

# Plan Quinquenal de Investigación (1997-2001)

# CSN

Colección  
Documentos  
2. 1997



# Plan Quinquenal de Investigación

(1997-2001)

Colección Documentos CSN  
Referencia DOC-10.03

© Copyright 1997, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye:  
Consejo de Seguridad Nuclear  
Justo Dorado, 11  
28040 Madrid · España  
<http://www.csn.es>  
[peticiones@csn.es](mailto:peticiones@csn.es)

Maquetación y fotomecánica: Equipo Franja  
Impreso por: Ibersaf Industrial, S. L.  
C/ Huertas, 47 bis. 28014 Madrid  
Tel.: 91 429 95 34

ISBN: 84-87275-71-0

Depósito legal: M-44168-1997

## Prólogo

La investigación y la política tecnológica han constituido una de las principales prioridades del actual Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear y por este motivo el CSN diseñó un Plan Quinquenal de Investigación programando las actividades en este campo para el periodo comprendido entre los años 1996 y 2000. Este Plan coordinado por la Comisión de Investigación y Política Tecnológica fue aprobado por el Pleno en febrero de 1996 e incluía el compromiso de una revisión y actualización anual con el fin de incorporar nuevos proyectos y analizar aquellos en proceso de desarrollo. Precisamente, en diciembre de 1996 se celebraron unas Jornadas organizadas por el CSN para analizar los resultados del Plan de Investigación.

Creo que no es gratuito insistir en que el Consejo no es un centro investigador ni pretende serlo. Sin embargo, su naturaleza de institución reguladora garante de la seguridad y la protección radiológica le implica necesariamente en el fomento de la investigación, tanto por parte de organismos nacionales como extranjeros, en todos aquellos campos que afecten a estas competencias. Aunque la tecnología de la seguridad nuclear y la protección radiológica es una tecnología madura, dada la enorme experiencia acumulada, hay que abordar nuevos problemas y nuevos desafíos que no sólo afectan a nuestro país y que incluyen un amplio abanico de temas, desde la optimización del sistema regulador a la necesidad de dar respuestas adecuadas a nuevos problemas técnicos o a decisiones de licenciamiento.

Es importante también tener en cuenta que la investigación no es un fin en sí misma, sino un medio para mejorar las capacidades y habilidades del personal del propio CSN, de forma que lleve a cabo sus actividades de licenciamiento y control de la forma más eficaz y eficiente posible.

Aunque la conversión de los nuevos conocimientos adquiridos en los programas de investigación en mejoras reales en la seguridad de las instalaciones no siempre resulta fácil de medir y valorar, nuestro objetivo debe ser hacerlo y un primer paso en esa dirección es asegurar una adecuada difusión de los resultados de los programas de investigación. Este documento tiene, entre otros, ese objetivo.

Aunque no se pretenda en esta introducción describir exhaustivamente los beneficios derivados de los proyectos del Plan a lo largo de año y medio, sí que querría destacar que dichos resultados han implicado tanto disponibilidad de nuevos conocimientos como mejorar herramientas y prácticas de trabajo.

En esta edición del Plan se ha introducido una sección completa sobre las Instalaciones de Almacenamiento de Residuos, que en la edición anterior sólo se tratan en el apartado general de Emplazamientos, y se han concretado líneas de investigación, con proyectos específicos, en casos en los que la primera edición solamente establecía una voluntad de trabajar en dichos temas. A título de ejemplo esto ha ocurrido en el tema de integridad de materiales.

Finalmente, señalar como hitos significativos en esta línea de trabajos de investigación, la firma en julio de 1996 de un convenio entre el CSN y el CIEMAT y en septiembre del mismo año la renovación del acuerdo de investigación con el organismo regulador de Estados Unidos (NCR).

Espero que este documento sea útil para los técnicos y los investigadores que desde diversas disciplinas impulsan el desarrollo tecnológico en nuestro país.

**Juan Manuel Kindelán**  
Presidente del Consejo de Seguridad Nuclear

## Índice

<b>Antecedentes</b> .....	7
<b>Objetivos y alcance del Plan Quinquenal</b> .....	11
<b>Criterios utilizados en la selección de las actividades incluidas en el Plan</b> .....	15
<b>Organización, difusión y explotación de las actividades de investigación</b> .....	19
<b>Estructura del Plan</b> .....	25
<b>Campos de actividad</b> .....	29
1. Seguridad Nuclear .....	31
1.1. Emplazamientos .....	31
1.2. Explotación de instalaciones nucleares .....	40
1.3. Instalaciones para el almacenamiento de residuos .....	68
2. Protección Radiológica .....	78
2.1. Fundamentos biológicos de la Protección Radiológica .....	79
2.2. Protección Radiológica de los trabajadores .....	90
2.3. Protección Radiológica del público y del medio ambiente .....	96
<b>Anexos</b> .....	107
1. Presupuesto para proyectos de investigación en 1997 y su distribución prevista por áreas temáticas .....	109
2. Lista de acrónimos .....	111
3. Relación de Códigos Referenciales .....	115



# Antecedentes



## Antecedentes

El objetivo fundamental del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es garantizar la protección de los trabajadores, del público y del medio ambiente frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes.

Para poder alcanzar dicho objetivo, la Ley de Creación del CSN le asigna, entre otras, funciones relacionadas con el licenciamiento y control de las instalaciones nucleares y radiactivas. La primera prioridad en el desarrollo de estas funciones es asegurar que los explotadores de las instalaciones toman las medidas adecuadas para prevenir accidentes. También se considera prioritario asegurar que el impacto del funcionamiento normal de las instalaciones sea plenamente aceptable y que, en caso de accidente, existan las medidas adecuadas para limitar sus consecuencias. Para el correcto desarrollo de estas funciones es necesario disponer de la competencia científica y técnica, y poseer los medios adecuados que permitan un estricto control de la seguridad de las instalaciones.

Dado que ha transcurrido cerca de un siglo desde que se descubrieran los peligros de las radiaciones ionizantes, el nivel actual de conocimientos sobre dicho peligro y sobre las formas de protegerse frente al mismo es considerable. Sin embargo, como en cualquier otra tecnología con riesgos asociados,

es necesario continuar dedicando esfuerzos a ampliar el conocimiento de sus factores contribuyentes esenciales y a optimizar los recursos a emplear en su reducción.

Una de las actividades que contribuye de manera notable a aumentar y mantener el conocimiento y la capacidad tecnológica es la investigación, y a ella dedican un esfuerzo considerable todos los países con un número significativo de instalaciones nucleares. Así mismo, numerosas organizaciones internacionales relacionadas con la seguridad nuclear y protección radiológica cuentan con planes y fomentan la investigación en dichos campos.

Reconociendo la importancia de la investigación en el cumplimiento del objetivo fundamental del CSN, la propia Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, en su artículo segundo, apartado 1) asignó al CSN la función de:

*“establecer planes de investigación en materias de seguridad nuclear y protección radiológica y recabar información sobre el desarrollo de los mismos.”*

El CSN, desde su creación, ha realizado y fomentado actividades de investigación con sus propios recursos y ha participado en programas tanto nacionales como internacionales. Transcurridos sus primeros años de existen-

cia, en abril de 1987, el CSN publicó su denominado "*Plan de Investigación y Desarrollo sobre Seguridad Nuclear y Protección Radiológica*" estableciendo el propósito de someterlo a revisiones periódicas sin necesidad de ediciones sucesivas. De acuerdo con dicho carácter, el CSN ha venido considerando de forma continuada, y en particular al determinar sus presupuestos anuales, la participación, promoción y seguimiento de proyectos de investigación estimados de interés, dando cumplida información al Congreso y al Senado en los sucesivos y preceptivos informes semestrales.

El 5 de enero de 1995, el Pleno del CSN acordó crear una Comisión sobre Tecnología e Investigación y Desarrollo, posteriormente denominada *Comisión de Investigación y Política Tecnológica*, encargada del análisis de los diversos aspectos del desarrollo tecnológico relativo a la seguridad nuclear y a la protección radiológica, así como de la elaboración de un nuevo programa de investigación y del seguimiento de sus resultados. Así se inició la redacción de un Plan de Investigación Quinquenal, para el período 1996-2000, revisable anualmente a la vista del conocimiento de la situación en dichas materias y de las necesidades surgidas de la experiencia de explotación de las instalaciones, la situación y tendencias internacionales y, sobre todo, las evaluaciones que se llevan a cabo en el desarrollo de las tareas cotidia-

nas de licenciamiento y control de las instalaciones.

La presente edición del Plan constituye la primera revisión anual, aplicable al período 1997-2001. Se ha llevado a cabo con las consideraciones antes indicadas, gran parte de las cuales se han plasmado en el denominado "Informe sobre el desarrollo tecnológico en seguridad nuclear y protección radio-lógica". El mayor exponente de la relación internacional ha residido en el establecimiento de un nuevo acuerdo de cooperación sobre investigación en seguridad nuclear con el organismo regulador estadounidense, la aceptación de un nuevo convenio para la participación en el Halden Reactor Project y la reorganización del Grupo de Trabajo nº 3 del CSNI/NEA.

# Objetivos y alcance del Plan Quinquenal



## Objetivos y alcance del Plan Quinquenal

Los objetivos esenciales del plan son definir, programar, controlar, aplicar resultados y fomentar las actividades de investigación que sean necesarias para alcanzar de la manera más eficaz posible el fin fundamental del CSN: garantizar la protección de los trabajadores, del público y del medio ambiente frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes.

Se ha de reconocer que la investigación sobre seguridad nuclear y protección radiológica, en especial la patrocinada o realizada por las instituciones reguladoras, como el CSN, no tienen el carácter industrial y de desarrollo de otras investigaciones. En realidad no se llevan a cabo para desarrollar nuevos productos o nuevos procedimientos de fabricación. La investigación que importa en este caso tiene como objetivos fundamentales la verificación y confirmación de que la seguridad de las instalaciones no esté comprometida y que está asegurada la protección radiológica de las personas y del medio ambiente. También tiene como objetivo el conocimiento preciso de los fenómenos asociados a circunstancias extraordinarias, que pueden ocurrir en las instalaciones, con el fin de evitarlas o reducir sus consecuencias. El conocimiento preciso de los mecanismos a través de los cuales las radiaciones ionizan-

tes producen daños, tanto en los tejidos biológicos como en los materiales inertes, sirve también para el establecimiento de mejores medidas de protección. No obstante, a pesar de este distinto objetivo, la investigación que se comenta puede originar también productos y tecnologías de aplicación industrial, tanto fuera como dentro del campo nuclear, que deben ser explotados, si conviene.

El plan sólo incluye actividades en las que existe una cooperación, promoción o financiación del CSN o realizadas por su propio personal. El plan no es exhaustivo, ya que no incluye todas las posibles actividades de investigación relacionadas con la seguridad nuclear y protección radiológica realizadas por otras instituciones, pero sí se ha tratado de que incluya las que actualmente son más relevantes para el trabajo del CSN.

En España, otras organizaciones, con diferentes funciones y responsabilidades, están desarrollando planes de investigación propios en temas conexos con la seguridad nuclear y la protección radiológica, por lo que caben ser objeto de consideración por el CSN.

Existen múltiples necesidades de investigación que son comunes a los países con instalaciones nucleares y radiactivas, por lo que sería un uso irracional de los escasos recursos

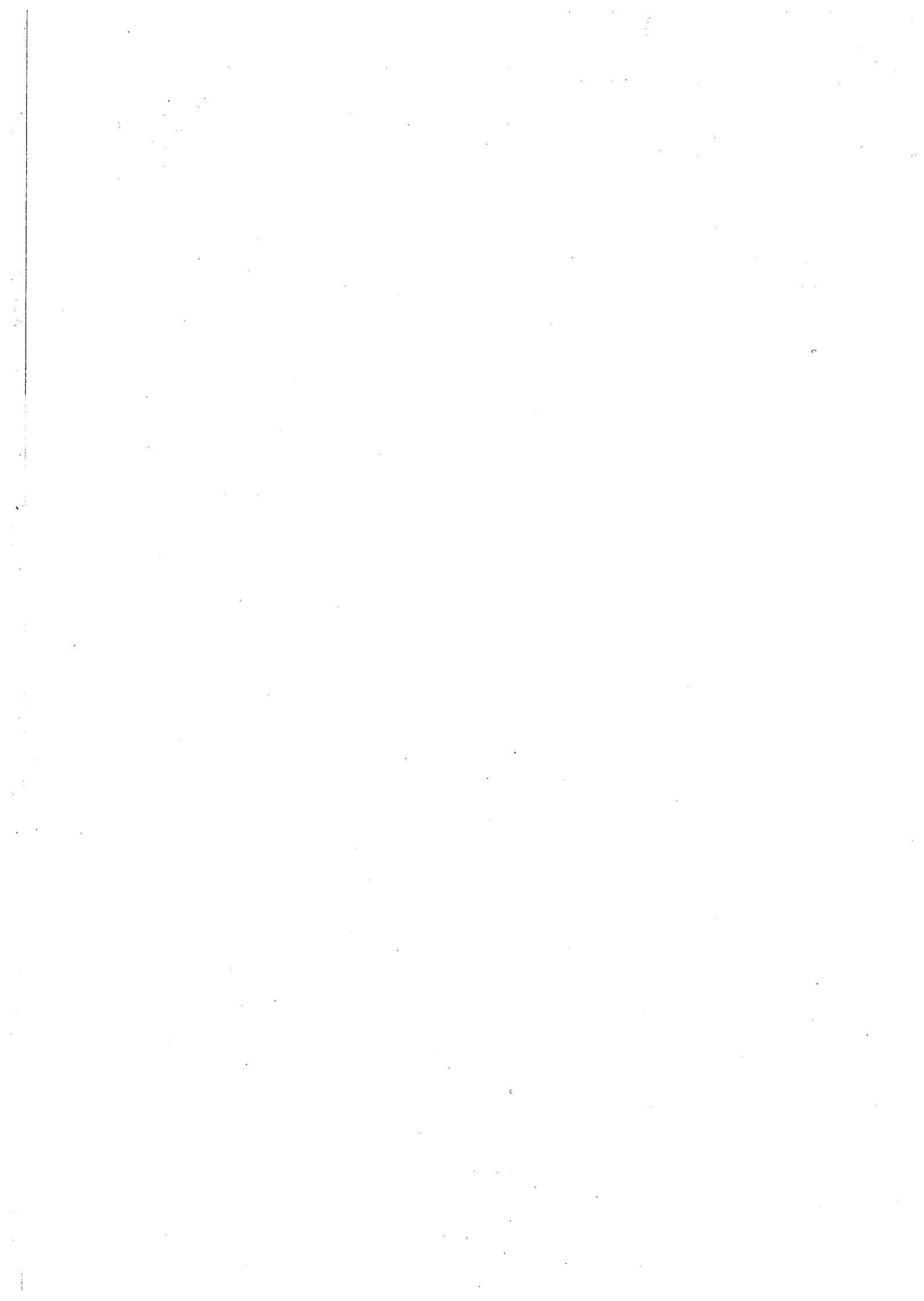
disponibles el pretender desarrollar actividades de investigación de manera aislada. Por ello el plan incluye la realización de muchas actividades en colaboración con otros países o con organizaciones internacionales, cabiendo destacar los planes de investigación de la *Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico* (OCDE) y de la *Unión Europea* (UE), así como los realizados a través de un convenio de colaboración con la *Comisión Reguladora de los EE.UU.* (USNRC).

