos a radiaciones ionizantes, constituye una técnica complementaria a la dosimetría biológica, de demostrada utilidad en las reconstrucciones dosimétricas en situaciones accidentales. Este método puede ser aplicado, también, en una variedad de materiales orgánicos tales como tejidos, azúcares y aminoácidos cristalizados.

La dosimetría por resonancia paramagnética electrónica es una medida de la dosis acumulada, ya que los materiales analizados operan como verdaderos detectores que mantienen la huella del pasaje de la radiación durante largos períodos.

Con el objeto de disponer de este dosímetro, para su aplicación en casos de sobreexposición accidental, se trabajó en la implementación de esta técnica. Se consideró la preparación de las muestras, trabajando sobre huesos de animales de experimentación y esmalte proveniente de piezas dentarias humanas. Las muestras fueron irradiadas *in vitro*, para la construcción de una curva de calibración. Luego se realizó la evaluación de la señal de resonancia paramagnética electrónica, comparando los espectros de hueso control e irradiado. También, se evaluó el procedimiento de reconstrucción de dosis, ya sea a través del método de la curva de calibración dosis-respuesta o utilizando una calibración individual.

#### **Evaluación de la frecuencia de mutaciones genéticas como indicador de daño radioinducido**

Las radiaciones ionizantes actúan sobre una célula, produciendo alteraciones en las distintas moléculas, siendo el ácido desoxirribonucleico (ADN) el blanco más importante. Las lesiones más frecuentes en el ADN son la ruptura de una o de ambas cadenas de la doble hélice y deleciones de diversos tamaños. Como consecuencia de este proceso resultan mutaciones que pueden o no ser reparadas, por los mecanismos propios de la célula.

La cuantificación y análisis del daño al ADN se puede realizar por diversos métodos, por ejemplo, estudiando la frecuencia de mutaciones en genes particulares como el que codifica para la enzima Hipoxantina guanina fosforribosil transferasa (HGPRT), y posteriormente analizando la secuencia de bases.

En esta área, se procedió a la implementación de la técnica para la determinación de la frecuencia de mutaciones en el gen HGPRT, con el fin de evaluar su aplicabilidad y utilidad en la estimación de la dosis absorbida en personas sobreexpuestas accidentalmente a radiaciones ionizantes.

Para establecer las condiciones de trabajo y los métodos de detección, se utilizó una línea de células denominada V79. Estas células fueron irradiadas con una fuente de cobalto 60, con dosis de 2, 4, y 6 Gy, comprobándose un aumento de la frecuencia de mutaciones. Los resultados obtenidos permiten considerar que se han establecido y fijado los parámetros necesarios para la determinación de la frecuencia de mutaciones en este gen y que la metodología, puede ser aplicada en otros campos de investigación, como ser el estudio de la radiosensibilidad de otros tipos de células.

Para la aplicación e interpretación práctica de esta técnica, en situaciones accidentales, se debe tener en cuenta las características particulares del individuo que influyen en los resultados, tales como: edad, dieta, hábito de fumar y nivel basal de mutaciones.

### **ASESORAMIENTO MÉDICO EN RADIOPROTECCIÓN**

En caso de ocurrir un accidente radiológico o nuclear, la ARN cuenta con un grupo de especialistas para la evaluación y manejo, desde el punto de vista médico, de las personas sobreexpuestas y puede ser requerido para intervención o asesoramiento sobre los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Este grupo desarrolla un conjunto de tareas orientadas a la planificación y organización del accionar médico, tales como:

### **Guía de procedimientos**

Se ha elaborado una guía para la asistencia de personas sobreexpuestas a las radiaciones ionizantes, concebida como una herramienta para la capacitación y como una guía práctica para la acción frente a una situación accidental. Esta guía está dividida en tres partes o capítulos, abordando los diferentes tipos de exposiciones en relación al manejo, evaluación, tratamiento y seguimiento de las personas expuestas.

En el capítulo referido a contaminación externa, se desarrolla el tratamiento de la contaminación de piel sana y con heridas, de acuerdo al radionucleido contaminante y su distribución anatómica, y en el anexo se indican las formas de preparación de las soluciones descontaminantes.

En el capítulo referido a contaminación interna, se abordan las diferentes etapas de la misma, y se adjunta un anexo con un listado de fármacos utilizados en el tratamiento, como así también, un listado de radionucleidos de interés médico y el tratamiento indicado en cada caso, con especial énfasis en los riesgos de la contaminación con radioiodos.

En el capítulo referido a irradiación externa, se tratan las diferentes formas de exposiciones externas accidentales (globales, parciales y localizadas), el concepto de Triage (clasificación de personas accidentadas en grupos de riesgo, con el fin de priorizar la asistencia médica), criterios de hospitalización y tratamiento, y se completa con un protocolo para la evaluación médica y de laboratorio.

### **Constitución de un sistema de atención para pacientes sobreexpuestos**

El manejo de pacientes sobreexpuestos a las radiaciones ionizantes requiere la intervención de especialistas en distintos campos de la medicina general, la radiopatología y la radioprotección.

Con el objeto de garantizar una respuesta médica adecuada en casos de sobreexposiciones a las radiaciones ionizantes, se concretaron acuerdos con distintas instituciones. Estos acuerdos se desarrollan dentro de un programa de cooperación entre las distintas instituciones participantes, para la evaluación, asistencia y seguimiento de los pacientes sobreexpuestos e incluyen asesoramiento técnico, docencia e investigación.

#### **✓ Convenio de cooperación con el Hospital de Clínicas**

Se firmó un convenio de cooperación científico-técnica entre la ARN y el Hospital Escuela José de San Martín (Hospital de Clínicas), para la atención de pacientes sobreexpuestos. Se realizaron reuniones con el fin de elaborar un programa de entrenamiento y capacitación del personal médico y paramédico del hospital, y para la discusión de puntos referidos a la coordinación operativa de los grupos.

#### **✓ Convenio de cooperación con el Hospital de Quemados**

Se firmó un convenio de cooperación científico-técnica entre la ARN y el Hospital de Quemados, para la asistencia de personas accidentalmente sobreexpuestas a las radiaciones ionizantes, especialmente en el caso de quemaduras radiológicas. En el área de entrenamiento y capacitación del personal del hospital, se colaboró en el curso de postgrado "Diagnóstico y tratamiento integral del paciente quemado".

#### ✓ Convenio de cooperación con el Hospital Naval

Se continuaron las gestiones tendientes a la concreción de un convenio de cooperación científica con el Hospital Naval Pedro Mallo. Este hospital estaría destinado a la evaluación y tratamiento de pacientes que presentan exposición global a altas dosis, en los que se requiere una infraestructura adecuada para el manejo de pacientes inmunosuprimidos. Además, se continuaron las actividades científicas conjuntas con la Unidad de Transplante Medular del Hospital Naval, relacionadas con el estudio de indicadores diagnósticos y pronósticos en pacientes sometidos a irradiaciones terapéuticas.

#### Asesoramiento médico

La respuesta a demandas de asesoramiento médico, en casos de exposiciones reales o potenciales a las radiaciones ionizantes, constituye una de las actividades del grupo de Radiopatología.

Se respondió a los pedidos de asesoramiento médico en el ámbito de las exposiciones ocupacionales y las consultas estuvieron relacionadas con evaluaciones individuales en trabajadores, con antecedentes patológicos o enfermedades en curso, que podrían modificar los riesgos asociados a la exposición a la radiación y estimación de la probabilidad de causación. Este tipo de asesoramiento, en general, es solicitado en el marco de pericias judiciales, con el objeto de determinar la posible asociación causal entre una determinada patología y el antecedente de exposición a las radiaciones ionizantes.

Se respondió a consultas sobre exposiciones médicas, realizando la evaluación clínica de pacientes que presentaban lesiones presuntamente radioinducidas como secuelas de prácticas médicas, derivados por distintos servicios hospitalarios.

En el caso de exposiciones prenatales, la exposición de mujeres gestantes a radiaciones ionizantes constituye un motivo de consulta relativamente frecuente. Las demandas provienen habitualmente de exposiciones médicas (radiodiagnóstico, radioterapia, medicina nuclear). En colaboración con los grupos de dosimetría física y dosimetría de la contaminación interna, se realizaron estimaciones de las dosis en el feto y de los riesgos asociados, de acuerdo a la edad gestacional.

Se mantuvo una permanente interacción con los servicios médicos de las centrales nucleares de Atucha y Embalse, a través del grupo médico de la empresa NASA. Esta interacción se llevó a cabo en el plano del asesoramiento, para la organización de la respuesta médica en situaciones de emergencia radiológica, tales como: evaluación de centros posibles de derivación de pacientes, listado de fármacos indispensables para el tratamiento de la contaminación radiactiva y colaboración en actividades docentes de carácter informativo y de capacitación para el personal médico y paramédico potencialmente involucrado.

Se elaboró un inventario de fármacos destinados al tratamiento de individuos que presentan contaminación radiactiva, externa o interna, que se encuentra disponible en caso de ser necesaria su utilización, por la ARN o por los potenciales centros de derivación.

En el ámbito de la interrelación con centros internacionales de radiopatología, se participó de la reunión de coordinación para emergencias médicas de la Red de Asistencia Médica para Emergencias Radiológicas (REMPAN) de la OMS. Además, en el marco de proyectos ARCAL-OIEA, se presentó un programa de asistencia médica para enfrentar accidentes radiológicos en el continente americano, contando ya con la adhesión de once países de la región.

## ACTIVIDADES DE LOS LABORATORIOS DE ANÁLISIS RADIOQUÍMICOS

En los laboratorios de análisis radioquímicos, se procesan muestras provenientes de los monitorajes ambientales y muestras obtenidas durante las inspecciones, evaluaciones y auditorías llevadas a cabo por personal de la ARN, en el desarrollo de su función regulatoria.

Se analizan muestras de distintos tipos, entre ellas: aguas, suelos, sedimentos, vegetales, filtros (muestras de aire y sweep-tests) y muestras biológicas (orinas, heces y soplidos nasales). En dichas muestras se determinan uranio natural, uranio enriquecido, plutonio, americio, curio, neptunio, radio, torio, tritio, fósforo 32, estroncio 90, polonio 210 y actividad alfa y beta total.

Dada la necesidad de analizar muestras de diversos orígenes, con actividades muy variables y requerimientos muy diferentes en sus procesamientos, fue necesario implementar laboratorios de análisis radioquímicos independientes, contando cada uno de ellos con su correspondiente equipamiento, servicios, materiales y reactivos, no permitiéndose el intercambio entre los mismos.