De hecho es tan abundante el desarrollo tecnológico que se produce a nivel internacional que ya solamente la asimilación de dicho desarrollo constituye un reto significativo para el CSN. De aquí que muchas actividades de investigación del presente plan tengan como objetivo fundamental la asimilación de nuevas tecnologías, herramientas, métodos, procedimientos y entrenamiento de personal, entre otros aspectos.

Es importante resaltar que se trata de un plan abierto a los comentarios o propuestas de cualquier organización (explotadores, centros de investigación, universidades, empresas y otras instituciones) interesada en la seguridad nuclear y protección radiológica, y que en base a dichos comentarios o propuestas podrán incorporarse al plan nuevas actividades en sus sucesivas revisiones. También es un plan abierto, en el sentido de que es posible, a petición de cualquier orga-

nización interesada, incorporarse a las actividades previstas en el plan, así como, con ciertas condiciones, disponer de acceso a los resultados de los proyectos realizados.

# **Crterios utilizados en la seleccin de las actividades incluidas en el Plan**



## Criterios utilizados en la selección de las actividades incluidas en el Plan

En la selección de las actividades de investigación incluidas en el presente plan se han utilizado los siguientes criterios, relacionados por orden de importancia decreciente:

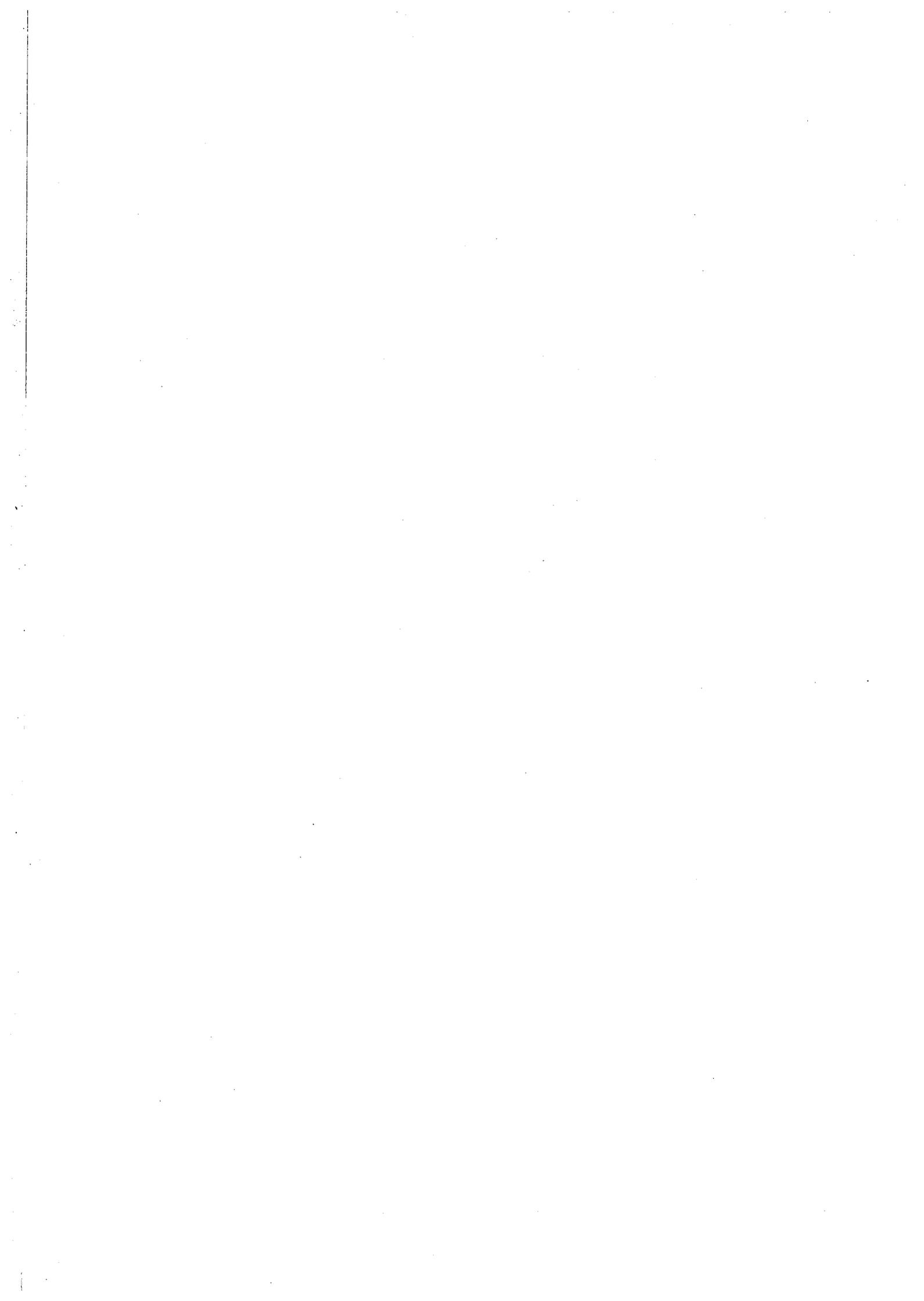
- a) Programas que permitan al personal del CSN actualizarse en conocimientos y herramientas esenciales en las tareas de licenciamiento y control de las instalaciones y en la gestión de intervenciones. Se puede conseguir así una capacidad técnica independiente de la de los explotadores de las instalaciones, fundamental para realizar los trabajos de licenciamiento y control con las máximas garantías.
- b) Programas que aporten conocimientos o herramientas esenciales para el trabajo de los propietarios de las instalaciones para garantizar la operación segura de las mismas. Dados los objetivos comunes al CSN y a los explotadores de las instalaciones, aunque con distintas funciones y responsabilidades, existen temas en los que es conveniente la participación.
- c) Programas que favorezcan actividades de investigación en centros, universidades e instituciones nacionales, a través de los correspondientes convenios, y que fomenten

la formación de especialistas contribuyendo así a mantener la capacidad tecnológica precisa en estos campos.

Así mismo se ha tenido en cuenta el efecto multiplicador que tiene el participar en programas de investigación multilaterales, por lo que, en lo posible, las actividades de este plan, en lugar de abordarse en solitario, se hacen participando en planes de investigación en los que existen otros participantes nacionales o extranjeros, con lo cual la rentabilidad de los recursos invertidos es mucho más alta. Se considera esencial, en este sentido, la participación, en calidad de socios, en las actividades de investigación en el campo de la seguridad nuclear y de la protección radiológica de la UE, con especial referencia a sus Programas Marco y al aprovechamiento de las instalaciones y servicios de sus Centros de Investigación.



**Organización,  
difusión y explotación  
de las actividades de  
investigación**



## Organización, difusión y explotación de las actividades de investigación

El éxito de un plan de investigación depende de la selección de temas a investigar, del control ejercido durante el desarrollo de cada tema y de la difusión y explotación de los resultados obtenidos. En el establecimiento del Plan Quinquenal se ha prestado atención a cada uno de los tres aspectos anteriores.

Las subdirecciones generales técnicas del CSN disponen de cauces administrativos para definir y especificar aquellos temas de investigación que sean necesarios para el desarrollo de sus funciones, o que la experiencia, el desarrollo tecnológico o la situación internacional aconsejen llevar a cabo. Además, la *Subdirección General de Tecnología Nuclear* y la *Subdirección General de Protección Radiológica* tienen la misión específica de analizar la situación y proporcionar ideas y detalles para la prevista revisión anual del Plan. Finalmente, la Comisión de Investigación y Política Tecnológica tiene la misión de formular la correspondiente propuesta de revisión del Plan para su aprobación formal, en base a la información suministrada por las Subdirecciones Generales y a la vista de los informes elaborados.

La mayor parte de los proyectos de investigación contemplados en el Plan serán ejecu-

tados por organizaciones contratadas de acuerdo con la normativa vigente y la práctica ya establecida. El control técnico se encarga a Areas específicas de las Subdirecciones Generales de Tecnología Nuclear y Protección Radiológica. En el caso de proyectos de investigación especialmente significativos o multinstitucionales se nombrará un coordinador específico, quien se encargará del seguimiento de las actividades del proyecto con la misión fundamental de verificar que se alcanzan los objetivos previstos.

El desarrollo de las actividades del Plan debe derivar en la obtención de resultados certeros, y en que éstos sean difundidos entre el mayor colectivo posible de profesionales interesados y explotados en beneficio de la seguridad de las instalaciones y de la protección radiológica de las personas y del medio ambiente. Para la difusión se prevén las siguientes actuaciones:

- a) Confección y publicación de *Informes técnicos*. Estos podrían tener un carácter parcial, dando cuenta de los avances conseguidos en el desarrollo de las actividades de los programas, pero serán los informes finales los que constituyan el procedimiento habitual de diseminación de los logros conseguidos. El contenido de estos informes sólo estará sometido a limitaciones cuando otros posibles socios así lo requieran.

b) Celebración de *Jornadas técnicas* sobre aspectos específicos y de naturaleza global. Estas manifestaciones permitirán también divulgar los aspectos tecnológicos implicados en el desarrollo de los proyectos y tienen la particularidad de posibilitar el intercambio directo de ideas que hagan más fructífero el aprovechamiento de los resultados.

c) Del avance de cada proyecto se continuará dando cumplida cuenta en los *Informes semestrales* al Congreso y al Senado. Las Áreas específicas implicadas, así como los Coordinadores, deberán elaborar periódicamente un resumen del estado de avance para la inclusión en dichos informes.

La utilización y explotación de los resultados de la investigación merece una consideración especial y no sólo afecta al propio CSN, sino también a los titulares de las distintas instituciones, así como a compañías de servicio, ingenierías, fabricantes y suministradores. El CSN utilizará los resultados de la investigación para mejorar sus propios procedimientos y herramientas de evaluación e inspección, así como para la redacción y propuesta de normativa específica, aparte el mantenimiento de expertos y el acceso a instalaciones necesarias para hacer frente a eventualidades, incidentes o situaciones inesperadas que pudieran surgir durante la explotación de las instalaciones.

A tal fin se han previsto las siguientes medidas:

- Desde las primeras etapas de definición de un proyecto se cuenta con las necesidades de los futuros usuarios y a ellos se hacen llegar los resultados con prontitud.
- La estructura administrativa de la Dirección Técnica del CSN incluye procedimientos que tienen como objetivo utilizar y explotar los frutos de la investigación por todas las Unidades implicadas.
- El propio CSN ejerce un control sobre la explotación de los resultados de la investigación a través de la labor de seguimiento que ha encomendado a su Comisión de Investigación y Política Tecnológica.
- Uno de los frutos frecuentemente esperados del Plan es el desarrollo y validación de herramientas informáticas de simulación del comportamiento anormal y accidental de las instalaciones, los llamados códigos de cálculo. Siempre que sea apropiado, el CSN cederá a los interesados estas herramientas. Cuando la propiedad no sea exclusiva del CSN, la transmisión se hará con consentimiento previo del propietario o copropietario y respetando las condiciones limitativas que correspondan.
- El CSN no está facultado para la explotación comercial de los frutos de la investigación; sin embargo, favorecerá tal explotación en aquellos casos en los que sea posible y conveniente.

Con motivo de esta primera revisión y abundando en el aspecto de la difusión de actividades y resultados de los programas de investigación, merece señalar la celebración de una Jornada sobre la marcha del Plan, a finales de 1996, que se pretende establecer con carácter anual; el mantenimiento de dos reuniones semestrales de los participantes en los grupos de trabajo del CSNI, también de carácter periódico, y la elaboración de un informe anual que recoja los aspectos de la investigación que más influencia pueda tener en las funciones propias del CSN.



# Estructura del Plan



## Estructura del Plan

El Plan se estructura en dos grandes campos de actividad, a saber:

- Seguridad Nuclear
- Protección Radiológica

El campo de la *Seguridad Nuclear* incluye tres líneas de investigación:

- Emplazamientos
- Explotación de Instalaciones Nucleares
- Instalaciones para el almacenamiento de residuos

El campo de la *Protección Radiológica* incluye también tres líneas de investigación:

- Fundamentos biológicos de la Protección Radiológica
- Protección Radiológica de los Trabajadores
- Protección Radiológica del Público y el Medio Ambiente

En algunas de estas líneas se pueden distinguir, a su vez, áreas temáticas de investigación.