- ✓ Laboratorio destinado al análisis de muestras con actividades elevadas, utilizado también para desarrollos radioquímicos. Este laboratorio cuenta con campanas de extracción y muflas para mineralización por vía seca.
- ✓ Laboratorio para el análisis de muestras con actividades intermedias y para el procesamiento de muestras provenientes de los monitorajes radiológicos ambientales. Este laboratorio dispone de un equipo de fusión a 1100° C, para la determinación de uranio por fluorimetría; campanas de extracción y placas calefactoras para mineralización por vía húmeda.
- ✓ Laboratorio para el procesamiento de muestras ambientales con muy baja actividad, donde, además, se procesan las muestras pertenecientes a las intercalibraciones. Este laboratorio cuenta con sistemas para electrodepositar muestras para ser medidas por espectrometría alfa.
- ✓ Laboratorio para el procesamiento de muestras en las que se determina tritio. Este laboratorio cuenta con equipos de destilación y un sistema de enriquecimiento de tritio a través de electrólisis alcalina.
- ✓ Laboratorio para el procesamiento de muestras en las que se determina estroncio 90. Este laboratorio dispone de equipamiento para el procesamiento de muestras ambientales y para realizar técnicas extractivas.
- ✓ Laboratorio para el procesamiento de muestras relacionadas con la determinación de carbono 14 en residuos radiactivos.

A continuación se resumen las mediciones llevadas a cabo en los laboratorios de análisis radioquímicos, durante 1997:

- ✓ Se realizaron 635 análisis de diferentes radionucleidos alfa y beta emisores, 80 análisis de tritio y 300 análisis de estroncio 90.
- ✓ Se procesaron las muestras de aguas, sedimentos, vegetales y filtros correspondientes a las intercalibraciones semestrales organizadas por el EML (EE. UU.), validando las técnicas analíticas utilizadas en las determinaciones.
- ✓ Participación en la intercalibración anual de uranio en orina organizada por el Radiation Protection Bureau (Health Canada). En este ejercicio todos los resultados informados, así como, el error relativo promedio y la precisión relativa, estuvieron dentro de los límites establecidos por el Laboratorio de Referencia, según el criterio adoptado por el American National Standard Institute (ANSI).



Laboratorio de procesamiento  
de muestras ambientales

A continuación se detallan los desarrollos llevados a cabo durante 1997:

✓ **Determinación de americio 241 y curio 244 en presencia de otros actínidos.**

La técnica desarrollada consiste en separar, purificar y medir bajos niveles de americio y curio en diferentes muestras ambientales, tales como, sedimentos, vegetales, aguas y filtros. Se resolvieron diversos problemas analíticos, seleccionando una secuencia separativa que utiliza una precipitación con hierro (III), posterior intercambio aniónico y catiónico con resinas, y extracción con solventes orgánicos apropiados. En estas condiciones la muestra puede ser electrodepositada, paso previo a su medición por espectrometría alfa. Los límites de detección fueron estimados en: 0,3 mBq/l para aguas, 15 mBq/kg para suelos y 0,2 mBq/filtro. La técnica fue validada a través de su utilización en el procesamiento de muestras en las intercalibraciones.

✓ **Optimización de la determinación de radio 226 en aguas y sedimentos.**

Con el propósito de disminuir los límites de detección de la técnica, se trabajó en la estandarización de las condiciones de medición del radón 222 y sus descendientes, por centelleo líquido con discriminación por forma de pulso. Los límites de detección alcanzados fueron estimados en: 2,0 mBq/l para aguas y 10 mBq/g para sedimentos.



Determinación de uranio  
por fluorimetría

✓ **Implementación de la técnica para la medición de fósforo 32.**

Se realizó la estandarización de una técnica destinada a la determinación de productos de activación en pelo y lana, para la estimación de la dosis de neutrones en caso de accidentes nucleares. Se utilizan técnicas extractivas y medición por centelleo líquido.

✓ **Determinación de tritio e hierro 55.**

En la técnica de determinación de tritio con destilación, la presencia de hierro 55 produce interferencias en el conteo por centelleo líquido, ya que un compuesto volátil que se forma con el cloruro pasa al líquido destilado. Para evitar esta interferencia, se procedió a implementar una técnica con neutralización durante la destilación, para fijar el hierro 55. También, se fijaron las condiciones para el punto final de la destilación y el posterior ajuste de la acidez con nitrato de plomo, para obtener condiciones de conteo óptimas. Los rendimientos obtenidos fueron: 98% para tritio y 99% de retención de hierro 55. La técnica fue validada a través de su utilización en el procesamiento de muestras en las intercalibraciones.

✓ **Optimización de la técnica para la determinación de estroncio 90 en alimentos.**

Se estandarizó el procedimiento extractivo, en medio ácido, para muestras de alimentos y la medición por centelleo líquido, con el fin de mejorar el rendimiento. Los límites de detección fueron estimados en: 10 mBq/kg para alimentos sólidos y líquidos y 1 mBq/l para aguas potables.

✓ **Determinación de carbono 14 y tritio en efluentes gaseosos.**

Con el propósito de determinar la concentración de carbono 14 y tritio en descargas de efluentes gaseosos de centrales nucleares, se implementó una técnica que consiste en la adsorción de dióxido de carbono, la oxidación de metano y monóxido de carbono y posterior medición por centelleo líquido. El método fue estandarizado para dióxido de carbono y agua tritiada, llevándose a cabo dos muestreos en la CNAI.

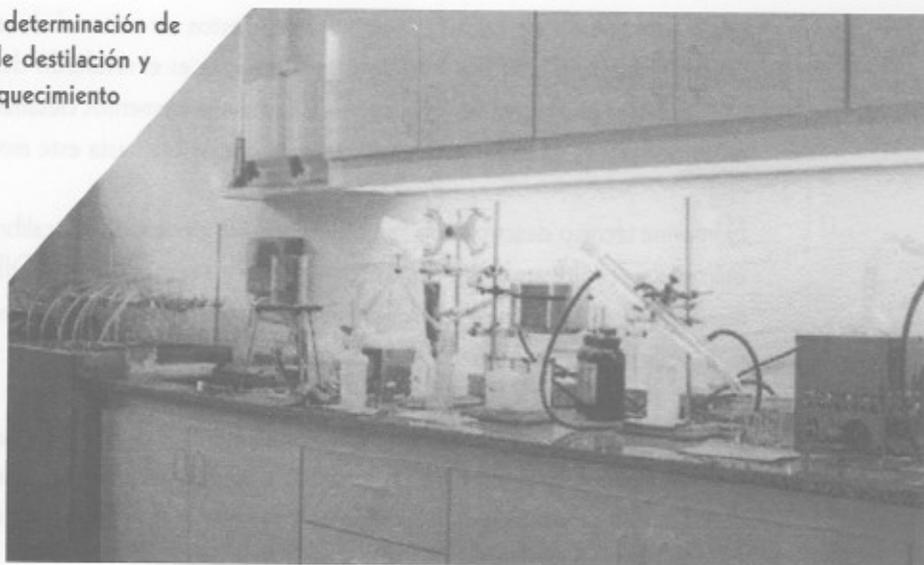
✓ **Determinación de carbono 14 en residuos radiactivos.**

Se trabajó en la implementación de una técnica que permita determinar la concentración de carbono 14 en residuos radiactivos líquidos y sólidos. Las muestras líquidas consideradas, provienen de los sistemas de enfriamiento del circuito primario de centrales nucleares y también de los acuíferos cercanos a las trincheras de descarga de residuos radiactivos. La técnica implementada involucra la determinación de carbono 14 total (inorgánico y orgánico) y se continúa con la optimización de la adsorción final.

✓ **Separación y determinación de emisores beta en residuos radiactivos.**

Con el objeto de disponer de una técnica que permita la determinación de estroncio/itrio 90, níquel 63, hierro 59, cobalto 60, cerio 144 y cesio 137, en residuos provenientes de centrales nucleares, se ensayó una marcha separativa basada en extracción cromatográfica con resinas de intercambio iónico, previa concentración por precipitación. Se trabajó con sustancias portadoras, llevándose a cabo ensayos aislados de cada etapa de la separación, para verificar los factores de separación de interferentes. Se evaluó la posibilidad de que algunos emisores beta fueran medidos por centelleo líquido y otros por contador proporcional, previa electrodeposición.

Laboratorio para la determinación de tritio con sistemas de destilación y enriquecimiento

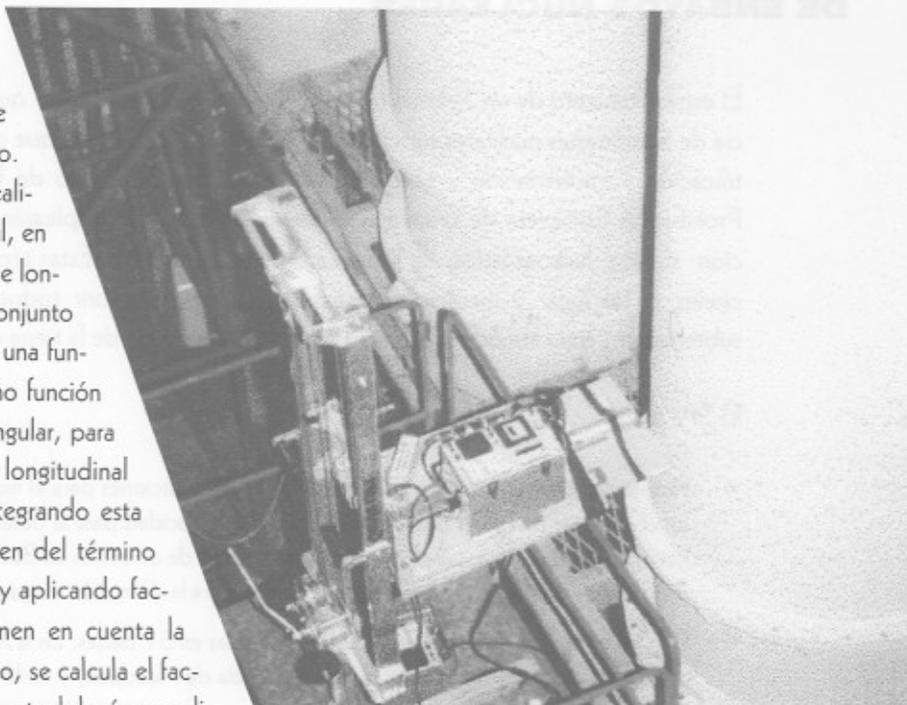


### VERIFICACIÓN DEL INVENTARIO DE MATERIAL NUCLEAR EN PLANTAS DE ENRIQUECIMIENTO DE URANIO POR DIFUSIÓN GASEOSA

Como parte de los programas de la ARN para salvaguardias y en el marco del acuerdo entre la ARN y el DOE (EE. UU.) y dentro del Programa de Actividades Soporte para Salvaguardias del OIEA, se continuó con el desarrollo de una metodología para la determinación del inventario de material nuclear en la planta de enriquecimiento de uranio por difusión gaseosa (CNEA-Pilcaniyeu), utilizando técnicas de análisis no destructivo por espectrometría gamma.

Medición de un difusor en la Planta de enriquecimiento de uranio

El sistema de medición consiste en un detector de  $INa(Tl)$  con un colimador de plomo, desarrollado al efecto. La calibración del sistema se realiza midiendo una fuente puntual, en distintas posiciones sobre un eje longitudinal y otro transversal al conjunto detector-colimador. Se define una función eficiencia del sistema como función de una variable radial y otra angular, para un plano que contiene al eje longitudinal del sistema de detección. Integrando esta función, sobre todo el volumen del término fuente (un tercio del difusor) y aplicando factores de corrección, que tienen en cuenta la atenuación en un difusor limpio, se calcula el factor de calibración. La misma metodología es apli-



cable para el caso de caños y tambores, con restos de material de proceso, con solo cambiar la geometría de medición. La metodología propuesta es el resultado de la combinación de las técnicas utilizadas en Argentina y en EE. UU. Contiene elementos desarrollados, probados y validados en ambos países y resulta ser la mejor técnica disponible hasta este momento.

El informe técnico describiendo la metodología de medición y de calibración, el equipo de medición utilizado y el software asociado, fue presentado y aceptado por el OIEA. Actualmente, se halla en marcha la etapa de actualización del software existente, para obtener una versión más compacta y rápida, que pueda ser utilizada por los inspectores del OIEA.

Por otra parte, se continuaron los trabajos de desarrollo del método para la determinación del grado de enriquecimiento por análisis no destructivo por espectrometría gamma, para el caso en que no se conozcan las características del recipiente contenedor del uranio y no se disponga de patrones adecuados para esa geometría.

La técnica aplicada consiste en medir la muestra con un detector de germanio hiperpuro (GeHp) y calcular las intensidades de las radiaciones gamma más importantes emitidas por los isótopos cuya relación se desea determinar (uranio 235 y uranio 238).

Con esta metodología, se analizaron 10 mediciones realizadas en tuberías, difusores, recipientes y cisternas de la planta de enriquecimiento de uranio, 15 en placas de combustible para reactores de investigación al 90, 20 y 1,2% de enriquecimiento y 75 sobre muestras de polvos de óxido de uranio provenientes de la planta industrial Córdoba, con enriquecimientos del 0,85 y 3,5%. Los resultados obtenidos demostraron que el método es apto, y se continúa trabajando en los ajustes necesarios para el caso de altos grados de enriquecimiento.

## **TRATADO DE PROHIBICIÓN COMPLETA DE ENSAYOS NUCLEARES**

El establecimiento de un Sistema Internacional de Vigilancia (SIV) que permita detectar la ocurrencia de explosiones nucleares superiores a 1 kilotón y, en caso de que estas ocurran, permitir su identificación, caracterización y ubicación en forma precisa es uno de los objetivos del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (CTBT). Se emplearán cuatro tecnologías de detección: sísmica, hidroacústica, de radionucleidos e infrasónica. Estas técnicas combinadas con inspecciones en el lugar y mediciones asociadas permitirán cubrir todos los escenarios (explosiones subterráneas, en la atmósfera, subacuáticas, en la superficie de la tierra o del agua, o cerca de ellas).

El SIV prevé:

- ✓ **Para la red de detección de radionucleidos:** 80 estaciones para el monitoreo de aerosoles radiactivos en el aire, 40 de cuales deberán tener también capacidad para la detección de gases nobles. En la Argentina, se ubicarán 3 estaciones para la detección de aerosoles en Buenos Aires, Salta y Bariloche. Las dos primeras también deberán tener capacidad para la detección de gases nobles.
- ✓ **Para la red sísmológica:** 119 estaciones ubicadas en 57 países. En la Argentina se encuentran ubicadas dos de estas estaciones en Paso Flores (provincia de Neuquén) y en Ushuaia. Estas estaciones, por de-

cisión del Ministerio de Relaciones Exteriores, están a cargo del Instituto de Previsión Sísmica (IMPRES) sito en la provincia de San Juan.

- ✓ **Para la red de infrasonido:** 60 estaciones. En Argentina serán ubicadas dos en las mismas localidades que las estaciones sismológicas.

La instalación y operación de las estaciones de infrasonido y detección de radionucleidos es responsabilidad de la Autoridad Regulatoria Nuclear la cual cuenta con un proyecto específico dentro de su plan de trabajo anual para llevar a cabo estas tareas.

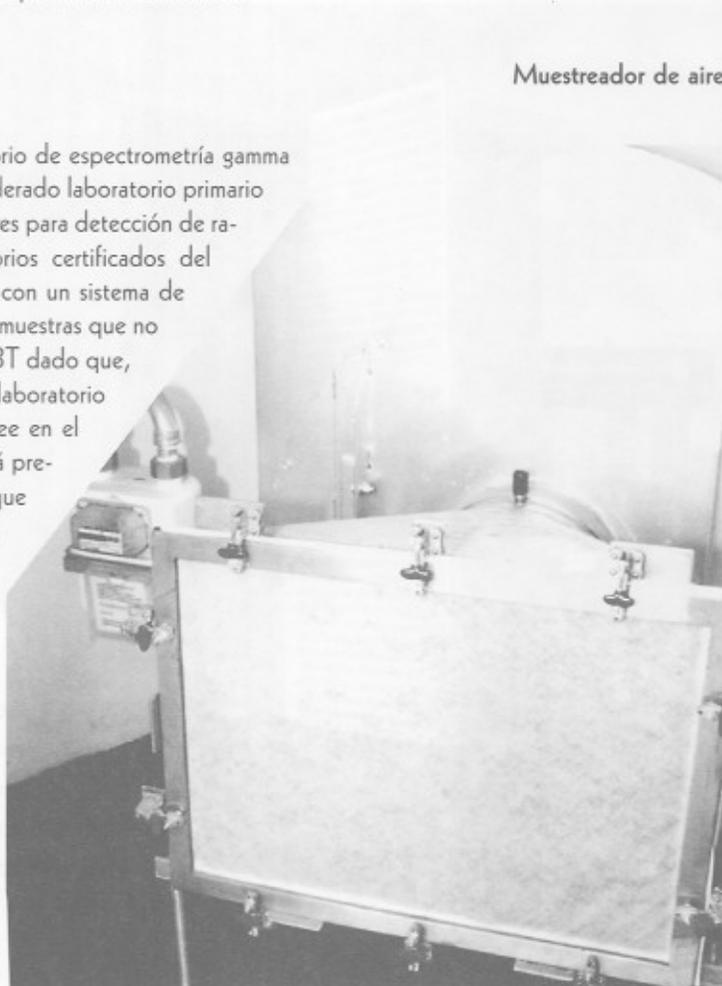
### Detección de radionucleidos

- ✓ Se completó la construcción de la estación de aerosoles de Buenos Aires para la detección de aerosoles radiactivos en el aire, la cual está ubicada en la Sede Central de la ARN. Esta estación está equipada con dos equipos muestreadores idénticos, para asegurar la continuidad de la operación en caso de rotura de uno de ellos. El equipo desarrollado y construido para la toma de muestras está basado en una unidad de aspiración centrífuga comercial de la línea de alta presión, de bajo costo y libre de mantenimiento preventivo. Utiliza como medio filtrante papel tipo HEPA cuya superficie es de 0,17 m<sup>2</sup>. Su performance supera los requerimientos del CTBT dado que, el caudal promedio para 24 hs de muestreo es de 650 m<sup>3</sup>/h y la eficiencia de retención para aerosoles de 0,2 μ de diámetro es mayor al 99,99%. La operación de esta estación se inició en octubre de 1996 y en febrero de 1997 fueron instalados los nuevos muestreadores para cumplir los requerimientos del CTBT. Se prevé una nueva actualización para incorporarle instrumental meteorológico, de medición continua del caudal de muestreo y una unidad de backup de energía eléctrica, según los últimos requerimientos del CTBT.

Muestreador de aire

- ✓ Se construyó y comenzó a operar un laboratorio de espectrometría gamma en la Sede Central de la ARN que será considerado laboratorio primario para el análisis de los filtros de las tres estaciones para detección de radionucleidos e integrará la red de laboratorios certificados del CTBT. Actualmente, este laboratorio cuenta con un sistema de espectrometría gamma para la medición de las muestras que no cumple con todas las especificaciones del CTBT dado que, se instaló un sistema que estaba en uso en el laboratorio de mediciones ambientales que la ARN posee en el Centro Atómico Ezeiza. Durante 1998, está prevista la incorporación de cuatro sistemas que cumplen con los requerimientos del CTBT. Esto posibilitará la medición de las muestras producidas en las estaciones de Buenos Aires, Salta y Bariloche y el cumplimiento de los programas de garantía de calidad requeridos por el CTBT para estos laboratorios.