En cada una de las líneas o áreas de investigación, según los casos, se aporta la siguiente información:

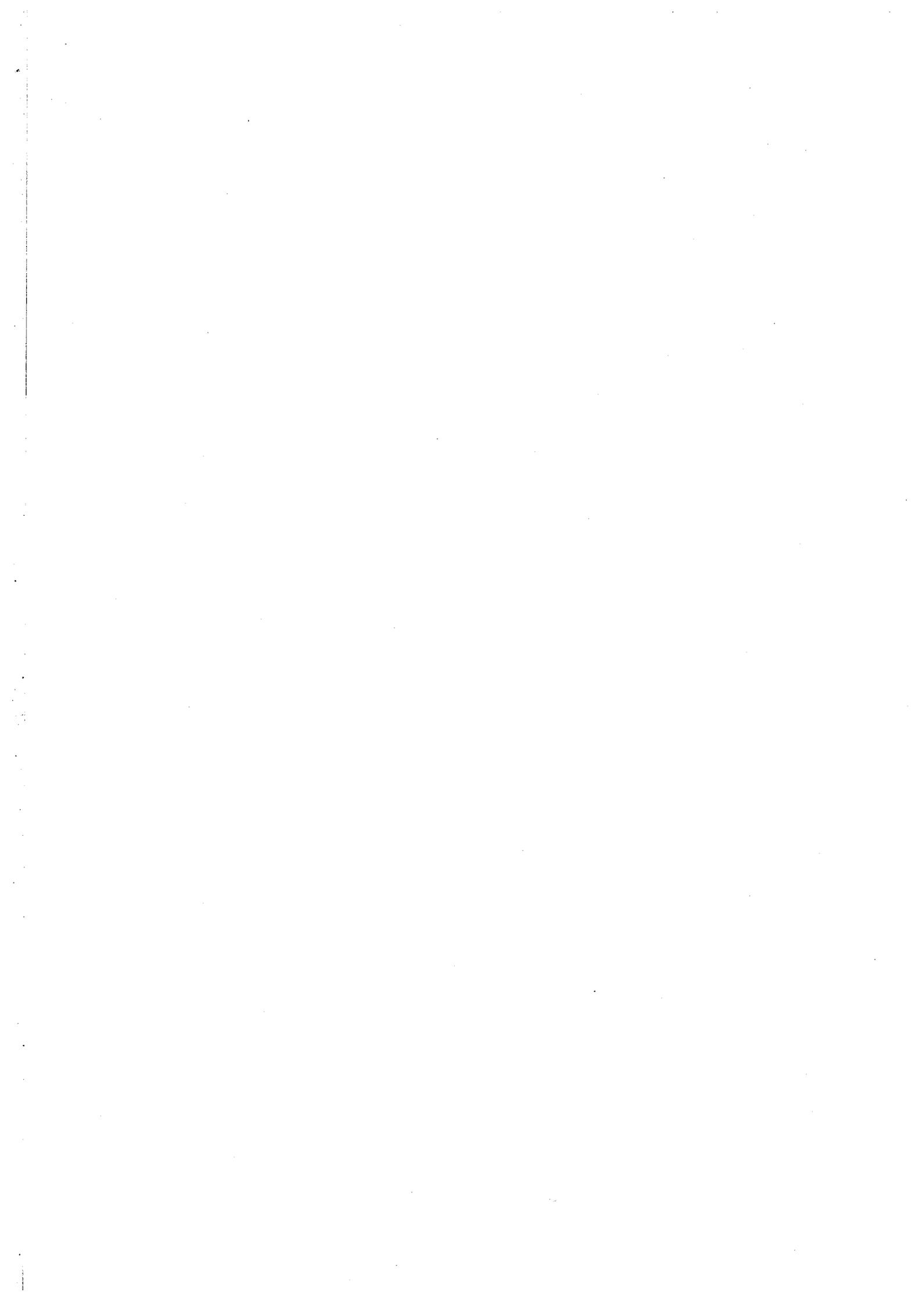
- Una breve explicación de la naturaleza de dicha disciplina, resaltando las razones de su inclusión en el Plan.
- Una relación de temas o actividades genéricas previstas como objeto de interés,

teniendo en cuenta el desarrollo del funcionamiento de las instalaciones del país y las acciones de investigación emprendidas en el concierto internacional.

- Un listado de acciones consideradas que, respondiendo a la temática antes señalada, conforman específicamente la parte esencial del Plan. Se distinguen aquí:
  - *Proyectos de investigación.* Para cada proyecto se identifican los objetivos fundamentales y las tareas previstas.
  - *Acuerdos.* Cuando un proyecto de investigación es parte de un acuerdo con otras organizaciones nacionales o extranjeras, dichos acuerdos se listan en este apartado.
  - *Actividades de Cooperación.* En este concepto se listan actividades que no son parte de un proyecto específico de investigación del CSN y de las que, por lo tanto, tampoco existen acuerdos, pero que son normalmente resultado de la participación en Grupos de Trabajo de organizaciones internacionales.
  - *Tareas adicionales.* Se incluyen aquí otras actividades de investigación no incluidas en los apartados anteriores por su menor envergadura o por no haber alcanzado aún el grado de definición requerido.
- Una descripción de cada una de las acciones consideradas identificadas en los cuatro grupos antes mencionados.

El grado de información suministrado en cada una de las acciones contempladas no es comparable, ya que el Plan considera, al mismo tiempo, acciones bien definidas, a realizar en los meses más o menos próximos y otras, a veces simplemente enunciadas, que requieren mayor precisión y, por ello, serán objeto de particular atención en futuras revisiones. De igual forma, en los casos más inmediatos, ya se han seleccionado los agentes que llevarán a cabo la investigación prevista, mientras que en otros, tal participación está abierta a los interesados.

# Campos de actividad



## Campos de actividad

### 1. Seguridad Nuclear

Las tres grandes líneas básicas de este campo de actividad son:

- Emplazamientos
- Explotación de Instalaciones Nucleares
- Instalaciones para el almacenamiento de Residuos

#### 1.1 Emplazamientos

Muchos proyectos de investigación sobre emplazamientos se orientan hacia el desarrollo de técnicas y metodologías que den lugar al mejor conocimiento de aquellos parámetros que afectan al diseño de las instalaciones y sobre los cuales hay mayor incertidumbre, como sucede con los que afectan al diseño sísmico de las instalaciones nucleares. Otros programas tratan de desarrollar metodologías que faciliten la caracterización del medio hidrológico e hidrogeológico utilizando metodologías no destructivas, como requieren los almacenamientos de residuos. Por último, también se incluyen programas cuya finalidad es cartografiar la radiación natural del suelo en las distintas regiones españolas, en función de su naturaleza geológica.

Dentro del Tercer Plan de Investigación y Desarrollo sobre Residuos Radiactivos de ENRESA, se ha abordado la puesta a punto

de metodologías conceptuales, instrumentales y numéricas para la caracterización de emplazamientos de almacenes de residuos de alta actividad. El CSN ha establecido relaciones con ENRESA con el fin de participar en algunos proyectos que pueden reducir la incertidumbre asociada al conocimiento de la peligrosidad de los emplazamientos. Las áreas consideradas, en principio, como objeto de colaboración son paleoclimatología, sismología e hidrogeología.

Los parámetros geológico-sismológicos, geomecánicos y de dispersión hidrológica e hidrogeológica de contaminantes seguirán siendo objeto de investigación para mejorar el conocimiento y la evaluación del comportamiento del emplazamiento, así como su modelización. Es también objetivo el desarrollo e implantación de técnicas y metodologías de evaluación del emplazamiento a largo plazo, el conocimiento de los procesos que influyen en el diseño de instalaciones nucleares y que regulan el comportamiento de las mismas, y la aplicación de metodologías de cálculo y evaluación.

Las circunstancias actuales de nuestro país aconsejan prestar particular atención a los estudios de emplazamiento en relación con el almacenamiento de residuos radiactivos, ya que es el propio emplazamiento el que constituirá la barrera final oponente a la incorporación de radionucleidos al medio

vivo. A este respecto, se plantea como objetivo general la predicción del comportamiento a largo plazo de la barrera geológica. Para ello es esencial el análisis de las características hidrogeológicas y geomecánicas de las rocas implicadas (graníticas, arcillosas o salinas), el desarrollo de modelos de flujo, transporte de masas y de calor y el estudio de análogos naturales.

#### Previsión de actividades

Las actividades previstas para el próximo quinquenio en este área de *Emplazamientos* se concretan en las siguientes:

- Desarrollo de técnicas y metodologías de evaluación de aquellos parámetros geológicos y sísmicos que afectan al diseño y comportamiento a largo plazo de instalaciones nucleares.
- Desarrollo de técnicas y metodologías de evaluación de aquellos parámetros hidrológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos que regulan el comportamiento del medio geológico y la dispersión de sus componentes.
- Desarrollo del mapa de radiación gamma natural de España.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - HIDROBAP
  - HIDROBAP - 2

- SHISTO 2 - SIGMA
- DAÑOS
- DATAACION
- TRACER
- MARNA - 3

- Acuerdos:

- CSN - ENRESA - UPM  
(Ver Proyecto HIDROBAP)
- CSN - ENRESA - UCM  
(Ver Proyecto SHISTO 2 - SIGMA)
- CSN - ENRESA - UPM  
(Ver Proyecto DAÑOS)
- CSN - ENRESA - UB  
(Ver Proyecto DATAACION)
- CSN - UCM - CEDEX  
(Ver Proyecto TRACER)
- CSN - ENUSA  
(Ver Proyecto MARNA-3)

- Tareas Adicionales

#### *Proyecto HIDROBAP*

El objetivo principal del proyecto HIDROBAP (Hidrogeología en Medios de Baja Permeabilidad) es la caracterización hidrogeológica de medios rocosos fracturados de baja permeabilidad, mediante la elaboración y valoración de una metodología integrada que permita determinar los parámetros estructurales, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos que controlan el flujo y el transporte de radionucleidos en dichos medios, con vistas a almacenamiento de residuos radiactivos.

El Proyecto sigue dos líneas principales. Se aplican y desarrollan, por un lado, metodologías de tipo geoestadístico combinadas con técnicas de análisis estructural, petrográficas e hidrogeológicas, con el fin de caracterizar el medio hidrogeológico mediante la obtención de parámetros hidráulicos e hidrogeoquímicos representativos; asimismo se define un modelo conceptual de flujo y transporte en medios fracturados en el que se identificarán los procesos fundamentales que gobiernan el transporte de elementos radiactivos en este tipo de medios, con vistas a su integración en un modelo global de evaluación del comportamiento de un almacenamiento de residuos. Se verificará y validará, por otro lado, la metodología elaborada mediante la modelización del flujo y transporte en un macizo rocoso, seleccionado en nuestro país, del que se disponga de gran número de datos. A ello se añadirá un análisis de sensibilidad y de la incertidumbre asociada a éstos modelos. Por último, se identificarán criterios para la evaluación de la información elaborada en el proceso de selección de un posible emplazamiento para el almacenamiento de residuos radiactivos en rocas fracturadas.

El desarrollo del Proyecto se lleva a cabo desde finales de 1995 y concluirá a finales de 1998, con la cobertura de un Acuerdo CSN-ENRESA-UPM por el que su coordinación técnica corre a cargo del Depar-

tamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos de la ETS de Ingenieros de Minas. Asimismo se cuenta con la participación de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM y de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puentes de la UPC, además de la colaboración del CIEMAT.

Durante su primer año de desarrollo se ha realizado la integración de los equipos multidisciplinares intervinientes y se ha llevado a cabo el análisis estructural y petrológico mediante la elaboración y adaptación de diversos códigos de cálculo. También se ha iniciado la simulación geológica-hidrogeológica para definir el flujo y transporte de radionucleidos, estudiando la aplicabilidad de los códigos existentes que están siendo adaptados a las necesidades específicas del proyecto.

#### ***Proyecto HIDROBAP-2***

De acuerdo con los resultados del proyecto HIDROBAP está previsto el desarrollo de una segunda fase de este proyecto, el HIDROBAP-2, en el que se aplicarán y validarán, en otras zonas de estudio, las técnicas y metodologías desarrolladas durante la primera fase.

El objetivo principal de esta nueva fase es la aplicación de las nuevas técnicas desarrolladas en HIDROBAP a una zona de estudio

distinta, sirviendo como apoyo a las metodologías tradicionales de investigación. Ello permitirá, además de complementar los objetivos antes descritos para la primera fase, identificar zonas clave en relación con el flujo y el transporte de radionucleidos y áreas, dentro del macizo rocoso, con una mayor incertidumbre desde el punto de vista de su comportamiento hidrogeológico.

En el HIDROBAP-2 se utilizará también la metodología desarrollada en el proyecto SHISTO 2-SIGMA para definir el efecto que el estado tensional del macizo rocoso origina en el flujo de aguas subterráneas (acoplamiento hidro-mecánico). Se determinarán los efectos que sobre la apertura y cierre de las fallas producen los terremotos, para establecer la evolución futura del flujo de agua subterránea hacia la superficie. Para ello se modelizará el esquema de esfuerzos del macizo rocoso y se considerará como un campo potencial de presiones, que se opondrá o se sumará al campo de presiones originado por el gradiente hidráulico existente en la zona. Se utilizará el código ANSYS o el ABAQUS, que resuelven problemas estáticos y dinámicos lineales en estructuras bi y tridimensionales, y una nueva versión del código FRACAS o códigos similares que incluyen este efecto.

Por último, se pretenden definir las pautas para una adecuada integración de la meto-

dología desarrollada como herramienta de evaluación del comportamiento de un almacenamiento de residuos radiactivos situado en un macizo rocoso fracturado.

### *Proyecto SHISTO 2 - SIGMA*

El proyecto SHISTO 2 - SIGMA tiene como objetivo mejorar el conocimiento sobre las zonaciones sismotectónicas de la Península Ibérica, mediante el estudio de deformaciones y del campo de esfuerzos. En efecto, el estudio de sismos destructores recientes ha demostrado que es extremadamente difícil prever la magnitud y localización de terremotos solamente conociendo la historia sísmica, y que la determinación del campo de esfuerzos recientes supone una ampliación fundamental de la información sísmica que sobrepasa el período histórico.

Las técnicas analíticas que permiten inferir el tensor de esfuerzos, responsable del movimiento de una determinada población de fallas, a partir de la orientación de estrías medidas sobre dichas fallas, constituyen los métodos denominados genéricamente Análisis Poblacional de Fallas (APF). La eficacia del APF puede incrementarse aplicando simultáneamente técnicas sismológicas que, a partir de las polaridades de las ondas P, calculen simultáneamente la forma y la orientación del tensor de esfuerzos y los mecanismos individuales coherentes con dicho tensor.