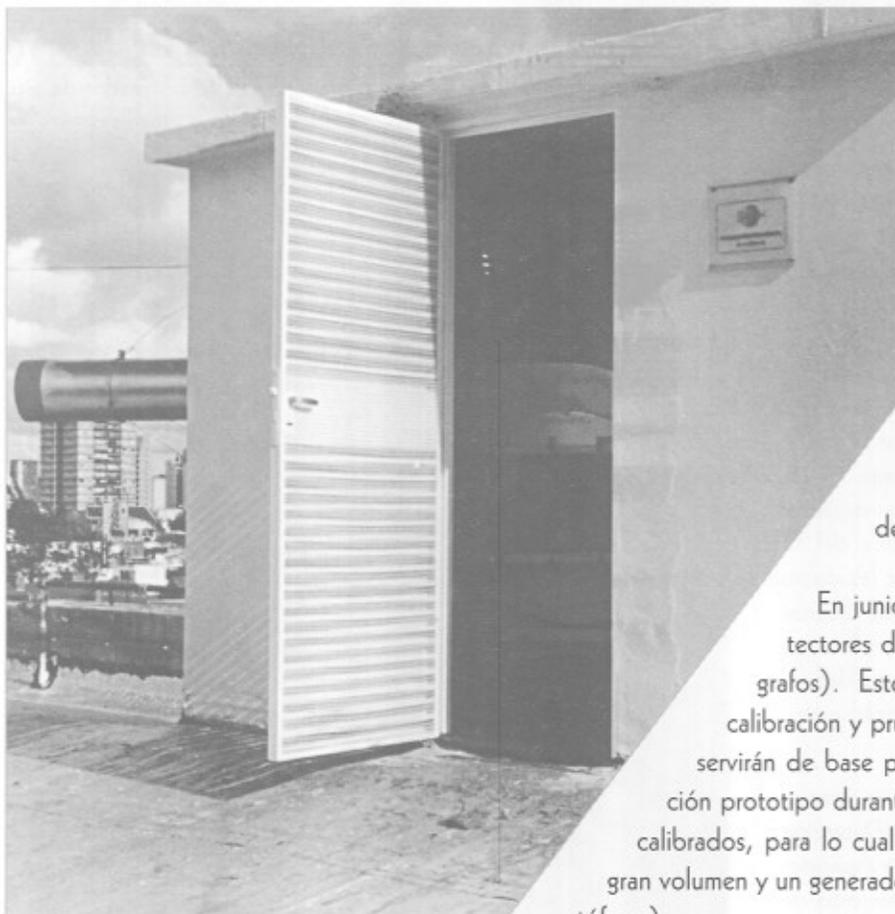
- ✓ Durante el año se continuó participando de la experiencia GARDS (Detección Global de Radionucleidos en la Atmósfera), coordinada por el Departamento de Energía de EE. UU. a través del Pacific Sierra Laboratory (Arlington, Virginia) que constituye un prototipo de la futura



red de radionucleidos del CTBT. Inicialmente, la participación de la ARN consistía en el envío de un espectro semanal. A partir de junio, esa frecuencia se incrementó a tres y, actualmente, se cubren los 7 días de la semana en 5 muestreos. Durante 1997, como consecuencia de la participación en esta experiencia, se tomaron, analizaron e informaron al Prototipo del Centro Internacional de Datos (PIDC) de Arlington, Virginia, un total de 164 muestras.

- ✓ Para la instalación de las estaciones de Salta y Bariloche, se firmó en setiembre, un acuerdo específico entre la ARN y la Policía Federal que permite la ubicación de las mencionadas estaciones en dependencias de esta última institución. Este convenio está suscrito en el marco del convenio global entre ambas instituciones y prevé que la ARN se hará cargo de la instalación y mantenimiento de las estaciones, mientras que personal de Policía Federal operará las mismas. Las estaciones se instalarán durante 1998 en el cuartel de bomberos del aeropuerto de Bariloche y en la delegación de Salta de la Policía Federal.
- ✓ Se construyó una estación transportable para monitoreo de aerosoles que cumple con los requerimientos del CTBT y con el objeto de cumplir los siguientes aspectos:
  - Utilizarse en las estaciones de Salta, Bariloche y de cualquier otro sitio cuando el CTBT lo solicite, dado que la ARN está registrada para realizarlas en cualquier lugar del mundo.
  - Usarse en las inspecciones on-site cuando se registren eventos que lo requieran.
  - Como prototipo para ofrecer a otros países que deben instalar estaciones de aerosoles en su territorio.

#### Estación monitora (Sede central de la ARN)



#### Infrasonido

Se inició el estudio de los aspectos físicos asociados a este fenómeno, es decir la caracterización, generación y propagación de las ondas de infrasonido provenientes de explosiones nucleares y de fenómenos de origen natural, así como, las características de los sensores y componentes de una estación de detección de infrasonido.

En junio de 1997, se recibieron 5 detectores de ondas infrasónicas (microbarógrafos). Estos sensores y los estudios de calibración y pruebas de la electrónica asociada, servirán de base para la construcción de una estación prototipo durante 1998. Los 5 sensores fueron calibrados, para lo cual se construyó un contenedor de gran volumen y un generador de señales de calibración (pistófono).

## ACTIVIDADES DE LOS LABORATORIOS DE MEDICIONES DE RADIACIÓN

Con el objeto de mejorar la capacidad operativa de los laboratorios de mediciones de radiación, se continuó con la modernización de los equipos de medición existentes, incorporando instrumental y patrones de calibración; se perfeccionaron las técnicas de medición y análisis; y se desarrollaron nuevos métodos, que fueron validados a través de la participación en intercalibraciones con laboratorios internacionalmente reconocidos.

Se dispone, en la actualidad, de las siguientes instalaciones:

### Contador de todo el cuerpo

Este laboratorio está destinado a la medición directa de la contaminación interna de emisores gamma, disponiendo de los siguientes sistemas:

- ✓ Un recinto blindado con camilla articulada, equipado con dos detectores de  $\text{INa(Tl)}$  que se utiliza para mediciones rutinarias y no rutinarias de emisores gamma de energía superior a 100 keV.
- ✓ Un recinto blindado de bajo fondo con camilla articulada, equipado con un detector de  $\text{INa(Tl)}$  y un detector de germanio hiperpuro (GeHp) de 100% de eficiencia, que es utilizado en mediciones especiales donde se requiere alta resolución, alta eficiencia o medición sobre un órgano particular.
- ✓ Un sistema transportable parcialmente blindado, apto para mediciones en distintas instalaciones o situaciones accidentales.
- ✓ Un sistema para la medición de yodo 131 en tiroides.

Unidad transportable para la medición directa de la contaminación interna

Durante 1997, las principales tareas realizadas en el contador de todo el cuerpo fueron:

- Calibración completa del detector de GeHp para medición de americio 241 en pulmón, hígado y nódulos linfáticos; medición de uranio 235 en pulmón y nódulos linfáticos y medición de emisores gamma superiores a 60 keV en pulmón y cuerpo entero.
- Calibración de la medición de yodo 131 en tiroides, e intercalibración con el sistema existente en la planta de producción de radioisótopos (CNEA-CAE).
- Calibración de todos los sistemas de medición basados en detectores de  $\text{INa(Tl)}$  para cuerpo entero, tórax y abdomen.



- Se realizaron 312 mediciones rutinarias y no rutinarias, incluyendo las determinaciones de yodo 125 y yodo 131 en tiroides, uranio 235 en pulmón y mediciones de cuerpo entero. Estas determinaciones fueron realizadas como servicio de medición al personal de la ARN, CNEA, ABACC, OIEA y de las empresas CONUAR S.A. y NASA.

### Laboratorio de medición por espectrometría gamma

Para llevar a cabo las mediciones por espectrometría gamma se cuenta con las siguientes instalaciones:

- ✓ Un laboratorio equipado con dos sistemas de medición con detectores de Germanio hiperpuro (GeHp), donde se analizan muestras recolectadas por los grupos operativos durante las inspecciones y muestras cuya actividad excede los niveles ambientales.
- ✓ Un laboratorio con cuatro sistemas de medición de bajo fondo, en el que se miden las muestras correspondientes al programa de monitoreo ambiental, las muestras del programa de intercalibración y otras, que por su nivel de actividad puedan ser medidas sin riesgo de contaminación de los detectores y blindajes, siendo también esta instalación el laboratorio secundario de la ARN para el CTBT.
- ✓ Un laboratorio con condiciones ambientales controladas, que cuenta con dos sistemas de bajo fondo y un detector de pozo de GeHp, para mediciones que requirieran de una alta eficiencia geométrica, contándose además con un detector planar para medición de radiación x y gamma de hasta 200 keV.

Las principales tareas realizadas en el laboratorio de medición por espectrometría gamma fueron:

- Puesta en marcha y calibración de dos analizadores multicanales portátiles computarizados para ser utilizados en las campañas de medición de tasa de emanación de radón, en mediciones de análisis no destructivo para salvaguardias, en mediciones durante auditorías regulatorias de sistemas de descarga al ambiente y en situaciones de incidente o accidente.
- Intercomparación y validación de la performance de tres softwares de análisis para espectrometría gamma. Además, se participó de una intercalibración organizada por el EML (EE. UU.), para la calificación del software usado en el análisis cuali-cuantitativo de mediciones ambientales, con resultados muy satisfactorios.
- Verificación trimestral de la calibración de cada uno de los sistemas, en las 12 geometrías de medición que se usan rutinariamente y control semanal de los fondos, como parte del programa de garantía de calidad.
- Durante el año, se realizaron 122 mediciones, en el marco de inspecciones y auditorías y 660 mediciones, relacionadas con estudios ambientales y como servicio a las diferentes actividades y proyectos de la ARN.
- Además, se participó en el programa de intercalibración organizado semestralmente por el EML/DOE (EE. UU.). Se realizaron mediciones sobre muestras de aguas, sedimentos, vegetales y filtros de aire contaminados con niveles ambientales de actividad, realizándose 320 determinaciones. Los resultados obtenidos mostraron una considerable mejora respecto del año anterior dado que, para la intercalibración del primer semestre todos los datos informados resultaron con errores inferiores al 40%, obteniéndose errores menores del 20% en el 75% de los datos presentados y, en la segunda intercalibración, el 95% de resultados informados, presentaron errores inferiores al 20%.

Sistema para la medición de muestras ambientales por espectrometría gamma



#### Laboratorio de medición por espectrometría alfa y medición de actividad alfa y beta total

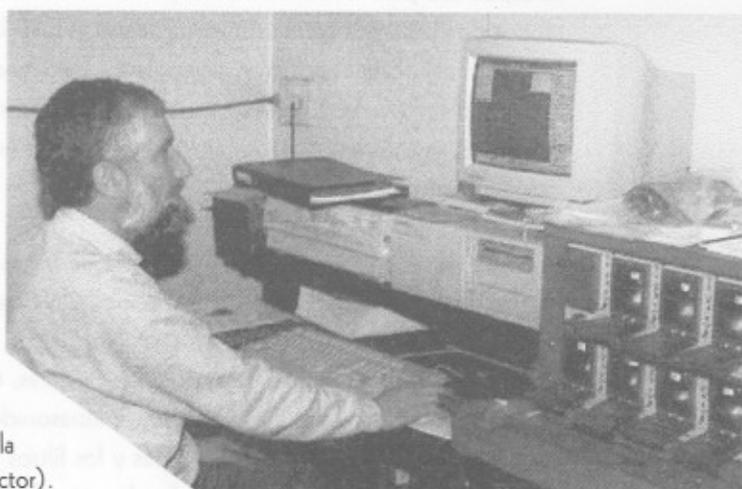
Para la realización de estas tareas, el sector cuenta con:

- ✓ Un laboratorio equipado con dos sistemas para medición por espectrometría alfa, con un total de 16 cámaras de vacío, para mediciones simultáneas; dos equipos de medición por centelleo líquido, contando uno de ellos con un sistema de discriminación alfa/beta, para reducción del fondo, en mediciones de muy baja actividad; un contador automático para mediciones de actividad alfa y beta total y un conjunto de cámaras para mediciones de actividad alfa total por centelleo sólido. Este equipamiento es utilizado para la medición de todas las muestras enviadas por los diferentes proyectos y actividades de la ARN.
- ✓ Un laboratorio con condiciones ambientales controladas, para mediciones de muestras de muy baja actividad, equipado con un sistema de muy bajo fondo para medición de actividad beta total; un contador manual de bajo fondo para mediciones de actividades alfa y beta total y un sistema de 16 cámaras de vacío, para realizar espectrometría alfa de muy bajo fondo.