Los resultados de este proyecto se sintetizarán mediante la elaboración de dos mapas, a escala 1/1.000.000:

- Mapa de Estado de Esfuerzos Recientes (MEER).
- Mapa de Estado de Esfuerzos Actual (MEEA).

No solo redundarán en beneficio de la seguridad nuclear de los futuros almacenamientos de residuos radiactivos, sino también en el de posibles estudios probabilísticos de la seguridad que se realicen sobre otras instalaciones nucleares.

El desarrollo del proyecto comenzó a finales de 1995 y concluirá en 1997, siendo fruto de un convenio de colaboración entre el CSN, ENRESA y UCM. Esta última, a través de sus Departamentos de Geodinámica y de Geofísica y Meteorología, coordina las actividades de un equipo multidisciplinar al servicio del proyecto.

Tras la constitución de los grupos de trabajo e iniciación de las primeras tareas organizativas se han desarrollado el programa CRATOS (que permite estudiar mediante APF las poblaciones de planos de fallos estriados), el programa MF96.1.0 (para el cálculo gráfico e interactivo de la orientación del mecanismo focal) y diferentes bases de datos. También se ha efectuado la toma de datos geológicos en campo en la mayor

parte de la Península y se han calculado 72 mecanismos focales, correspondientes a las zonas de mayor actividad sísmica. El trabajo que queda por realizar consiste en completar los datos geológicos y sísmicos de pequeñas zonas aisladas, realizar el análisis integrado de todos ellos en conjunto, finalizar el análisis de las trayectorias de esfuerzos y concluir la definición de los estados de esfuerzos actual y reciente de la Península Ibérica.

#### **Proyecto DAÑOS**

El proyecto DAÑOS (Daño Sísmico) tiene por objetivo desarrollar una metodología empírica destinada a mejorar las estimaciones de peligrosidad y riesgo sísmico en zonas, como la Península Ibérica, de sismicidad moderada, donde la escasez de datos no ha permitido aplicar técnicas desarrolladas en áreas de mayor sismicidad. Ello permitirá obtener espectros específicos de respuesta en emplazamientos de interés, así como seleccionar y evaluar parámetros indicativos del daño potencial en estructuras.

Las tareas a realizar durante el Proyecto consisten primero en:

- Actualización del banco de datos de movimientos fuertes del suelo, recopilando registros obtenidos bajo todas las posibles condiciones que puedan afectar a un emplazamiento, con el fin de poder seleccionar los que más se ajusten a las

características particulares de la zona en cuestión.

- Recopilación de la información macrosísmica referente a distribuciones de daños e intensidades de terremotos instrumentales.
- Análisis de los datos y deducción de los modelos de movimiento aplicables a las diferentes zonas de la Península Ibérica, cuantificando el efecto del suelo.

En una segunda fase, que integrará los resultados anteriores, se desarrollará una metodología para el cálculo de espectros de respuesta específicos en emplazamientos peninsulares, se obtendrán correlaciones entre parámetros macrosísmicos e instrumentales partiendo fundamentalmente de terremotos de la cuenca mediterránea y se seleccionarán y estudiarán los parámetros representativos del daño potencial sobre las estructuras.

Los resultados de este proyecto contribuirán a la mejora del conocimiento de los parámetros de emplazamiento que afectan a la seguridad de las instalaciones nucleares, concretamente de los parámetros sísmicos (acelerogramas y espectros de respuesta del suelo), y también serán aplicables a los estudios probabilistas de seguridad.

El desarrollo del Proyecto tendrá una duración de dos años, entre finales de 1996 y 1998, y se realiza mediante un acuerdo de

colaboración entre el CSN, ENRESA y la UPM, a través de su Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica, acreedora de una gran experiencia en evaluación de parámetros de diseño sísmico y estudios de peligrosidad sísmica.

Una vez constituido el equipo investigador de trabajo se configuró un banco de datos de movimiento fuerte del suelo con una primera aportación de unos 5.000 registros de terremotos de diversas partes del mundo. También se ha organizado la infraestructura necesaria de equipos informáticos y se ha instalado el soporte lógico necesario para el procesado de acelerogramas, comenzando así a desarrollar el sistema de explotación interactiva del banco de datos.

### *Proyecto DATAACION*

El objetivo global del proyecto DATAACION es determinar estructuras geológicas responsables de eventos paleosísmicos fuertes que hayan causado escarpes de falla y datar dichos eventos con la mayor exactitud posible. Se conseguirá reducir, así, la incertidumbre asociada a los datos necesarios en el análisis de la peligrosidad sísmica de áreas sísmicamente moderadas en las que no se han producido eventos catastróficos durante los periodos histórico e instrumental. La metodología a aplicar consiste en:

- Analizar en detalle la geomorfología y las evidencias neotectónicas de los escarpes

de falla y correlacionarlas con la actividad sísmica reciente.

- Realizar cortes perpendiculares a dichos escarpes, mediante la excavación de trincheras, para identificar estructuras tectónicas asociadas a paleosismos y establecer relaciones estructura-estratigrafía-geomorfología
- Datar aquellos horizontes estratigráficos que acoten en el tiempo las evidencias geológicas anteriores asociadas a los paleosismos reconocidos.

Desde el punto de vista práctico, el proyecto se desarrolla en la falla del Camp de Tarragona como estructura geológica de interés y se ha elegido como escarpe de estudio el marcado por su traza entre la ciudad de Mont Roig y el emplazamiento de la CN de Vandellós II. Junto a la metodología expuesta, el proyecto incidirá especialmente en los métodos de muestreo y en los de análisis de las muestras a datar, mediante colaboración con los técnicos de los laboratorios de datación, habida cuenta de la dificultad existente en el área mediterránea para lograr dataciones fiables de caliches.

Fruto de todo ello será la puesta a punto de metodologías de trabajo adecuadas para el análisis de la paleosismicidad en escarpes de falla y también para obtener dataciones fiables en caliches mediterráneos, además de

lograr la formación especializada de un equipo de investigación multidisciplinar en la aplicación de estas metodologías.

El proyecto se puso en marcha a finales de 1996 y se desarrollará en tres años mediante un acuerdo de colaboración entre el CSN, ENRESA y el Departamento de Geología Dinámica, Geofísica y Paleontología de la Universidad de Barcelona. Asimismo, la CN de Vandellós II contribuye al desarrollo de este proyecto, aportando recursos para la adquisición de equipos de precisión, topográficos e informáticos, necesarios en los trabajos de campo.

#### *Proyecto TRACER*

Consiste en la adaptación y calibración, para los ríos y embalses situados aguas abajo de las centrales nucleares españolas, de un código para el cálculo de dispersión en tiempo real (CORVEL) de radisótopos contenidos en vertidos líquidos accidentales a las aguas superficiales. Además, se pretende determinar la incertidumbre asociada a todas las estimaciones suministradas por el código en función de la calidad de los datos de partida utilizados y del modelo de dispersión aplicado. El proyecto está estrechamente relacionado con las iniciativas recomendadas dentro del sistema RODOS, un sistema de ayuda a la toma de decisiones para la gestión de las emergencias fuera de las instalaciones, promovido en el seno del Programa de

Seguridad de la Fisión Nuclear de la Unión Europea.

El desarrollo del proyecto contempla tres grandes grupos de actividades:

- Caracterización hidrológico e hidráulica de los sistemas hidrológicos españoles objeto de estudio (en los ríos Tajo, Ebro y Júcar).
- Realización de medidas de campo en dichos tramos.
- Calibración propiamente dicha del código CORVEL, adaptándolo específicamente a los tramos de los sistemas hidrológicos estudiados.

La duración del proyecto se estima en dos años y se prevé que sus actividades comiencen en 1997. Se desarrollará con el apoyo de organizaciones tales como el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y el Centro de Estudios y Experimentación (CEDEX), con amplios conocimientos en hidrología, hidráulica y modelos de dispersión, y con experiencia probada en el uso de trazadores radiactivos y en el manejo de equipos de campo.

La consecución de los objetivos del proyecto TRACER representará un avance significativo en relación con el estado actual de la técnica, pues la calibración de un código de dispersión de contaminantes, a través de

medidas de campo que engloben tanto a los tramos de río como a los embalses enlazados, no se ha realizado hasta el momento en España para vertidos de corta duración.

### *Proyecto MARNA-3*

Desde hace algún tiempo, el CSN tiene en consideración la confección de un Mapa de Radiación Gamma Natural de España que satisfaga la necesidad de conocer los niveles de radiación natural para su utilización en numerosos estudios, entre los que destacan los relacionados con el conocimiento de los efectos de dosis bajas de radiación. Este tipo de iniciativas ha sido alentado desde el principio por el OIEA y la UE, quienes incluyen entre sus objetivos científicos y tecnológicos mejorar el conocimiento y cuantificar el riesgo global asociado a la radiactividad natural. Además, el proyecto MARNA contribuye a la realización del Atlas de Radiación Natural de Europa promovido por la Comisión de las Comunidades Europeas.

El impulso definitivo para acometer el proyecto estuvo en la abundante y provechosa información resultante de la exploración e investigación de uranio llevadas a cabo primero por la JEN y después por ENUSA. Hasta el presente se han desarrollado y completado dos etapas del proyecto, el MARNA y el MARNA-2. Ambas se han realizado a partir de un acuerdo CSN-ENUSA, quien posee fondos documentales, experiencia y

tecnología para llevar a cabo el proyecto. Además, han colaborado las Universidades de Extremadura y Salamanca.

Como resultado de las etapas concluidas del proyecto MARMA se dispone de un mapa de la España peninsular a escala 1/1.000.000, de mapas a escala 1/200.000 de las Comunidades Autónomas de Extremadura y Castilla-León, y también de mapas a la misma escala de 90.000 km<sup>2</sup> más exteriores a las citadas Comunidades. Con todo ello se ha reunido información detallada, próxima a un dato por km<sup>2</sup>, sobre una superficie aproximada de 220.000 km<sup>2</sup> del territorio nacional. Asimismo, se ha llevado a cabo una importante labor divulgativa de los resultados a través de aplicaciones y de los diferentes medios de comunicación.

El Proyecto MARNA-3, tercera etapa de desarrollo del mapa de radiación natural, amplía la extensión de cobertura del proyecto a escala 1/200.000 más allá de las áreas ya realizadas y contempla, además, la necesaria mejora en los sistemas y medios de consulta de la información obtenida. La realización de esta nueva etapa está prevista también mediante un acuerdo CSN-ENUSA y la colaboración de otras entidades públicas, especialmente las Universidades de las distintas regiones. El proyecto tendrá una duración estimada de tres años.

#### Tareas adicionales

- Modelización neotectónica.  
Se pretende desarrollar una línea de investigación que conduzca a la modelización del movimiento de las discontinuidades de la corteza terrestre (como continuación del Proyecto SHISTO 2-SIGMA).
- Determinación detallada de los parámetros de la fuente sísmica, especialmente profundidad hipocentral, momento sísmico, caída de esfuerzos estáticos, esfuerzos aparentes y radio de la fuente, sobre todo en aquellas zonas en las que el nivel de actividad sísmica o el posible emplazamiento de instalaciones críticas recomienda un mayor conocimiento de las fuentes sismogénicas (Proyecto DESPAS).
- Gestión y análisis de acelerogramas, desarrollando modularmente aplicaciones informáticas para el tratamiento de la colección de acelerogramas disponible en el CSN.
- Evaluación de la magnitud de los terremotos históricos ocurridos en la Península Ibérica que dispongan de mapas de isosistas, comparando resultados obtenidos con diferentes metodologías. (Proyecto INMA).
- Evaluación de los cambios en la distribución del agua subterránea y en el flujo de la misma, debidas a la acción de un terremoto sobre terrenos fracturados o porosos. (Proyecto HIDRO-SIS).

- Determinación de las características del movimiento sísmico en estructuras geológicas profundas, considerando sus diferentes tipos y propiedades. (Proyecto MOPROF).
- Análisis de procesos hidrogeoquímicos en la migración de radionucleidos. Aplicación a análogos naturales. Utilización de modelos hidrogeoquímicos.
- Modelización numérica de procesos acoplados de flujo y transporte reactivo de radionucleidos, con aplicación a escenarios relacionados con la migración de contaminantes radiactivos.
- Modelización numérica de procesos acoplados termohidráulicos que condiciona el flujo y transporte de radionucleidos, con aplicación a escenarios relacionados con almacenamientos de residuos radiactivos.
- Análisis probabilistas versus deterministas para la caracterización hidrogeológica en modelos de comportamiento global de los almacenamientos de residuos radiactivos, evaluando las diferentes metodologías de simulación. Se considerarán modelos detallados y modelos simplificados y se hará uso del código SYVAC o equivalente.
- Modelización hidrogeoquímica de medios graníticos y arcillosos, analizando los procesos físico-químicos y parámetros principales relacionados con el transporte de radionucleidos y su aplicación a emplazamientos para el almacenamiento geológico.

## 1.2 Explotación de instalaciones nucleares

La comprobación de que las instalaciones nucleares alcanzan y mantienen el nivel de seguridad requerido se hace en base a la realización de un análisis de seguridad; estos análisis de seguridad, que inicialmente eran deterministas, se van completando con otros de tipo probabilista, que comprende las siguientes actividades:

- Identificación de los sucesos iniciadores, generados tanto interna como externamente, que puedan afectar a la instalación, a los que ésta deberá responder sin que las variables significativas del proceso superen los límites establecidos.
- Identificación de las condiciones de funcionamiento más limitativas, aceptables habitualmente, que establecen las condiciones de partida de la instalación cuando se produce un suceso iniciador.
- Definición de las capacidades de los sistemas de protección y seguridad y de los operadores para responder a los sucesos iniciadores antes indicados.
- Determinación de la respuesta esperada de la instalación en cada secuencia accidental, utilizando un modelo que simule su comportamiento.
- Comparación de la respuesta esperada con los criterios de aceptación. Si no se cumplieran dichos criterios sería necesario

modificar las condiciones de funcionamiento limitativas o las capacidades de sistemas y entrenamiento de los operadores.

- Fijación de condiciones sobre la operación y la configuración que preservan las hipótesis del análisis anterior, por lo que las actividades en esta línea de investigación están orientadas a mejorar dichos análisis por medio de:
  - Una profundización en la comprensión de los fenómenos que se producen durante las secuencias accidentales, con énfasis especial en las más graves. Para ello es necesario revisar los resultados de ensayos experimentales o de la experiencia operativa existente.
  - Un mejor conocimiento de los fenómenos que puedan degradar equipos o estructuras (envejecimiento), causando sucesos iniciadores o contribuyendo a agravar la respuesta de la instalación ante la ocurrencia de los mismos.
  - Un mejor entendimiento y validación de los códigos de cálculo que se utilizan para simular la interacción de los fenómenos antes indicados. Ello se logra participando en círculos de trabajo que establecen los usuarios y en ejercicios de intercomparación que se establecen con frecuencia a nivel internacional.

- Una mejora de las metodologías que permitan modelar el comportamiento humano, desde el nivel de la Dirección hasta el nivel del Operador, para representar adecuadamente el impacto que la formación, el entrenamiento, los procedimientos y las prácticas de gestión pueden tener en una secuencia accidental. Para ello es necesario participar en planes de investigación orientados al análisis del comportamiento humano.

#### Principales áreas de investigación:

- Termohidráulica y neutrónica
- Accidentes severos
- Análisis del riesgo: fiabilidad y factores humanos
- Integridad de componentes y estructuras
- Envejecimiento de materiales

#### 1.2.1. Termohidráulica y Neutrónica

El concepto de seguridad a ultranza se basa, en el caso de una instalación nuclear, en la interposición de tres barreras físicas entre el material radiactivo y el exterior. En el caso de una central nuclear, estas tres barreras: combustible, barrera de presión del circuito primario y estructura de contención, deben estar siempre en condiciones de efectuar su función. Para ello se establecen límites de seguridad que deben ser ineludiblemente

satisfechos, cualquiera que sea la condición de operación de la central y con el concurso de sus sistemas de protección y seguridad asociados.

El estudio de la variación de los parámetros de operación que afectan a la seguridad de una central, en todas las condiciones, y la viabilidad de las modificaciones que afectan a los sistemas de protección y seguridad, deben ser efectuados, entre otros procedimientos, mediante análisis termohidráulicos y neutrónicos con métodos de cálculo adecuados. Para poder realizar éstos de forma sistemática, el CSN se ha venido dotando de códigos de cálculo en los que se simulan los fenómenos físicos implicados, que se contrastan con medidas en instalaciones experimentales y con la observación y el análisis de transitorios reales.

Aunque los códigos de cálculo han evolucionado de forma significativa en cuanto se refiere al comportamiento termohidráulico y neutrónico, su mejora en capacidad y precisión continuará en los próximos años, lo que contribuirá, sin duda, a la obtención de menores grados de incertidumbre en sus, cada vez mayores, aplicaciones.

#### Previsión de actividades

Durante los próximos cinco años se prevé realizar un conjunto de activida-

des enmarcadas en las siguientes referencias:

- Participación en el desarrollo y validación de las mejores versiones de los códigos termohidráulicos y neutrónicos, tanto en forma desagregada como acoplados.
- Mejora y mantenimiento de la capacidad de simulación de:
  - Secuencias accidentales previsibles en cualquier modo de operación.
  - Pruebas y verificaciones.
  - Incidentes reales.
- Comprensión y mejora de las protecciones incorporadas en las centrales nucleares:
  - Automáticas (sistemas de protección)
  - Manuales (procedimientos de operación en emergencia y gestión de accidentes)
- Participación en el desarrollo de metodologías de evaluación de incertidumbres.
- Análisis de la estabilidad de reactores de agua en ebullición (BWRs).
- Desarrollo de procedimientos para el análisis de escenarios de accidentes a baja potencia y en condiciones de parada.
- Estudios neutrónicos y termohidráulicos del núcleo.

Las actividades a desarrollar en el área de la termohidráulica se han programado mediante el siguiente conjunto de acciones consideradas.

## Acciones consideradas

- Proyecto de Investigación: CAMP
- Acuerdo: CAMP-ESPAÑA (Ver Proyecto CAMP)
- Actividades de Cooperación: Grupos de Trabajo del CSNI/NEA y del NSC/NEA
- Tareas Adicionales

### *Proyecto CAMP*

CAMP (Code Applications and Maintenance Program) es un programa de cooperación internacional en el área de la investigación termohidráulica, al igual que lo fue ICAP, del que se puede considerar su continuador. Se pone en práctica a lo largo de 1992 y su patrocinio y gestión corre también a cargo del Organismo regulador estadounidense.

Tiene como objetivo fundamental el mantenimiento de una versión única, internacionalmente reconocida y aplicable a los análisis de seguridad de centrales nucleares, de los códigos RELAP5/MOD3, TRAC-PF1/MOD2 y TRAC/BF1 mediante una serie de intercambios entre sus usuarios, ya se refieran a identificación de errores e insuficiencias, a la escalabilidad de los experimentos, aplicabilidad e incertidumbre y a sus bases de datos o atañan a cuestiones directamente relacionadas con su aplicación.

La participación del CSN y de otras organizaciones españolas interesadas está refe-

renciada en el Acuerdo Cooperativo de Investigación en Seguridad Nuclear establecido entre el CSN y la USNRC el 20 de septiembre de 1996. Se describe, separadamente, en el texto de un Acuerdo Específico firmado, al efecto, el 22 de junio de 1994 con vigencia hasta el 31 de agosto de 1997. El Pleno del Consejo ha dado su conformidad a la extensión del mismo por un período de tres años.

La contribución técnica del CSN al Programa CAMP-INTERNACIONAL, según el estado de compromiso actual del Acuerdo, consiste en la entrega a la USNRC de dos informes de evaluación por año o trabajos de valor equivalente, que podrán ser publicados como informes NUREG/IA. Existe un acuerdo formal con UNESA y las previsiones globales de contribución técnica al Programa CAMP-ESPAÑA se están cumpliendo satisfactoriamente, a saber:

- CAMP-UNESA: Siete cálculos sobre transitorios y accidentes con modelos de plantas nucleares españolas.
- CAMP-CSN: Desarrollo de un Post-Procesador (ampliación de los trabajos ya iniciados) y varias aplicaciones concretas.

Dentro del Programa CAMP-CSN las contribuciones se han venido incrementando por la aportación técnica de otras organizaciones españolas con las que se establecen los oportunos acuerdos.

Todos los cálculos se encuentran en fase muy avanzada de desarrollo.

El beneficio fundamental obtenido por las instituciones españolas que participan en el Proyecto se sustancia en la disponibilidad de las herramientas indicadas y la documentación a ellas asociada, aparte el incremento del conocimiento, global y específico, que se deriva de tal participación internacional.

#### *Grupos de Trabajo del CSNI/NEA y del CSN/NEA*

Dentro del Principal Working Group 2 (PWG2) del *Committee on Safety of Nuclear Installations* (CSNI) de la NEA/OCDE, el *Grupo de Trabajo sobre Comportamiento Termohidráulico de Sistemas* contempla un conjunto de tareas que vienen siendo seguidas por los representantes de nuestro país y del CSN en particular. La participación del CSN gira en torno a aspectos relativos a la metodología de evaluación de incertidumbres y a la estabilidad de BWRs.

Por otra parte, se desarrolla un tema de trabajo sobre riesgos en condición de parada, en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y con la C.N. de Ascó, con varios años de duración, de gran trascendencia para las tareas de licenciamiento del CSN. La inclusión aquí es por-

que también comprende la participación en un ejercicio internacional sobre transitorios a baja potencia (ISP-38) que dicho Grupo está dando por finalizado.

Adicionalmente debe reseñarse la participación activa en el seguimiento del tema del comportamiento del combustible altamente irradiado en condiciones de accidentes de inserción de reactividad, a través del grupo de trabajo "ad-hoc", dependiente del PWG2 del CSNI, que fue creado de forma específica para esta tarea. Recientemente, dicho grupo de trabajo ha confeccionado un informe sobre el estado de la cuestión, que está sirviendo de soporte a los países de la OCDE para determinar la conveniencia de desarrollar un proyecto conjunto para cerrar los temas pendientes de resolución.

También cabe señalar la participación en el *Grupo de Trabajo de Física de Reactores del Nuclear Science Committee* (NSC)/NEA, en ejercicios de intercomparación de códigos:

- En colaboración con la UPV, sobre estabilidad de reactores de agua en ebullición. Se discute actualmente la conveniencia de ampliar los trabajos recientemente concluidos.
- Con la previsible colaboración del Instituto de Fusión Nuclear de la ETSII de la UPM y TECNATOM, en el ámbito de la neutróica y termohidráulica del núcleo de un reactor.

- A lo largo de estos últimos años ha sido muy notable la participación del CSN en el grupo de trabajo que está coordinando el desarrollo de ejercicios de validación de métodos de cálculo aplicados a los análisis de criticidad con crédito al quemado. Estos trabajos han sido de especial utilidad al CSN para el licenciamiento de los proyectos de modificación de los bastidores de las piscinas de combustible gastado de las centrales nucleares españolas.

Se prevé que este tipo de ejercicios van a desarrollarse de forma coordinada con el CSNI, a través de su PWG2, lo que conducirá a una mejor utilización de recursos y a impulsar actividades adicionales como las de elaboración de informes sobre el estado de la cuestión.

Durante el período de referencia cabe esperar propuestas de nuevos *International Standard Problems*. En este sentido, el CSN está dispuesto a patrocinar la participación en tales ejercicios de instituciones nacionales de investigación y universitarias y, en casos muy especiales, de la propia industria.

#### Tareas adicionales

- Participación en el desarrollo de códigos neutrónicos y termohidráulicos acoplados en dos y tres dimensiones.

La explotación eficiente de las centrales nucleares supone la utilización de herramientas de simulación muy avanzadas de carácter realista y previa, lo que está motivando el desarrollo de nuevos códigos termohidráulicos y neutrónicos acoplados y de carácter multidimensional. El CSN pretende estimular la participación de instituciones apropiadas del país en tales desarrollos para la mejor realización de sus actividades reguladoras.

- Análisis de las inestabilidades termohidráulicas en los reactores de agua en ebullición (BWRs).

El CSN y la UPV han participado en recientes ejercicios internacionales de intercomparación de códigos relacionados con las inestabilidades termohidráulicas propias de los reactores BWR. Sus más recientes actividades se han centrado en torno al desarrollo y mejora de los códigos de cálculo LAPUR y TRAC/BF1 considerados como herramientas de cálculo predictivas de tal fenómeno. La conclusión de estas tareas ha cristalizado en un documento que recoge los resultados obtenidos por las distintas organizaciones participantes.

Las previsiones en este tipo de actividades apuntan a una participación muy activa del CSN y la UPV en la realización de análisis de series temporales.

### 1.2.2. Accidentes severos

Los accidentes graves, más comúnmente conocidos como accidentes severos, son aquellos que, debido al fallo simultáneo o concatenado de varios sistemas de protección y seguridad, lo que conlleva una extremadamente baja probabilidad de ocurrencia, podrían hipotéticamente conducir al deterioro de una fracción importante del núcleo de un reactor nuclear, degradación de su barrera de presión, rotura del recinto de contención y escape de una cantidad significativa de material radiactivo al medio ambiente exterior.

La gran actividad investigadora sobre accidentes severos se inició al comienzo de la década de los años ochenta tras el accidente de TMI-2, cuya secuencia accidental había sido contemplada, en gran medida, en el *Informe Rasmussen*; ya desde entonces la comunidad internacional, y nuestro país en particular, ha situado este tema entre los de mayor prioridad en sus planes de investigación.

La prevención y mitigación de los accidentes severos exige la adquisición del mayor conocimiento posible acerca de los fenómenos y circunstancias asociadas al desarrollo de los mismos y al establecimiento de modelos predictivos y procedimientos de aplicación de tales conocimientos. Si bien es cierto que muchos de los aspectos de

interés se van cerrando, queda aún un importante número de interrogantes por resolver, como muy bien se ha puesto de manifiesto en el Programa Específico de Investigación y Enseñanza en el Campo de la Seguridad y Protección Nuclear del IV Programa Marco sobre seguridad y enseñanza de la UE.

#### Previsión de actividades

Las actividades que el CSN ha previsto desarrollar durante los próximos cinco años en este área de investigación se concretan en los siguientes puntos:

- Profundización en el conocimiento de la fenomenología siguiente:
  - Degradación del núcleo.
  - Comportamiento de los productos de fisión.
  - Análisis del fallo del fondo de la vasija del reactor.
  - Explosiones de H<sub>2</sub> dentro del recinto de contención.
  - Interacción del corium\* con las estructuras de la contención.
  - Refrigeración del corium.
- Análisis de la evolución de secuencias específicas.
- Evolución del término fuente radiactivo en el transcurso de las secuencias accidentales.
- Gestión de accidentes

(\*) Se entiende como *corium* la mezcla de materiales del núcleo que han alcanzado la fusión como consecuencia de un accidente.

Seguidamente se exponen las acciones consideradas, algunas de ellas ya en curso, como vía de desarrollo de las actividades planeadas. Se refieren a la participación en proyectos, establecimiento de acuerdos, colaboración en grupos multinacionales de trabajo y otras actividades singularizadas.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - PHEBUS FP
  - RASPLAV
  - MCAP y R5SCAP
  - OMEGA
  - STORM
- Acuerdo:
  - Programa CSARP/USNRC
- Actividades de Cooperación:
  - Programas Marco de la UE
  - Grupos de Trabajo del CSNI/NEA
- Tareas Adicionales

#### **Proyecto PHEBUS FP**

PHEBUS-FP representa el proyecto europeo de mayor envergadura en el ámbito de la investigación sobre accidentes severos. Puede considerarse como una continuación lógica de los Proyectos PHEBUS-LOCA y PHEBUS-CSD, en el último de los cuales el CSN tuvo una destacada participación. Se lleva a cabo en la instalación "Phebus" del Centro de Estudios Nucleares de Cadarache (Francia), operada por el Institut de

Protection et Sureté Nucleaire (IPSN). Junto a la Unión Europea, participan instituciones de otros países (EE.UU., Canadá, Japón y Corea del Sur).

El objetivo fundamental del Proyecto consiste en estudiar y cuantificar la importancia de la fenomenología asociada a los procesos de generación, transporte y retención de productos de fisión y aerosoles en condiciones de accidente severo en un reactor de agua a presión. Se trata, en definitiva, de analizar la evolución del término fuente en el transcurso de estos accidentes.