Sistema para la medición de muestras ambientales por espectrometría alfa

Los principales tareas realizadas en estos laboratorios estuvieron relacionadas con:

- Puesta en marcha y calibración de los sistemas de medición por espectrometría alfa, optimizando la geometría de medición.
- Desarrollo de un código de cálculo que permite obtener la eficiencia geométrica para mediciones por espectrometría alfa, sin necesidad de recurrir al uso de patrones calibrados, basándose en las condiciones geométricas del sistema (diámetro de la fuente y del detector y distancia fuente-detector).



- Mantenimiento de una adecuada calidad en la operatividad de las mediciones por espectrometría alfa, realizándose controles mensuales con verificación de la posición de los picos, eficiencias y fondos.
- Optimización de la técnica de medición por centelleo líquido, basada en el método de trazador de eficiencia, que utiliza un estándar de carbono 14, y aplicable a la calibración y medición de soluciones conteniendo radionucleidos emisores beta. El método fue utilizado satisfactoriamente en mediciones de muestras conteniendo estroncio 90, prometio 147 y cloro 36.
- Desarrollo de una técnica para medición de actividad beta total utilizando detectores de ion implantado.
- En los laboratorios de medición por espectrometría alfa se realizaron 360 mediciones de muestras procesadas en los laboratorios de análisis radioquímicos y que fueron remitidas por los diferentes proyectos o actividades de la ARN.
- Además, como parte del programa de garantía de calidad, se participó del programa de intercalibración organizado por el DOE/EML (EE. UU.). El 95% de los datos presentados, en las intercalibraciones del primer y segundo semestre, estuvieron dentro de los límites de aceptabilidad establecidos por el EML.

### **DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE ACTIVIDADES NUCLEARES NO DECLARADAS**

Con el objeto de detectar actividades no declaradas de enriquecimiento de uranio o reprocesamiento de elementos combustibles, con fines de salvaguardia, se han implementado técnicas para la detección de radionucleidos contenidos en muestras ambientales tomadas en los alrededores de instalaciones nucleares.

#### **Técnica para la detección de partículas de uranio**

Con el propósito de contar con un sistema de gran sensibilidad, para la detección de partículas de uranio en filtros, se implementó y calibró un sistema de autorradiografía electrónica.

Se realizaron determinaciones de diferentes tipos de muestras para probar la sensibilidad del mismo y su capacidad para la localización de partículas de interés en filtros, tomándose muestras de aire en la fábrica de elementos combustibles nucleares (CONUAR S.A.), en un sector cercano a la prensa. Los filtros allí obtenidos fueron manipulados bajo flujo laminar y luego fueron irradiados en el reactor RA 1 (CNEA-CAC), para ser posteriormente escaneados por el sistema de autorradiografía. Paralelamente, se tomaron muestras en diferentes zonas limpias de partículas de uranio, que sirvieron de muestra blanco.

Las determinaciones mostraron la presencia de zonas claramente diferenciadas dentro de los filtros, demostrando la utilidad del sistema desarrollado para la localización de partículas de uranio.

Con el propósito de evaluar otros tipos de muestras, también se recolectaron agujas de casuarina optimizando la masa a utilizar y el tiempo de ultrasonido a que debe someterse este tipo de muestra. Las soluciones obtenidas fueron filtradas y los filtros procesados en las mismas condiciones que los filtros de aire durante el proceso de localización de partículas de uranio. En paralelo, se procesaron

muestras blanco, alcanzándose un límite de detección del orden del ng de uranio, para 10 días de medición por espectrometría alfa. Este valor es equivalente al alcanzable con equipo de espectrometría de masas por ionización térmica, utilizado en las determinaciones preliminares.

#### Identificación de partículas en un filtro por el sistema de autorradiografía electrónica

Además, como tareas preliminares y de apoyo a la puesta en marcha del espectrómetro de masas con acelerador, se prepararon una serie de muestras, de patrones de calibración y de muestras blanco de reactivos, que fueron analizadas en el espectrómetro de masas con acelerador de la Universidad de Munich (Alemania).

Tanto las muestras tomadas en la Planta de enriquecimiento de uranio (CNEA-Pilcaniyeu), como los patrones de calibración conteniendo uranio natural y enriquecido y plutonio 242 con masas del orden de los picogramos, fueron preparados utilizando hierro como soporte, en relaciones variables. Las muestras fueron adecuadamente preparadas y acondicionadas para ser cargadas en el portamuestra utilizado en el equipo de espectrometría de masas con acelerador.

También, se realizaron ensayos en el acelerador de partículas TANDAR (CNEA-CAC) para ser utilizado como espectrómetro de masas, para lo cual se prepararon una serie de muestras para calibrar el sistema.



#### Técnica para la determinación de yodo 129

El yodo 129 que se halla en la atmósfera tiene dos orígenes: natural, debido a la reacción del xenón con la radiación cósmica en las altas capas de la atmósfera y artificial, producido por la fisión espontánea del uranio natural. Durante la operación normal de una planta nuclear se libera al medio ambiente yodo 129 y en mayor magnitud durante el reprocesamiento químico de los elementos combustibles irradiados, al ser cortados para la recuperación del uranio no quemado y el plutonio generado. La medición de yodo 129 en el ambiente, en áreas circundantes a instalaciones nucleares, permitiría detectar actividades no declaradas de reprocesamiento.

Con el propósito de alcanzar un grado de sensibilidad adecuado para la detección de yodo 129 en matrices ambientales, y teniendo en cuenta su baja actividad específica (6 Bq/mg) y además, la baja energía de emisión de fotones del yodo 129 ( $E = 29,78 \text{ keV}$ ), es necesaria la utilización de técnicas de activación neutrónica.

El desarrollo de la técnica para el análisis de muestras ambientales, se llevó a cabo en un laboratorio que cuenta con aire limpio y sobrepresión. Se estandarizaron las siguientes etapas:

**Toma de muestra.** Las agujas de pino verdes, constituyen la matriz ambiental más conveniente para esta determinación, debido a sus características resinosas que retienen los aerosoles del yodo (yodo libre y compuestos de yodo orgánico e inorgánico).

**Tratamiento preliminar y mineralización.** Se estandarizó esta etapa obteniéndose un producto alcalino libre de materia orgánica y cenizas de carbón.

**Destilación.** El producto de la mineralización es destilado, habiéndose ensayado diferentes variables tales como: diversos tipos de carbón activado (para retener por adsorción el yodo destilado), diferentes temperaturas de refrigeración y de calefacción (para evitar que el yodo quede atrapado en el equipo de destilación), flujos del aire (para asegurar un tiempo de residencia del yodo en el carbón activado mayor de 0,25 segundos) y también, se ensayaron tiempos totales de destilación, que resultaron óptimos entre dos y tres horas.

**Irradiación neutrónica.** Se irradió el yodo retenido en el carbón activado, en el reactor RA 3 (CNEA-CAE). Se optimizó el tiempo de irradiación (2-6 horas) y de decaimiento post-irradiación (36-48 horas).

**Proceso post-irradiación.** El yodo 130, formado por irradiación del yodo 129, es separado del resto de los productos de activación del carbón mediante una segunda destilación. Dada la alta tasa de exposición, se debió procesar las muestras en un laboratorio equipado con campanas y blindajes que aseguraran condiciones de trabajo seguras.

**Medición por espectrometría gamma.** Se utilizó un detector de germanio hiperpuro (GeHp), diferenciándose los picos de yodo 130 de los picos de los interferentes (yodo 126 y bromo 82). El límite de detección para yodo 129 varió, en las distintas muestras, entre 1 y 3 mBq, dependiendo fundamentalmente de la cantidad de interferentes y del tiempo de medición (2 a 6 horas).



Los rendimientos globales obtenidos oscilaron entre 70 y 80%, alcanzándose rendimientos cercanos al 95% para las etapas de destilación. Se realizaron mediciones con agujas de pino recolectadas en los alrededores de la CNA I, detectándose una actividad de yodo 129 de 15 mBq/g.

Medición de una muestra para la detección de yodo 129 en un detector de GeHp

### Técnica para la determinación de plutonio en suelo por espectrometría alfa

La determinación de plutonio en suelo se relaciona con el seguimiento de la contaminación debida al fallout proveniente de los test nucleares, realizados en la atmósfera y con la detección de actividades no declaradas de reprocesamiento de elementos combustibles. La implementación de la técnica para la determinación de plutonio 238, plutonio 239 y plutonio 240 en suelo por espectrometría alfa, requiere optimización de las diferentes etapas, para obtener altos rendimientos y el ajuste a tiempos mínimos de procesamiento.

Se estandarizaron las etapas de secado y mineralización de la muestra, la posterior disolución con ácidos (fluorhídrico, nítrico y clorhídrico), para asegurar una extracción total de los radionucleidos de interés y también se estandarizaron las etapas de separación y filtración, para obtener el plutonio en la fracción soluble, libre de la matriz suelo.

Luego, se optimizó el ajuste de la concentración ácida del medio y la reducción del hierro y del plutonio, asegurando un buen intercambio con el trazador (plutonio 242) y el ajuste de valencia del plutonio, para proceder a la separación del plutonio del resto de los actínidos, a través de columnas de resina de intercambio iónico, por sucesivos lavados y elución final. El valor promedio de los rendimientos obtenidos por esta técnica se estima en 84%. La muestra está en condiciones de ser electrodepositada o co-precipitada para su medición por espectrometría alfa.

## DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA LA MEDICIÓN DE RADÓN

### Determinación de radón en aire

El gas radón y los radionucleidos resultantes de su desintegración, contribuyen con la mitad de la dosis efectiva recibida por el hombre debido a fuentes naturales de radiación.

#### Cámara de referencia para la calibración de detectores de radón en aire

Con el objeto de realizar las mediciones rutinarias de la concentración de radón en viviendas y en los Complejos minero fabriles, se han llevado a cabo calibraciones y actualizaciones periódicas de los diferentes sistemas de medición.