Es este un proyecto integral en el que se provoca la degradación del combustible nuclear simulado, así como los fenómenos de transporte de los productos de fisión en el sistema primario, y su evolución en el recinto de contención. Los experimentos se realizarán a un ritmo aproximado de uno cada año y medio o dos años.

El primer experimento de los seis previstos, denominado FPT0, se realizó en diciembre de 1993. El segundo experimento, FPT1, se realizó en julio de 1996, despertando gran interés al ser realizado con un inventario de productos de fisión similar al encontrado en un reactor comercial; sus condiciones de contorno fueron idénticas a las del FPT0, es decir, las correspondientes a una secuencia accidental de pérdida de refrigerante

(LOCA) con rotura grande en la rama fría del circuito primario.

En una primera etapa, el CSN coordina la participación española en el Proyecto, contando con la colaboración del CIEMAT y la ETSII de la UPM a través de su Cátedra de Tecnología Nuclear (CTN). UNESA apoya, asimismo, la participación de ésta última institución. Mientras que las tareas del CIEMAT están orientadas al desarrollo del sistema de códigos para simular los fenómenos que tienen lugar en el recinto de contención, las de la ETSII se centran más en el comportamiento del haz de combustible y el transporte a lo largo del circuito utilizando como herramienta fundamental el código MELCOR. El CSN, que coordina los trabajos y lleva a cabo tareas adicionales para ello, ha establecido sendos acuerdos específicos con estas instituciones por disponer de las capacidades técnicas necesarias, haber jugado un apreciable papel en etapas precedentes del Proyecto y haber acumulado una buena experiencia en las temáticas apuntadas.

#### **Proyecto RASPLAV**

Auspiciado por la OCDE, este proyecto tiene como objetivo general el estudio del comportamiento termomecánico y termohidráulico del fondo de la vasija de un reactor de agua ligera, sobre la que se ha depositado *corium* fundido, mientras que la misma es refrigerada desde su cara exterior.

Se trata, pues, de una configuración experimental que es directamente aplicable a los reactores avanzados.

El Proyecto se lleva a cabo, en su aspecto analítico y experimental, bajo la coordinación del Instituto Kurchatov de Moscú, el cual actúa como Agente del Proyecto. Dispone además de sendos comités técnico y de dirección, formados por expertos internacionales.

Se trata de un proyecto muy específico en el que se utilizan modelos muy detallados de análisis tridimensional de los procesos termohidráulicos del *corium*. La aplicación directa de los resultados de RASPLAV a los códigos actuales y a los modelos de predicción del fallo de la pared de la vasija de los reactores actuales, no es fácil teniendo en cuenta que dichos modelos se encuentran poco desarrollados. Por otra parte, la instalación experimental corresponde al concepto de refrigeración externa de la vasija, lo cual no se ha implantado aún en los reactores actuales como concepto de gestión de accidente.

Desde el punto de vista técnico, el Proyecto es interesante para los reactores actuales, por las siguientes razones:

- Se incrementa el conocimiento de los procesos de convección natural en una piscina de *corium* prototípico, así como la interacción *corium*-pared de la vasija. Es posible aplicar los datos experimentales a

la validación de los modelos incorporados en los códigos que analizan accidentes severos.

- Se obtienen datos valiosos sobre las propiedades físicas del corium.
- Probable desarrollo futuro de la estrategia de refrigeración externa de la vasija y de los reactores actuales.

El interés del CSN en este proyecto responde a la necesidad de evaluar el grado de incertidumbre actual de los modelos de predicción del fallo del fondo de la vasija de los reactores españoles, así como de la posibilidad de emprender la refrigeración externa como medio de gestión de accidentes a fin de evitar dicho fallo.

El Acuerdo Internacional tiene vigencia hasta el 31 de junio de 1997 pero se está proponiendo su ampliación con un conjunto de actividades que bajo la denominación de segunda fase, alcanzarían hasta finales de 1999.

Durante la etapa primera se ha construido la instalación principal y otras auxiliares y se han realizado ensayos a gran escala y distintas pruebas complementarias en una y otras, respectivamente. Gracias a ellas se ha demostrado la integridad de elementos y materiales estructurales bajo temperaturas elevadas y la factibilidad de uso del método de calentamiento de pared lateral, se han

desarrollado modelos que describen fenómenos de interés e instrumentación para operar a altas temperaturas y, desde luego, se ha adquirido extraordinaria experiencia en el área considerada.

Los objetivos de la segunda fase propuesta consisten en profundizar en el conocimiento de los fenómenos físicos e interacciones químicas que tienen lugar en una piscina de corio convectiva para completar la obtención de datos con los que reducir las incertidumbres existentes y, en consecuencia, apoyar decisiones reguladoras sobre seguridad nuclear. Para ello se precisará experimentar con una matriz de diferentes composiciones y condiciones iniciales, a establecer por los órganos de dirección.

#### *Proyectos MCAP Y R5SCAP*

El Proyecto MCAP (MELCOR Code Assessment Program) obedece a una propuesta hecha por el Organismo regulador nuclear de EE.UU. a sus socios del Programa Cooperativo sobre Accidente Severo (CSARP), aunque no con carácter exclusivo, para ampliar y mejorar coordinadamente la validación del código MELCOR.

MELCOR es un código integrado utilizado por la USNRC para el análisis del término fuente en accidentes severos y para los cálculos que forman parte de los análisis probabi-

listas de seguridad. Periódicamente es objeto de contraste con el MAAP, código de características similares, desarrollado por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica estadounidense (USEPRI) y muy utilizado por la industria nuclear. Todo ello es de gran interés para el CSN y converge con sus actuales y próximos objetivos de trabajo. La participación en este proyecto, que trata de mejorar y validar los modelos de cálculo del código, no cabe duda que conlleva una mejor comprensión de tales modelos y una más amplia utilización de los mismos como herramienta analítica. Además permite disponer de una buena herramienta en el ámbito estratégico de la gestión de accidentes.

La conveniencia de disponer de apoyo técnico para participar en el Programa llevó al CSN a establecer un convenio de colaboración con la Cátedra de Tecnología Nuclear (CTN) de la ETSII de la UPM por el período trianual 1993-1995. Durante este período se puso a punto la nodalización del sistema primario y de la contención de la C.N. de Vandellós II y se realizaron algunos cálculos de secuencias accidentales relativos a dicha planta, incluyendo el estudio de las consecuencias potenciales del inicio de la aspersión de la contención sobre la inflamabilidad de su atmósfera.

Habida cuenta del interés en su continuación y del grado de madurez alcanzado en el

uso del Código por la CTN, se prevé establecer nuevos acuerdos.

Asimismo, la USNRC está explorando la implantación de un nuevo programa de evaluación por usuarios, esta vez para el código RELAP5/SCDAP que se denomina, análogamente, RELAP5/SCDAP Code Assessment Program (R5SCAP). Este código, resultado de la unión de los módulos RELAP5, para el tratamiento de la termo-hidráulica, SCDAP, para el tratamiento de la fenomenología de degradación del núcleo, y TRAP-MELT, para el tratamiento de la evolución de los productos de fisión dentro del sistema primario, permite realizar un cálculo de "mejor estimación" del comportamiento del núcleo del reactor y circuito primario, alcanzando hasta la pérdida de integridad de la vasija del reactor. También en este posible programa tiene el CSN un gran interés dado que el código que contempla representa una herramienta habitual en muchas de sus aplicaciones.

#### *Proyecto OMEGA*

La conveniencia de un enfoque común sobre los fenómenos involucrados en accidentes severos, a fin de poder resolver discrepancias significativas entre modelos desarrollados por la industria nucleoelectrica y los organismos reguladores, así como entre ambas series de modelos y datos resultantes de los experimentos, ha llevado a USEPRI (US

Electric Power Research Institute) a lanzar un nuevo proyecto de investigación conocido como Extensión ACE o también PostACE.

Este proyecto, a diferencia de otros anteriores que suponían la realización de experimentos integrales o complejos, es básicamente analítico. Está dirigido fundamentalmente a la obtención de una interpretación común de los procesos y del valor de las propiedades físicas relativas a determinados fenómenos, dentro de la contención, en el transcurso de un hipotético accidente severo, al objeto de lograr una interpretación realista de los mismos.

Habiéndose invitado a nuestro país a participar en el proyecto a través de UNESA, se espera alcanzar un acuerdo de cooperación con esta institución que responda favorablemente al ofrecimiento. En el ámbito nacional, el proyecto viene denominándose OMEGA (Obtención de Modelos para la Evaluación de Graves Accidentes).

Para el CSN merece especial interés el análisis de la fenomenología de la interacción corium-hormigón y su refrigerabilidad contemplada dentro de la fase conocida como Proyecto MACE. En efecto, su comprensión resulta imprescindible para predecir el término fuente, cuantificar las cargas sobre la contención y poder evitar el ataque a la placa base por el núcleo fundido. En el transcurso de los últimos meses se han venido recibien-

do de UNESA diversos informes al respecto que están siendo objeto de estudio.

### *Proyecto STORM*

El Proyecto STORM (Simplified Tests On Resuspension Mechanisms), integrado en el programa comunitario de seguridad de reactores, estudia la fenomenología del transporte de los aerosoles dentro del sistema primario del reactor. Tiene como objetivos proporcionar, gracias a sus experimentos, una base de datos que aporten una mejor comprensión de los mecanismos de deposición y resuspensión de las partículas de aerosoles, así como desarrollar y validar los modelos de tales mecanismos para su inclusión en los códigos pertinentes.

La experimentación se realiza en una instalación de gran escala, conocida con el mismo nombre y ubicada en el Centro Comunitario de Investigación de Ispra (Italia).

El CSN ha destacado en el mencionado centro un técnico contratado, en el marco de la participación conjunta con el CIEMAT en el Proyecto. Las actividades que se vienen realizando y las previstas próximamente incluyen el desarrollo de instrumentación para caracterización de aerosoles y numerosas tareas analíticas de apoyo a los experimentos con el propósito de validar y desarrollar modelos de deposición y resuspensión turbulentas, respectivamente. Cabe añadir que

se han identificado aspectos considerados como puntos débiles que requieren atención en el horizonte del V Programa Marco, a saber, geometrías irregulares, estructuras complejas, circulación natural en vasija y efectos electrostáticos.

#### *Programa CSARP (Acuerdo CSN-USNRC)*

El Acuerdo bilateral entre la USNRC y el CSN sobre investigación en seguridad nuclear, contempla la inclusión del Organismo español en el Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP), que auspicia aquella y en el que participan la mayor parte de los países con intereses nucleares, así como la UE. Este Acuerdo, continuación de otro anterior, se firmó en Septiembre de 1996 y tiene un período de vigencia de cinco años.

CSARP tiene como objetivo básico dar respuesta a los interrogantes que surgen en relación con la fenomenología asociada a hipotéticos accidentes severos en las centrales nucleares actuales, estudiando los procesos asociados a la progresión de la fusión del núcleo de un reactor nuclear, la liberación y el transporte de los productos de fisión a través de la instalación y las cargas derivadas sobre la contención.

La adhesión al Programa permite el intercambio, entre los distintos miembros del mismo, de la información generada por las

organizaciones participantes y gestionada por la USNRC. Se trata de un Proyecto dinámico, donde el progreso de la investigación y el consiguiente hallazgo de nuevas áreas de incertidumbre va marcando el rumbo de las actividades que deben realizarse. Su desarrollo contempla tanto aspectos teóricos como experiencias soporte para la validación de modelos de cálculo.

El interés del CSN se explica en el hecho de que los objetivos técnicos se van orientando en función de las cuestiones de carácter regulador que se definan como prioritarias. Es fundamental el seguimiento del desarrollo y validación de códigos, por cuanto se relaciona lógicamente con el grado de confianza con que se pueden tomar decisiones reguladoras basadas en ellos.

Las contribuciones españolas al Programa consisten esencialmente en aplicaciones de los códigos sobre instalaciones experimentales asociadas a proyectos en los que se participa y sobre centrales nucleares españolas. A este respecto merecen citarse como actividades realizadas, determinadas aplicaciones y cálculos con los códigos STCP, SCDAP, RELAP5/SCDAP, VICTORIA, MELCOR, CONTAIN, CORCON, VANESA y SOLGASMIX en relación con las instalaciones TMI-2, PHEBUS, DEMONA, FALCON y CORA, entre otras, y algunas centrales españolas. Se prevé continuar utili-

zando algunos de dichos códigos como RELAP5/ SCDAP, MELCOR, VICTORIA y CONTAIN, en el ámbito del desarrollo de su aplicación a centrales nucleares españolas, y participar en proyectos que, como Phebus-PF, STORM y FARO/KROTOS se consideran de gran interés.

#### *Programas Marco de la UE y participación en los programas de investigación de sus centros conjuntos de investigación*

En abril de 1994, el Consejo de la Unión Europea adoptó para el período 1994-1998, el denominado IV Programa Marco para Actividades Comunitarias de Investigación y Enseñanza en el ámbito nuclear, ocupando un lugar destacado la seguridad de los reactores, uno de cuyos principales planteamientos apoya la cooperación en el estudio de los fenómenos que guardan relación con los accidentes severos. En este momento la UE está diseñando ya el V Programa Marco, como continuación del ahora vigente.

La participación en este programa es importante porque constituye una fuente de financiación de actividades mediante el desarrollo de proyectos cuyos objetivos responden a los temas científicos y tecnológicos definidos por la Comunidad internacional como del mayor interés. Además y por la esencia del propio programa, fomenta la colaboración internacional y la participación plural de instituciones.

Varios proyectos de los contenidos en el Plan han sido integrados en el IV Programa y otros lo serán en la quinta edición. En este sentido han merecido particular atención los Proyectos PHEBUS FP y STORM, cuyas características así como las previsiones de participación se han expuesto previamente. Por otra parte, dentro de un convenio de colaboración con el CIEMAT sobre análisis de accidentes severos en la contención, al que se hace referencia posteriormente, el CSN apoya la participación en los proyectos TEPSS e IODINE CHEMISTRY relativos al análisis de los sistemas pasivos de la contención en diseños avanzados del tipo BWR y al desarrollo y aplicación de un modelo cinético a implantar en códigos de química del yodo, respectivamente. También pueden aprovecharse otras oportunidades que, como las que analizan los procesos relativos al comportamiento del hidrógeno dentro del recinto de contención, se consideren de gran interés por su aplicación en el análisis de seguridad de las centrales nucleares españolas. Por último, cabe destacar las previsiones de participación en ejercicios "benchmark" sobre técnicas de *juicio de expertos* para la evaluación de parámetros y probabilidades relacionados con temas fenomenológicos de un accidente severo y desarrollos secuenciales de la progresión del mismo.

Para conseguir optimizar el coste de las actividades de investigación e impulsar la

participación de instituciones españolas en el programa comunitario, el CSN continuará la política de cofinanciación de aquellos proyectos que sean aprobados por el programa, siempre que sus objetivos sean interesantes para esta institución, con la condición de tener libre acceso a los resultados, y dentro de las posibilidades presupuestarias.

Así mismo, el CSN considera de interés promover la participación española en la investigación que se realice en los propios centros de la Unión Europea que desarrollan programas en el campo de la seguridad nuclear y la protección radiológica. En este sentido se considera especialmente relevante la actividad que se realiza en el centro de Ispra (Italia), en torno a los proyectos PHEBUS FP, STORM y FARO/KROTOS, relacionados con los accidentes severos. Cabe también mencionar el Instituto de Transuránidos de Karlsruhe (Alemania) y el Centro de Petten (Holanda).

#### *Grupos de Trabajo del CSNI/NEA*

Dentro del área de investigación sobre accidentes severos, cabe señalar la participación del CSN en el *Grupo de Trabajo sobre Comportamiento del Núcleo Degradado In-Vessel* del PWG2 que viene llevándose a cabo de una forma continuada. Los recientes frutos obtenidos se refieren al seguimiento del ISP-39 relativo a un experimento de la serie FARO sobre interacción corium-refrigerante y a la

documentación de un estudio que se ha venido realizando sobre el establecimiento de una *Matriz de Validación* de códigos de modelización de la fenomenología contemplada.

Del mismo modo, cabe destacar la cooperación del CSN en aspectos ligados al estudio de la estanquidad de los recintos de contención, dentro del *Grupo de Trabajo sobre Gestión de Accidentes Severos* del PWG4. Actualmente está considerándose la participación en la proyectada segunda reunión de especialistas sobre ayudas al operador para la gestión de accidentes severos (SAMOA-2), a celebrar en Lyon (Francia) en septiembre de 1997. Aunque en éste y en los demás grupos de trabajo (que abordan distintos aspectos de la fenomenología de los accidentes severos en la contención) cabe señalar colaboraciones españolas puntuales, como las que se refieren a la participación en la elaboración de dos informes sobre el estado de la cuestión en cuanto a calentamiento directo de la contención y a distribución de hidrógeno en la misma, se siente la necesidad del aunamiento de esfuerzos entre CSN y sector eléctrico de forma coordinada. También se entiende que el CIEMAT y las instituciones universitarias podrían jugar un excelente papel, por lo que entra dentro de los planes del CSN promover, mediante subvenciones, la participación en ISPs o en la elaboración de informes sobre el estado de cuestiones de interés.

## Tareas adicionales

- Aplicaciones a centrales nucleares españolas del análisis de secuencias accidentales específicas.

Consiste en la realización de estudios analíticos de secuencias de accidentes severos aplicables a centrales nucleares españolas. El apoyo técnico para esta tarea ha sido encomendado a la UPM en base a su buena experiencia con el código MELCOR.

Uno de los análisis previstos está en vías de finalización. Se trata de un pequeño accidente con pérdida de refrigerante (LOCA), a través de una rotura de 0,05 m de diámetro equivalente en una línea de recirculación de un reactor de agua en ebullición, con disponibilidad del condensador de aislamiento y fallo de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS) de baja presión y agotamiento de las baterías a las seis horas.

Los demás análisis, actualmente en proceso de desarrollo, son de aplicación a centrales con reactores de agua a presión. Son los siguientes:

- Pérdida total de energía eléctrica sin fallo de los sellos de las bombas principales (hasta agotamiento de las baterías en 2 horas) e indisponibilidad de la turbobomba de agua de alimentación auxiliar.
- Pérdida total de energía eléctrica con disponibilidad de la turbobomba de agua de alimentación auxiliar (hasta agotamiento de las baterías en 2 horas) y fallo de los sellos de las bombas principales a 40, 45 y 50 minutos con área de rotura de  $3 \times 0,0005 \text{ m}^2$ .
- Fallo de una válvula del presionador (supuesta atascada abierta) con indisponibilidad del sistema de inyección y del agua de alimentación auxiliar.
- Pérdida total de energía eléctrica con fallo de sellos de las bombas principales a los 40, 45 y 50 minutos (área de  $3 \times 0,0005 \text{ m}^2$ ) y fallo de las baterías a las 4 horas con pérdida de la turbobomba del sistema de agua de alimentación auxiliar.
- Estudio de la fenomenología relacionada con la rotura del fondo de la vasija del reactor durante un accidente severo. Consiste en la revisión de la situación en lo que respecta a los fenómenos que inciden en la rotura del fondo de la vasija durante un accidente severo (como son las secuencias de redistribución del *corium* y su evolución en el fondo de la vasija, su refrigerabilidad desde dentro y desde fuera de la vasija y la degradación de los materiales del fondo de la misma), así como un análisis detallado de su tratamiento con distintos códigos (MAAP 3 y 4, MELCOR y SCDAP) y consiguiente

aplicación a las centrales nucleares españolas. Aspectos esenciales de tal aplicación serán los APS de nivel 2, las guías de accidentes severos y, especialmente, las emergencias.

Para afrontar este estudio se requieren conocimientos básicos sobre los fenómenos que tienen lugar en la fase "en vasija" de los accidentes severos, incluyendo las especialidades de termohidráulica y de materiales. Tales conocimientos son los que deberían prestar pues la/s persona/s ó institución/es con las que eventualmente se cuente.

- Análisis de accidentes severos en la contención.

Se refiere al comportamiento de la contención en caso de accidente severo en sus múltiples aspectos termohidráulicos, químicos, de aerosoles y de hidrógeno, siempre con la finalidad última de actualizar y mejorar las herramientas de cálculo, desarrollar nuevos modelos y contribuir a su validación frente a experimentos de efectos separados e integrales, así como a su aplicación a planta.

Aunque parte de la adquisición de los conocimientos se materializa a través de la participación en proyectos y grupos de trabajo de carácter internacional, se siente la necesidad de impulsar y apoyar acciones adicionales que satisfagan necesidades complementarias y faciliten tal participación. En esa línea se enmarcan

los vigentes acuerdos establecidos con el CIEMAT, en lo que respecta al conjunto de aspectos antes referidos, y con la UPM, en cuanto a la evaluación y mitigación del riesgo de combustión del hidrógeno.

### 1.2.3. Análisis del riesgo: fiabilidad y factores humanos

La importancia de los análisis de riesgos estriba no sólo en su capacidad de estimar cuantitativamente el riesgo que comporta una central nuclear, sino también en la identificación de aspectos que, como diseños de componentes y sistemas, procedimientos de operación y formación de operadores, sean susceptibles de mejoras.

La traducción práctica más sobresaliente de estos análisis consiste en la realización de los llamados Análisis Probabilistas de Seguridad (APSs), que analizan íntegramente la seguridad de una central nuclear, tanto en sus aspectos preventivos de posibles accidentes como en las de mitigación de sus consecuencias. Su fuerte interrelación con el Area de Accidentes Severos, anteriormente tratado, es pues evidente.

Consciente de la necesidad de llevar a cabo este tipo de análisis, el CSN viene desarrollando desde 1986 su *Programa Integrado de*

*Realización y Utilización de los Análisis Probabilistas de Seguridad en España*, que contempla la necesidad de que cada central nuclear española disponga, cada vez más perfeccionado, un modelo lógico probabilista para analizar en profundidad su seguridad y ser aplicado convenientemente. Para lograr más eficazmente este objetivo, el CSN ha previsto editar un nuevo documento que revise y actualice el Programa Integrado vigente.

La nueva edición del Programa mencionado se espera vea la luz en muy breve plazo. En ella se identificarán y describirán las líneas de investigación previstas, cuya puesta en práctica es deseable que sea el resultado de un clima de colaboración entre compañías eléctricas y organismo regulador. Un buen conjunto de líneas de investigación no son novedosas y las actividades a ellas asociadas tratarán de consolidar algunos aspectos metodológicos de los análisis que incrementen la precisión de sus resultados cuantitativos y faciliten sus aplicaciones. Otro conjunto de líneas de investigación vienen enmarcadas por su necesidad de desarrollo y consenso de metodologías estandar: normalización de metodologías para aplicaciones de los APSs, el APS como técnica de apoyo a la toma de decisiones, aspectos informáticos para las aplicaciones de los APSs, mejoras de las bases de datos y la consideración temporal en los APSs.

## Previsión de actividades

La previsión de actividades para el próximo quinquenio, en lo que atañe a este área de investigación, gira en torno a los siguientes temas:

- Segunda edición del Programa integrado de realización y utilización de los Análisis Probabilistas de Seguridad (APS):
  - Continuación de la aplicación del programa a las centrales nucleares españolas.
  - Revisión y actualización del programa.
- Desarrollo y regulación de las aplicaciones de los estudios de APS, consolidando aspectos metodológicos que las hagan cada vez más precisas.
- Establecimiento de guías de diseño y evaluación de interfases hombre-máquina.
- Evaluación de los sistemas de control y apoyo al operador.
- Desarrollo de procedimientos de operación de emergencia y gestión de accidentes severos.
- Establecimiento de técnicas de análisis de la seguridad operacional, que contemplen:
  - Secuencias de precursores de accidentes.
  - Estadística de datos operacionales y de fiabilidad de componentes y sistemas.
  - Causa raíz de los sucesos.
- Seguimiento de la evolución de la filosofía reguladora.
- Importancia del binomio Organización - Seguridad.

- Procesos de elicitación del juicio de expertos.
- Desarrollo de herramientas y métodos de generación y validación de soporte lógico de sistemas digitales relacionados con la seguridad.
- Implantación de sistemas de presentación de parámetros de seguridad.

A continuación se concretan las acciones consideradas para desarrollar las actividades indicadas.

#### Acciones consideradas

- Proyecto de Investigación:
  - HALDEN
- Acuerdos:
  - Programa sobre Análisis de Riesgos, Fiabilidad y Factores Humanos/USNRC
  - Programa Internacional de Análisis de Precursores
- Actividades de Cooperación:
  - Grupos de Trabajo del CSNI/NEA
  - Ejercicio Comparativo sobre Técnicas de Juicio de Expertos/UE
- Tareas Adicionales

#### *Proyecto HALDEN*

La Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE viene patrocinando un Programa de I + D que utiliza instalaciones experimentales del Centro Nuclear de Halden (Norue-

ga). Dicho Programa se refiere a áreas relacionadas con sistemas hombre-máquina y con combustible nuclear/materiales.

Dado el interés y la actualidad de los temas programados para los diferentes sectores del ámbito nucleoelectrico, España aceptó el ofrecimiento de participación en el Proyecto, primero para el trienio 1991-1993, después para el trienio siguiente (1994-1996) y, nuevamente, para un tercer trienio (1997-1999) a través de un Convenio Nacional integrado por CIEMAT, ENUSA, DTN, TECNATOM y CSN.

Las bases en que se asienta el interés de la participación, en cuanto a sistemas hombre-máquina, son la asimilación de las metodologías de validación experimental de diseños avanzados, la realización de validaciones ergonómicas de sistemas computerizados de apoyo a la operación y la posibilidad de elaborar modelos de comportamiento humano aplicables a hacer óptimas las técnicas de fiabilidad humana en los APSs.

El CSN viene centrando su seguimiento y participación más activos en actividades relativas al establecimiento de las bases técnicas para el desarrollo de guías de diseño y evaluación de interfases hombre-máquina, teniendo en cuenta criterios basados en los factores humanos y, ya en menor medida, en la investigación de métodos y herramientas

utilizables para evaluar la fiabilidad de las instrucciones lógicas de los sistemas de control y de apoyo al operador. Cabe señalar a este respecto, la asignación de una persona destacada en Halden en tareas de validación de sistemas de apoyo al operador mediante experimentos con operadores en el Laboratorio de Interacción Hombre-Máquina (HAMMLAB).

A la vista del impulso que parece estar dándose al sistema CAMS y del interés que las organizaciones españolas muestran por el mismo, es previsible que en el nuevo trienio se lleven a cabo actividades relacionadas con algunos de sus módulos.

### *Programa de la USNRC sobre Análisis de Riesgos, Fiabilidad y Factores Humanos*

La mayor parte de las técnicas sobre análisis probabilistas de seguridad son originarias de los EE.UU. Con el fin de participar en los beneficios, el CSN viene cooperando en esta disciplina con la USNRC en virtud de acuerdos bilaterales sobre investigación en seguridad nuclear suscritos entre ambas instituciones. El vigente Acuerdo fue firmado en septiembre de 1996 y tiene un período de validez de cinco años.

El seguimiento de los acuerdos citados con respecto a los análisis probabilistas de seguridad y a los factores humanos forma parte del trabajo cotidiano del CSN. Las

tareas actuales se vienen enfocando principalmente en los aspectos del riesgo en los distintos modos de operación, sistemas informáticos para PCs e interfase hombre-máquina. En el futuro se prevé incrementar el esfuerzo que se está desarrollando, no sólo dando mayor énfasis a las actividades mencionadas, sino incidiendo en el mayor grado posible en aquellos aspectos más relacionados con la Revisión del Programa Integrado de APS, como son las aplicaciones del mismo en la racionalización del proceso regulador.

En relación con los métodos de análisis de riesgos para su uso en tomas de decisión de carácter regulador, la USNRC considera que los mismos precisan mejoras en el tratamiento de riesgos de incendios, envejecimiento de equipos, fiabilidad de sistemas pasivos, I+C digital, fiabilidad humana y comportamiento del aspecto organizativo, para la eliminación y reducción de incertidumbres. A este respecto los códigos SAPHIRE y MACCS deberán mantenerse en condiciones operativas óptimas.