Para la calibración, el laboratorio cuenta con una cámara de referencia de 1 m<sup>3</sup> de volumen con cierres herméticos, que consta de una antecámara a través de la cual se introducen los dispositivos a calibrar. Como fuente de radón, la cámara de referencia contiene mineral de ura-



nio extraído del Complejo minero fabril Malargüe, provincia de Mendoza. La cámara consta de equipamiento para control de temperatura y presión, y para variaciones de humedad (10% a 95%), concentración de radón (desde  $450 \text{ Bq/m}^3$  hasta  $3500 \text{ Bq/m}^3$ ), progenie y aerosoles, para la realización de pruebas en diferentes condiciones ambientales. La concentración de radón de la cámara fue calibrada por el método de Lucas.

Para la determinación de la concentración de radón en aire, se trabajó con el método de trazas nucleares utilizando policarbonato como detector, sistema pasivo que integra la concentración de radón en un período de tres meses. El otro método utilizado es el electret, que se basa en la descarga electrostática de un condensador y es un método usado tanto para mediciones cortas, como para mediciones integradas en el tiempo. Además, se efectuó la calibración de los detectores LR115-tipo II, destinados a la medición de gas radón en fallas geológicas, con el fin de utilizar estos datos en la predicción de sismos. Todos los métodos de medición de radón en aire fueron calibrados en la cámara de referencia.

Se desarrolló un método pasivo para la determinación de concentración de radón, mediante la adsorción en carbón activado y su posterior medición por centelleo líquido. Se probó la respuesta del detector frente a los efectos de la humedad ambiente y del tiempo de exposición. Optimizando las diferentes combinaciones de los sistemas desecantes y la presencia de barreras difusoras, se logró que el detector fuera independiente de la humedad ambiente, factor limitante en otros sistemas de medición. El método desarrollado fue comparado, en paralelo, frente a un método ya estandarizado para concentraciones de radón que oscilaron entre  $6 \text{ Bq/m}^3$  (valores ambientales) y  $15\,000 \text{ Bq/m}^3$  (cámara de experimentación). El método desarrollado fue adoptado como método rutinario para la medición de la concentración de radón en viviendas de Buenos Aires.

El laboratorio cuenta, además, con un recinto de experimentación, que posee las dimensiones de una habitación estándar, con posibilidad de variación en la tasa de renovación de aire y variación en la concentración de radón y de sus descendientes. En el mismo, se realizaron pruebas para la cuantificación de la fracción de descendientes del radón de período corto, adheridos y no adheridos a aerosoles, con respecto a distintas tasas de ventilación y diferentes concentraciones de aerosoles. De las experiencias realizadas se ratifica que, la ventilación es un mecanismo muy eficaz en la disminución de la concentración de gas radón y de sus descendientes de período corto, y por lo tanto en la disminución de la dosis.

### **Radón en agua**

La determinación de la concentración de radón en agua resulta de importancia para conocer, junto con las determinaciones de radio 226 y uranio natural, los niveles de concentración de radionucleidos naturales en aguas de consumo.

Se desarrolló un método de medición de la concentración de radón en agua por medición por centelleo líquido, que resulta rápido y automatizado para el procesamiento de múltiples muestras en poco tiempo y así evitar el decaimiento del radón, cuyo período es de 3,84 días.

Se optimizaron los diferentes parámetros de la técnica para lograr máxima eficiencia y menor fondo de contaje. Una de las variables ensayadas fue el volumen de solución centelladora, utilizando como base el tolueno, solvente en el que el radón es altamente soluble. También, se compararon distintos

tipos de mediciones, estándar, por sistema de contaje de bajo fondo y medición utilizando el sistema de discriminación por forma de pulso, para distinguir pulsos provenientes de emisores beta y alfa. Ajustando convenientemente el nivel de discriminación y la ventana de medición, se puede seleccionar la medición sólo de partículas alfa, disminuyendo notablemente el fondo.

Teniendo en cuenta los factores optimizados de recolección, traslado, procesamiento y medición de las muestras, el límite de detección fue estimado en  $90 \text{ Bq/m}^3$ , para 500 minutos de medición. A pesar de que los niveles de concentración de radón en aguas varían ampliamente, según se consideren aguas superficiales o de pozo, pero considerándose valores aceptables para agua potable hasta  $11\,000 \text{ Bq/m}^3$ , el método desarrollado cumple con la sensibilidad requerida para la determinación de radón en agua.

También, se implementó un método para la determinación de radón en agua a través de la técnica del electret. El límite de detección fue estimado en  $100 \text{ Bq/m}^3$ , requiriendo mediciones de 2 a 5 días.

### ESTUDIOS SOBRE FACTORES DE BIO-CONCENTRACIÓN

El objetivo del estudio es la determinación de factores de bio-concentración y de transferencia, a ser utilizados en modelos de estimación de dosis en el público, debidas a las descargas autorizadas de material radiactivo durante la operación de instalaciones nucleares.

De acuerdo a un estudio realizado sobre las descargas de reactores, se llegó a la conclusión que el mayor impacto radiológico sobre el hombre y la biota acuática, proviene de los siguientes radionucleidos: cesio, estroncio, yodo, manganeso y cobalto. Las determinaciones de los factores de bio-concentración para el ambiente acuático son de importancia ya que las centrales nucleares argentinas están localizadas junto a cuerpos de agua dulce y los radionucleidos que se concentran en los peces representan una vía directa de exposición de la población, cuando los pescados son consumidos.

Al estimar dosis, es importante contar con los factores de bio-concentración más apropiados para cada lugar, considerando las variaciones ambientales y sobre todo las diferentes especies de peces características del lugar.



Peceras para estudios de bio-concentración de radionucleidos

Con el propósito de estudiar los factores de bio-concentración para organismos acuáticos locales, se montó un laboratorio que cuenta con seis peceras de 350 litros cada una, con toda la infraestructura necesaria para su mantenimiento. Además, en un predio fuera del laboratorio, se instaló una pileta de diez mil litros de capacidad, con filtros y bombas de circulación. Esta pileta se utiliza para la recepción y adaptación de ejemplares jóvenes, previo paso a su ubicación en las peceras de estudio.

Durante 1997, se optimizó la adaptación de un grupo de carpas, con el cual se experimentó las técnicas de manipulación de peces, para minimizar la contaminación del laboratorio durante la extracción de los ejemplares del acuario, su traspaso a un recipiente intermedio y luego al sistema en el cual serán medidos (detector de GeHp).

Además, teniendo en cuenta la fauna ictícola representativa del embalse del Río III, se trabajó con un grupo de pejerreyes que se obtuvieron como alevinos recién eclosionados, a fines 1996. En el desarrollo de estos ejemplares se observó un crecimiento desparejo y mortandad. Estas observaciones concuerdan con la dificultad de mantenimiento de esta especie en cautiverio. Se continúa trabajando en la adaptación de los peces, para ello, se obtuvo otro grupo de alevinos de pejerrey de la Estación Hidrobiológica de Chascomús, y sobre ellos se realizan ensayos para su mantenimiento durante un tiempo prolongado, momento a partir del cual alcanzan un tamaño adecuado para ser utilizados en los estudios de bio-concentración.

## **EMPLEO DE CÓDIGOS TERMOHIDRÁULICOS PARA EVALUACIONES DE LA SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEARES**

La ARN utiliza para el estudio de la seguridad nuclear de centrales nucleares la serie de programas de predicción RELAP5/MOD3.x. Al mismo tiempo, participa de las actividades de evaluación y mantenimiento de dichos códigos a través del convenios específicos con la Nuclear Regulatory Commission (NRC) de los EE. UU. Los países reciben los códigos en sus últimas versiones, comparten la experiencia del grupo de trabajo e integran recursos monetarios y sus propios resultados. La ARN ha participado activamente en las reuniones del Programa de mantenimiento y validación de códigos termohidráulicos, mostrando la experiencia ganada en la aplicación de los mismos en situaciones de interés para las plantas nucleares de potencia y estudios relacionados.

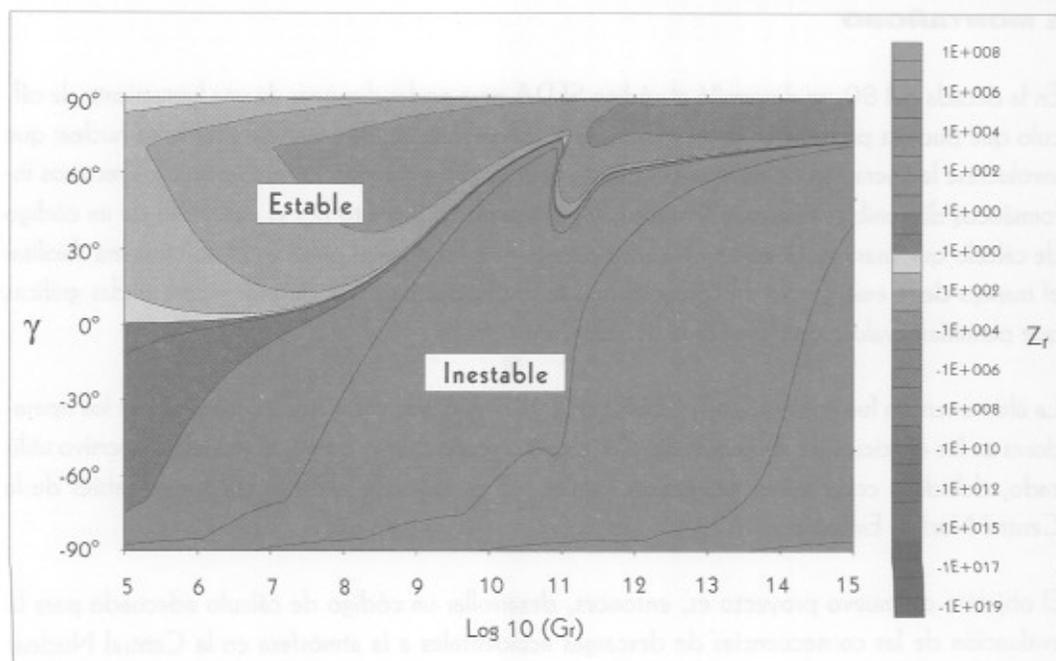
Es importante señalar porqué es necesario contar con programas de cómputo de este tipo. Una lista no, excluyente, es la siguiente:

- ✓ La ARN licencia la construcción y operación de plantas nucleares de potencia y otras instalaciones relevantes, al tiempo que inspecciona y regula su operación de acuerdo a sus propias normas.
- ✓ De lo anterior surge que, es importante que cuente con herramientas que permitan la auditoría de los cálculos que las entidades responsables efectúan como aval de su aseveración de que las plantas nucleares de potencia son operables atendiendo las mencionadas normas.
- ✓ El personal técnico de la ARN cuenta con una posibilidad de apoyar su criterio ingenieril, sobre la base de los últimos desarrollos realizados a nivel internacional y reflejados en las versiones más actualizadas de los códigos de análisis termohidráulico.

Durante 1997, se ha continuado con el desarrollo de códigos que permitieron la obtención de resultados de interés. Entre ellos es destacable mencionar:

- ✓ La mejora de la nodalización de la CNA I, constituida por datos consistentes termodinámica y geométrica. Ello ha consistido en una tarea continuada de relevamiento de información y en su elaboración para su incorporación como datos de entrada. Una idea de los datos que es necesario incorporar para una nodalización de mínimo grado de detalle, es que la actualmente consolidada tiene unas 4500 líneas de datos geométricos y termodinámicos.
- ✓ Los datos emergentes de transitorios operacionales o incidentes de las plantas nucleares de potencia no son, en general, conjuntos de datos completos. Un resultado de los estudios realizados sobre el efecto de la nodalización en circuitos simples operando en régimen de circulación natural, ha permitido analizar en forma novedosa los márgenes de estabilidad de instalaciones simples. Todos los códigos termohidráulicos incorporan leyes experimentales, la forma en que éstas son incorporadas tiene importancia en casos de situaciones cercanas a los límites de la estabilidad del sistema. La consideración de variables dependientes basadas en el número de Reynolds, parámetro que gobierna la resistencia por fricción en los circuitos termohidráulicos, ha mostrado efectos relevantes sobre dichos límites de estabilidad, tal como muestra la **Figura 1**. En dicha figura, se representa  $Z_r$ , que mide el grado de amortiguación de perturbaciones y que es utilizado para definir las condiciones para la estabilidad neutral ( $Z_r = 0$ ), en función de  $g$  y  $G_r$ . El parámetro  $g$  mide el ángulo de inclinación de la fuente de calor en el circuito termohidráulico y  $G_r$  es el número de Grashoff. También se observa la influencia de la ley de fricción en el pico que aparece en la curva de estabilidad neutral.
- ✓ Se efectuó un análisis de la evolución temporal de la circulación natural en la CNA I, luego de un incidente de pérdida de las bombas principales. Este incidente se originó en la pérdida de potencia externa de alimentación. Ello llevó a un transitorio fuerte de parada, sin despresurización importante, desde el flujo nominal de circulación forzada a otro de circulación natural. Los resultados del análisis se obtuvieron partiendo de una nodalización con el programa RELAP5-3.2. Como paso previo al estudio del transitorio en cuestión, se ha trabajado en la obtención del estado estacionario de la planta para parámetros de diseño en condiciones de operación al 100% de potencia, con el objeto de poder representar, con las modificaciones apropiadas, el estado real de la planta. Se ha verificado la nodalización obtenida y se han comparado los valores de los principales parámetros termohidráulicos con los registros de planta, para el mismo incidente.

**Figura 1**  
**Mapa de estabilidad para un**  
**circuito termohidráulico de forma toroidal**



## **DESARROLLO DE MODELOS COMPUTACIONALES PARA EVALUACIONES DE LA SEGURIDAD DE CENTRALES NUCLEARES**

Un aspecto que es de interés señalar lo constituyen los resultados obtenidos a partir del desarrollo de métodos y programas para aspectos particulares de las evaluaciones de la seguridad de centrales nucleares. En efecto, es necesario contar con metodologías de predicción cuyas ventajas y limitaciones sean conocidas con precisión para su empleo en la evaluación de situaciones anormales.

En ese sentido se continuaron los desarrollos de técnicas de cálculo en dos líneas de interés, a saber:

### **Desarrollo de un simulador de planta para la CNA I**

Se ha continuado con el desarrollo de un simulador de planta con capacidad de modelar flujos en dos fases, reversión de flujos, estratificación, condensación, evaporación, golpes de presión y circulación natural. Ello se ha efectuado en base a modelos simples en su concepción y formulación, que requieran pocos datos geométricos y un mínimo de parámetros termodinámicos o de procesos. Se mantiene el objetivo de conocer el estado real de la instalación en un momento dado y, conocido éste, cuantificar las situaciones de riesgo frente a transitorios originados en la operación de la misma, tanto en condiciones normales como accidentales.

Se cuenta actualmente con los siguientes sub-modelos de simulación: generador de vapor, línea de vapor, turbina de vapor, condensador, bomba, precalentador por condensación, intercambiador de calor, tanque de alimentación de agua y válvulas. Esto completa el modelado del sistema agua-vapor de la CNA I.

### **DESARROLLO DE MODELOS DE DISPERSIÓN PARA GEOGRAFÍA CON RELIEVE MONTAÑOSO**

En la década del 80, se desarrolló el código SEDA para poder disponer de una herramienta de cálculo que pudiera predecir en forma rápida las consecuencias de un potencial accidente nuclear que involucrase la liberación de materiales radiactivos al medio ambiente. En esa época, los recursos informáticos disponibles eran muy limitados, y por esa razón, se optó por el desarrollo de un código de cálculo que usara modelos simplificados para evaluar las dosis al público. El objetivo era facilitar el manejo de la emergencia. El código diseñado era interactivo, fácil de usar y con salidas gráficas que permitían evaluar rápidamente la situación.

La última versión fue entregada a la CNA I en 1988 y, desde entonces, es utilizada por los operadores en los ejercicios de aplicación del plan de emergencia. Sin embargo, el modelo dispersivo utilizado, debido a condiciones geográficas locales, no es aplicable a distancias considerables de la Central Nuclear Embalse.

El objetivo del nuevo proyecto es, entonces, desarrollar un código de cálculo adecuado para la evaluación de las consecuencias de descargas accidentales a la atmósfera en la Central Nuclear Embalse.

Este objetivo implica las siguientes etapas:

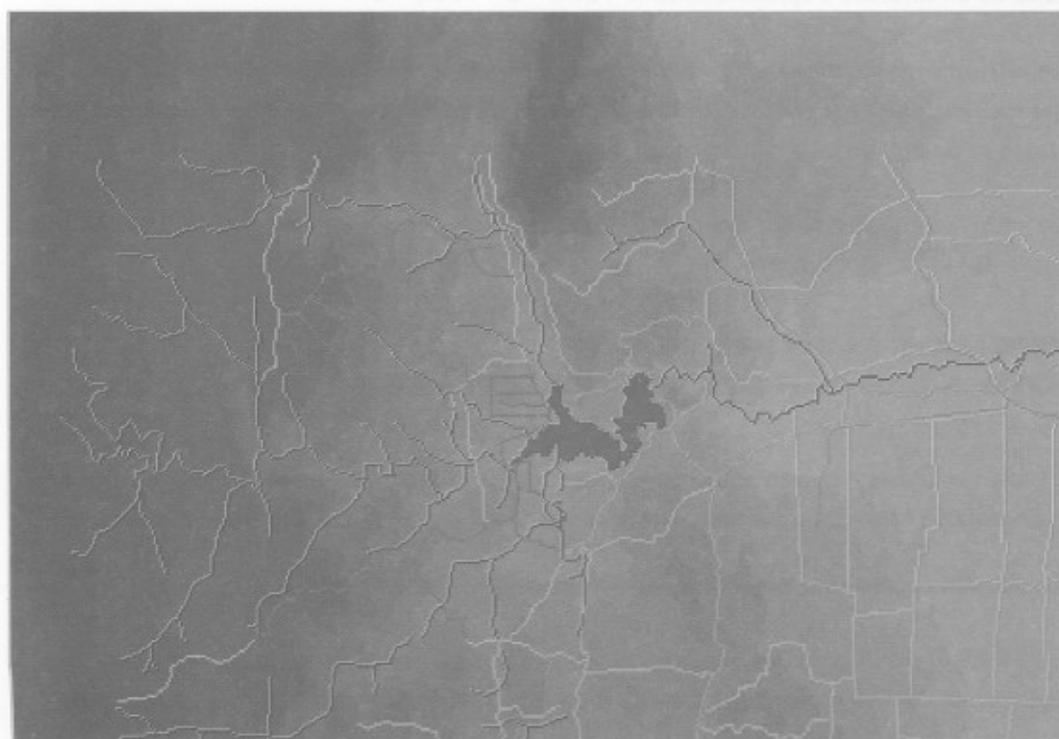
- La definición de la estructura modular del código.
- La gestión de la información asociada con la topografía, el inventario radiactivo, los factores dosimétricos, los datos poblacionales y los datos físicos y químicos de los radionucleidos.
- El desarrollo de los algoritmos para los módulos de cálculo, como ser: el modelo tri-dimensional del campo de vientos, el modelo dispersivo y el modelo dosimétrico.

Todo esto debe ser complementado con verificaciones y una validación en base a datos de campo.

Durante 1997, se ha generado la digitalización de la topografía de la zona de interés. Dicha información fue decodificada y adecuada para su utilización a través de la transformación de los datos provistos en coordenadas Gauss-Kruger, en un sistema coordinado regular con centro en la CNE, en un rango de 200 km hacia cada lado de la misma. Por otra parte, se han desarrollado herramientas para la superposición de datos cartográficos sobre la topografía obtenida. También, se generó una forma novedosa de obtención de curvas de isodosis, que no necesita de redes estructurada. Con modelos matemáticos basados en la aproximación por elementos de borde para el cálculo de la circulación de aire se han obtenido resultados preliminares en tres dimensiones.

La **Figura 2** muestra un ejemplo del procesamiento de la información topográfica y cartográfica en colores, donde los diferentes tonos representan la variación de altura, para una zona de 100 km x 100 km, centrada en la CNE situada sobre el Embalse del Río Tercero.

**Figura 2**  
Mapa de relieves en las cercanías de la CNE, situada en la costa del lago del Embalse del Río Tercero. Se muestran algunos caminos y ríos.



### **GENERACIÓN DE HIDRÓGENO EN ACCIDENTES SEVEROS, MODELOS DE OXIDACIÓN Y DEGRADACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES Y OTROS COMPONENTES DEL NÚCLEO**

La ARN cuenta con códigos para evaluar la seguridad nuclear de reactores de potencia. Como ellos han sido desarrollados para reactores tipo PWR es necesario adecuarlos a las centrales nucleares argentinas, en particular, a Atucha I y II. Con este objetivo se han generado planes de estudio y de evaluación del comportamiento de materiales del núcleo del reactor que se utilizan, esencialmente, en dichas centrales. Las tareas efectuadas, al respecto, se detallan a continuación:

Como consecuencia de la asistencia al Second International QUENCH Workshop que tuvo lugar en Karlsruhe, Alemania, en octubre de 1996, se tuvo acceso a los datos experimentales recientes sobre la generación de hidrógeno durante un accidente severo, en el cual el núcleo queda descubierta y para enfriarlo se introduce agua en el mismo. A partir de estos datos, se realizaron ajustes de los parámetros del modelo de generación de hidrógeno. Se realizaron los primeros contactos con el responsable del programa de seguridad en el Forschung Zentrum Karlsruhe (FZK) y el coordinador de la experiencia, con el objeto de participar de las mismas. Se espera la respuesta del FZK y de las autoridades de la Comunidad Europea dado que esta última institución financia el proyecto.

Se realizó el estudio de los diferentes materiales que componen el núcleo de la CNA I, y se lo comparó con los estudios realizados sobre las interacciones de los materiales de los núcleos para los reactores PLWR en condiciones de accidentes severos. Se encontró una interacción, hasta el momento no estudiada, entre los materiales que forman las barras de control de la CNA I. Esta interacción deriva en la formación de una fase líquida debido al contacto entre el acero inoxidable (soporte) y el hafnio. Como consecuencia de dicho estudio, se diseñó una experiencia que se realizará a partir de 1998, para determinar la cinética de formación de la fase líquida debido a la existencia en dicho sistema de un eutéctico a aproximadamente 1250 °C - 1300 °C.

Se establecieron los primeros contactos con el Institute de Protection et Surete Nucleaire (París-Francia) con objeto de obtener el código ICARE2, de aplicación en caso de accidentes severos de reactores de potencia.

Se inició la redacción de una monografía sobre Accidentes Severos, basada en informes provenientes de la Comunidad Europea.

### **DESARROLLOS ELECTRÓNICOS EN APOYO A LAS TAREAS REGULATORIAS**

El objetivo de este proyecto es brindar el apoyo técnico necesario a distintas actividades regulatorias en materia de hardware y software. Con dicha finalidad se realizaron las siguientes actividades:

#### **Desarrollo del sistema argentino de vigilancia y monitoreo remoto**

En 1995, la ARN inició estudios para la construcción del sistema argentino de vigilancia y monitoreo remoto. El mismo permite el sensado de variables analógicas y digitales, su almacenamiento y posterior transmisión mediante líneas telefónicas convencionales.

El objetivo de este sistema es reducir el esfuerzo de inspección con fines de salvaguardias y los costos involucrados en las mismas, reemplazando parte de las inspecciones por elementos de vigilancia electrónica.

Este sistema, que se utiliza para el control de materiales nucleares, realiza la transmisión de datos mediante líneas telefónicas existentes y posee algoritmos matemáticos que garantizan la autenticidad de los datos, asegurando la transferencia de los mismos, aún en presencia de ruido electrónico elevado. La información primaria se envía mediante ondas de radio, evitando así el cableado excesivo, disminuyendo la complejidad y el tiempo de instalación. Con referencia a las variables físicas a medir, éstas cubren un amplio espectro, desde la simple posición de un contacto o la integridad de una fibra óptica, hasta imágenes digitalizadas o escenas completas de una operación del lugar bajo control. Como contraparte de todo el sistema de adquisición, se implementó una estación de interrogación remota que permite la transferencia de información, su almacenamiento e incorporación a una base de datos para el análisis posterior y su visualización mediante una computadora personal. Con fines de prueba y evaluación se ha instalado un prototipo reducido del sistema en un depósito de material fisionable, bajo salvaguardia, que la CNEA posee en el Centro Atómico Constituyentes. Este sistema puede ser interrogado periódicamente desde cualquier computadora vía módem conociendo las claves de acceso.

El sistema fue perfeccionado durante el año 1997, agregándosele al autenticado, el encriptado de los datos provenientes del sensor remoto hacia la unidad de recepción y el autenticado y encriptado de los mensajes propios de la unidad de recepción hacia las computadoras del sistema. Asimismo, se sumó a las variables sensadas la tasa de dosis, vía el desarrollo de una microcámara de ionización de características especiales. Se realizó también el estudio de la factibilidad de la instalación del sistema en una planta de producción de polvo de uranio que la CNEA posee en la ciudad de Córdoba. Este proyecto se encuentra muy avanzado y se espera instalar el sistema durante 1998.

Prototipos de este sistema han sido presentados ante las autoridades del DOE y ABACC como también, ante las autoridades egipcias relacionadas con el proyecto MPR llevado a cabo por la empresa INVAP S.E.

#### **Desarrollo del sistema de medición de infrasonido para el CTBT**

La ARN ha decidido la construcción de un sistema de sensado de infrasonido dentro del programa del CTBT y ha seleccionado y obtenido los sensores asociados al sistema. El mismo permitirá la medición y análisis de señales de infrasonido en la atmósfera provenientes de explosiones nucleares. Las características especiales de este dispositivo permitirán el desarrollo de tecnologías complejas en hardware y en software.

En 1997, se recibieron y calibraron cinco detectores de infrasonido (microbarógrafos) adquiridos a la empresa Chaparral Technology de Albuquerque, New Mexico, EE. UU.

#### **Factibilidad del desarrollo del sistema de medición de pulsos electromagnéticos para detección de explosiones nucleares**

La ARN inició el estudio de un sistema de medición de pulsos electromagnéticos para detección de explosiones nucleares. Este desarrollo tiene especial importancia por su precisión y confiabilidad. Los campos electromagnéticos generados por explosiones nucleares son del orden de las decenas de

kilovolts por metro y los pulsos esperados tienen un tiempo de crecimiento de los nanosegundos. Se estableció un posible diagrama de bloques y se evaluó la implementación de un sistema terrestre de detección. Se analizó la prefactibilidad de la implementación de un futuro sistema satelital de medición de forma de coordinar esfuerzos entre ARN-INVAP S.E.-CONAE para lograr los objetivos de la misión operativa.

### **Desarrollo de una cámara inteligente para captura de imágenes**

Con el objetivo de desarrollar una cámara inteligente para captura de imágenes, se llevó a cabo durante la primera parte del año 1997 el diseño de un sistema de adquisición de imágenes para ser integrado a una red de adquisición de datos. El sistema consta de: cámara de video analógica, placa de digitalización de video en tiempo real, placa Ethernet para conexión a la red de adquisición, placa para la unidad central de proceso, placa controladora de disco rígido SCSI y una placa de conversión de tensión continua-continua.

### **Desarrollo e instalación del sistema de seguimiento de combustibles en la CNE**

Con el propósito de reducir el esfuerzo de inspección asociado a salvaguardias, se ha desarrollado en conjunto con el DOE, un sistema que permite realizar el seguimiento de combustibles gastados desde la zona de pileta de decaimiento a los silos del sistema ASECO. Durante este año, se determinó la cantidad y tipo de sensores a instalar y su área de cobertura, se realizó la ingeniería de montaje del sistema y se identificó la cantidad de materiales asociados al montaje del mismo en la CNE. En virtud del acuerdo con el DOE y la incorporación del OIEA a este proyecto, se han introducido modificaciones y mejoras al mismo. Actualmente, el proyecto desarrollado posee un dispositivo de vigilancia por medio de mediciones de tasa de dosis, complementado con un sistema de vigilancia basado en imágenes que incorporará el OIEA, digitalizando el sistema instalado actualmente. Todo el conjunto de datos se concentra en un solo computador-servidor ubicado en la CNE. De acuerdo al cronograma actual, la instalación de este sistema se realizará en marzo del 1998.

## **CENTRO DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACELERADORES**

### **PROYECTO CEMA**

Los trabajos desarrollados durante 1996, para la puesta a punto de técnicas de identificación y análisis, con fines de salvaguardias, de micro-partículas ambientales de uranio, pusieron de manifiesto la necesidad de disponer de una facilidad espectrométrica ultra sensible.

Los aceleradores electrostáticos en tándem, utilizados en física nuclear para investigar el núcleo atómico, se han convertido desde hace unos quince años en instrumentos óptimos para realizar espectrometría de masas. Esta nueva técnica es conocida como Accelerating Mass Spectrometry (AMS) y posee una sensibilidad varios órdenes superior a la convencional. La separación, conteo e identificación de los iones se efectúa, básicamente, a partir los siguientes conceptos:

- ✓ Los analizadores magnéticos típicos de estas facilidades, permiten hacer una primera selección de los iones que interesa detectar. Dado que el sistema cuenta con una óptica iónica muy flexible y componentes

adicionales para eliminar los fondos residuales, no es necesario cerrar los diafragmas; esto permite alcanzar una transmisión próxima al 100%.

- ✓ El sistema intercambiador de cargas, ubicado en el terminal de alta tensión, que en su uso habitual posibilita la segunda etapa de aceleración, en AMS permite disociar los iones moleculares y así, romper generaciones en general no resolubles en la espectrometría convencional.
- ✓ Las altas energías alcanzadas por los iones, hacen posible detectarlos mediante el uso de instrumentación nuclear; ello permite además de contarlos, identificarlos individualmente, resolviendo así ambigüedades tampoco resolubles en la espectrometría clásica.

### El Acelerador de McMaster

En febrero de 1997, se estableció contacto con el Departamento de Física de la Universidad de McMaster, Ontario, Canadá. En sus laboratorios se ha cerrado recientemente un acelerador tándem electrostático FN HVEC con características especialmente adecuadas para AMS. A partir de un convenio, de acuerdo al cual la Universidad de McMaster tendrá acceso al uso de esa facilidad, se obtuvo la donación de la misma. La siguiente fotografía muestra el tanque del acelerador y parte de la línea de alta energía de la facilidad instalada en McMaster previamente al inicio de su desarme.

Su traslado se iniciará en febrero de 1998. Al presente ya se ha efectuado, conjuntamente con personal de la ARN y de aquella Universidad, el desmontaje total del acelerador y de sus líneas de baja y alta energía.

Vista parcial de la instalación en la Universidad de McMaster

### Reinstalación en Ezeiza

Paralelamente, en el predio del Centro Atómico Ezeiza, se está adecuando una construcción ya existente, como futuro recinto del acelerador. La **Figura 3** muestra un esquema del proyecto de reinstalación. En la actualidad se están terminando las fundaciones para el tanque del acelerador y para los dos tanques auxiliares que almacenará el gas aislante, durante los períodos de mantenimiento.

Si bien se cuenta con la fuente de iones usada en McMaster, se está desarrollando, en colaboración con la Universidad Técnica de Munich (Alemania), una nueva fuente, con ionizador esférico, de alta producción. La misma será construida en los talleres de la Escuela Técnica N° 1 Otto Krause de Buenos Aires en el marco de un convenio de colaboración actualmente en gestión.



Dado que la instalación será dedicada al análisis de compuestos moleculares de actínidos, los imanes inyector y analizador deben poseer campos magnéticos y resoluciones que permitan doblar y resolver esas masas pesadas.

Figura 3  
Esquema de la futura instalación del Centro de Espectrometría de Masas con Aceleradores