Sería deseable, por tratarse de objetivos comunes, que la industria española participara en estas tareas de forma consorciada con el CSN. Ello traería como consecuencia un mayor aprovechamiento nacional en el desarrollo y aplicación del APS a las centrales nucleares españolas.

### *Programa Internacional de Análisis de Precursores*

Uno de los aspectos básicos del APS es el análisis de sucesos ocurridos en las centrales nucleares. Dicho análisis proporciona conocimientos y comprensión de los sucesos, complementarios de las metodologías convencionales, permitiendo identificar el nivel de significación de un suceso y de las posibles vulnerabilidades derivadas del mismo, es decir, fallos adicionales que podrían haber conducido a un accidente severo. Cuando un suceso inicial sobrepasa un determinado nivel de significación, generalmente en términos de su probabilidad condicionada de daño al núcleo, se denomina "precursor".

El objetivo del programa es desarrollar una metodología que permita realizar, dentro de un tiempo razonable y con ayuda de un APS específico de planta, el análisis extenso y reproducible de una variedad de sucesos operativos en centrales nucleares. Para desarrollar una metodología de análisis de precursores, el CSN participa en un programa internacional en el que, además de España, lo hacen Bélgica, Canadá, Holanda, Suecia, Suiza y el Reino Unido.

El programa, dirigido por ENCONET CONSULTING GES.m.b.h., se encuentra en una fase muy avanzada pues ya se ha generado una versión de procedi-

miento detallado de análisis de incidentes y se espera poder concluir con el estudio de las necesidades de llevar a cabo actualizaciones en los APSs como consecuencia de los resultados de dicho procedimiento.

En la actual perspectiva de trabajo, el CSN prevé aplicar la metodología desarrollada, probándola sobre casos concretos de centrales españolas.

### *Grupos de Trabajo del CSNI/NEA*

Dentro del CSNI/NEA, los Grupos Principales de Trabajo 1 y 5 (PWG1 y PWG5) desarrollan tareas relativas al análisis de fallos de causa común con influencia de factores humanos, papel de los simuladores en el entrenamiento de operadores, banco de datos para la cuantificación de la fiabilidad de componentes, análisis de las acciones críticas del operador para la seguridad de la planta y metodología del APS de nivel II y aplicación a la gestión de accidentes. El CSN ha participado de forma activa en las tareas de dichos Grupos de Trabajo y se prevé tal continuación.

En concreto, el PWG1 se propone seguir analizando el papel de los simuladores en el entrenamiento del personal de explotación, focalizando el estudio en los temas de entrenamiento en equipo, estrés y fidelidad de los simuladores.

Por su parte, el PWG5 aborda la problemática asociada a los estudios probabilistas de seguridad interactivos y a la construcción de bancos de fiabilidad, lo que requiere la colaboración de los titulares de las instalaciones.

### *Ejercicio comparativo sobre técnicas de juicio de expertos en el nivel 2 de APS/UE*

Bajo el liderazgo del centro comunitario de Ispra y la concurrencia de diferentes instituciones y organismos europeos, se desarrolla un ejercicio comparativo de diferentes metodologías sobre técnicas de Juicio de Expertos en el que tras la estimación de parámetros relacionados con un fenómeno de accidente severo frente a un experimento del Programa FARO, se va a efectuar una aplicación de estas técnicas al desarrollo de un diagrama de la progresión del accidente severo en APS de nivel 2.

Con el fin de adquirir experiencia en estas técnicas y poder aplicarlas en temas de seguridad nuclear y teniendo en cuenta que la UPM cuenta con una adecuada capacidad para llevar a buen término la participación en el mencionado ejercicio, el CSN estableció un acuerdo específico con la misma en el que se concretan los detalles de la transferencia tecnológica.

### Tareas adicionales

- Nuevas técnicas de APS.  
Se trata de adquirir conocimientos sobre el estado de la situación de las nuevas técnicas de análisis probabilistas, contribuir a su desarrollo y, por último, aplicarlos en ámbitos concretos. La razón para ello es que los métodos existentes son objeto de mejora para superar importantes limitaciones y las nuevas técnicas constituyen un buen vehículo para complementarlos. Las actividades previstas se centran principalmente en la aplicación de las técnicas de Montecarlo, que resuelven limitaciones de los actuales diagramas de fallos y de sucesos, mejoran la evaluación de secuencias accidentales incluidas en las bases de diseño, facilitan el establecimiento de procedimientos de emergencia y de gestión de accidentes, y cuantifican mejor la influencia del error humano. Debe contarse para ello con el apoyo de personas adscritas a centros de investigación, experimentadas en la utilización de técnicas de Montecarlo, que serán dirigidas por personal del CSN.
- Procedimientos de operación de centrales nucleares en condiciones de accidente.  
Las tareas aquí implicadas se refieren a técnicas de análisis y establecimiento de criterios aplicables a la evaluación de los operadores y procedimientos de operación en condiciones de emergencia y de accidente.

Debido a la fuerte interacción entre la evolución de los parámetros de una central nuclear y las acciones de sus operadores, es necesario simular el comportamiento de la central, asimilando y poniendo a punto modelos que permitan predecir las variables con que contarían los operadores y el personal de apoyo técnico en el curso de un accidente.

El CSN dispone de infraestructura y experiencia necesarias para poder contar con los sistemas COPMA y CAMS de aplicación directa en la temática apuntada. El primero es un sistema de informatización de procedimientos de operación de emergencia, instalado en el CSN como versión COPMA II, previéndose que para los próximos años se desarrolle el COPMA III con nuevas capacidades, entre ellas las de aplicabilidad al análisis y simulación de guías de accidente severo. El CAMS (Computerized Accident Management System) está ideado como sistema de ayuda "on-line" al operador en la gestión de accidentes, si bien puede ser utilizado también acoplado a un simulador como RELAP5-SCDAP a fin de demostrar la eficiencia de un determinado conjunto de medidas mitigadoras.

Actualmente el CSN se propone desarrollar, con la colaboración de una institución apropiada, una herramienta de evaluación, mediante la conexión de COPMA y, condicionado a un estudio previo de viabili-

dad, de CAMS con códigos de simulación termohidráulica, en particular RELAP5, para obtener la capacidad de tratar simultáneamente el comportamiento de los sistemas de la planta en condiciones accidentales y la ejecución de los procedimientos y estrategias previstas, a la vez que aportar facilidades de interfase con el usuario.

- Análisis de precursores de accidente.

Con el concurso de una institución universitaria apropiada, el CSN tiene previsto actualmente desarrollar métodos y herramientas para el análisis de precursores de accidentes en CC.NN españolas. Esto se concreta en la realización de un programa gestor que actuando como interfase entre códigos preexistentes (uno de análisis de accidentes y carácter exploratorio, como el MAAP3, y otro de cálculo de probabilidades, como el SAPHIRE) sea capaz de implantar una metodología mejorada de análisis de precursores, a la vez que realizar operaciones de almacenamiento y recuperación de estados intermedios de simulación.

- Técnicas de análisis operativo.

Se prevé que serán objeto de investigación, en los próximos años, los siguientes temas:

- Desarrollo de técnicas para el análisis estadístico de datos operacionales y de fiabilidad de componentes y sistemas de seguridad, entre las que se encuentra un programa de Indicadores de

Seguridad (ISO) actualmente activo en el CSN, pero que requerirá desarrollos posteriores para incorporar nuevos indicadores de fiabilidad de sistemas.

- Desarrollo de mejoras en las técnicas de análisis de causa raíz de los sucesos, para analizar los sucesos ocurridos en las centrales nucleares españolas y determinar la validez de las acciones correctoras adoptadas por sus titulares.

Se contará con el apoyo técnico de personas, instituciones o empresas con conocimientos y experiencia adecuados a cada caso, mereciendo especial atención el CIEMAT por la conveniencia de que su grupo de Seguridad Industrial trasvase conocimientos bidireccionalmente con otras ramas industriales. Así, recientemente se ha establecido con este centro investigador un convenio específico de 4 años de duración por el que se llevará a cabo un seguimiento de indicadores de funcionamiento de las centrales nucleares españolas desde el punto de vista de la seguridad, se analizarán las diferencias entre los indicadores españoles y estadounidenses que susciten mayor interés y se realizarán estudios monográficos detallados de las causas de sucesos de carácter genérico considerados de especial impacto en nuestras centrales.

- Evolución de la filosofía reguladora.

En los últimos años se está incrementando de forma notable el uso del APS como herramienta complementaria y racionalizadora de la metodología determinista. Los criterios y normas de seguridad, inicialmente deterministas, se verán sustancialmente modificados desarrollándose lo que se conoce como *Regulación Basada en el Riesgo* (Risk Based Regulation). Por otra parte, se incrementará de forma notable el énfasis en la medida del nivel de seguridad operacional de las instalaciones, sustituyendo requisitos prescriptivos por lo que se denomina *Regulaciones Basadas en el Comportamiento* (Performance Based Regulations). Estos cambios de filosofía suponen variaciones importantes en la forma de trabajar de un organismo regulador como el CSN y éste está interesado en actividades de investigación que puedan ayudar a realizar esa evolución de la manera más ordenada y eficaz posible.

- Relación entre organización, gestión y seguridad en las centrales nucleares.

Consiste en investigar la influencia que la organización y la gestión de las plantas tiene en su seguridad operacional, para así promover las mejoras necesarias en aquellas.

El CSN ha encargado al CIEMAT, a este respecto, la elaboración de un programa de investigación y desarrollo que per-

mita una asimilación correcta de las tecnologías disponibles para la evaluación del impacto de la organización en la seguridad. Previamente a la confección de dicho programa, cuyo desarrollo podría tener una duración de tres a cinco años, se está revisando la bibliografía existente e identificando otras organizaciones nacionales e internacionales que tengan algún tipo de relación con esta temática.

- Desarrollo y fomento del concepto de cultura de la seguridad.

El CSN desea impulsar la introducción del concepto *cultura de la seguridad* en todas aquellas instituciones con intereses nucleares. Aparte de los trabajos propios planea crear un banco de publicaciones sobre el tema.

La autoevaluación por el explotador como análisis sistemático y periódico de las condiciones operativas de seguridad de una instalación nuclear constituye un buen ejemplo de arraigo de la cultura de seguridad.

#### 1.2.4. Integridad de Componentes y Estructuras

El mantenimiento de la integridad de componentes y estructuras es un requisito indispensable para satisfacer el criterio fundamental de la seguridad a ultranza, ya enunciado. Ello requiere el desarrollo y utilización de procedimientos de vigilancia y

corrección de las anomalías que pudieran encontrarse.

Entre los componentes más significativos destaca la vasija de presión y la problemática asociada a su fragilidad por radiación. El sistema de contención se ha de poner en primer lugar entre las estructuras cuya integridad es esencial.

Con la presente revisión del Plan Quinquenal de Investigación se inicia la concreción de actividades previstas en este área y se consideran acciones consecuentes, algunas de ellas ya emprendidas.

Al igual que con otros tipos de actividades, se considera conveniente la colaboración del Sector Eléctrico, así como la de los centros de investigación y departamentos universitarios competentes. Una especial referencia es obligado hacer aquí a ENUSA, en cuanto al aspecto especialmente interesante de la integridad de la varilla de combustible, debiéndose procurar la colaboración de dicha entidad.

#### Previsión de actividades

La previsión actual de actividades para estos cinco próximos años, tiene las siguientes referencias:

- Estudio del comportamiento del combustible con alto grado de quemado.

- Profundización en el conocimiento de las características de los materiales del núcleo de un reactor.
- Integridad de la barrera de presión, con atención al mejor desarrollo del concepto "fuga antes de la rotura".
- Estudio de los efectos de la fragilización de la vasija de presión.
- Modelización del fallo del recinto de contención.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - HALDEN
  - CABRI
- Acuerdos:
  - Programa sobre Integridad Estructural /USNRC
- Actividades de Cooperación:
  - Grupos de Trabajo del CSNI/NEA

#### Proyecto HALDEN

Ya se ha señalado el establecimiento de un Convenio Nacional para la participación en este programa de la OCDE, una de cuyas ramas de investigación es la de combustible nuclear/materiales.

Las actividades relativas al combustible nuclear encuentran su máximo exponente en el estudio del comportamiento del combustible de alto quemado que tiene como objetivo suministrar información sobre las

variaciones que, a causa de elevadas exposiciones, sufren aquellas propiedades de combustible y vaina de significativo interés para la seguridad de una planta, tanto durante su funcionamiento en estado estacionario como durante transitorios termo-hidráulicos. Mediante ensayos pertinentes se prevé realizar estudios de efectos separados que permitan obtener parámetros específicos de comportamiento. Se complementarán con pruebas integrales, utilizando barras procedentes de reactores comerciales que comprobarán la bondad de los modelos aplicables.

Las actividades que se refieren al área de materiales se circunscriben actualmente a tres aspectos que están enmarcados con el título de "Degradación de los materiales que residen en el núcleo y efectos de la química del agua". La *corrosión de la vaina del combustible y su hidruración*, son problemas que cobran especial importancia cuando se habla de alto quemado, tal y como antes ya se ha referido, y de forma particular en los reactores del tipo PWR. Otro aspecto se refiere a los trabajos de los *materiales del núcleo* e incluye la realización de ensayos intranucleares para la investigación de aceros inoxidables e inconeles, el agrietamiento por corrosión bajo tensión e irradiación, con énfasis particular sobre los efectos de la química del refrigerante. Los aspectos de la *química del refrigerante* siempre constituyen

un común denominador en los programas de materiales. En este caso la formación de depósitos será motivo de investigación así como la influencia de la radiación en ese proceso.

### ***Proyecto CABRI***

En programas experimentales con combustible altamente irradiado se han detectado fuertes deformaciones en los especímenes de las varillas de combustible utilizados al ser sometidos a pulsos de potencia con características análogas a los que se producirían en el supuesto de un accidente de inserción rápida de reactividad en un reactor de agua ligera.

Teniendo en cuenta que la información experimental disponible es escasa y que las condiciones en las que se han realizado los experimentos no son totalmente representativas de las que se darían en un reactor comercial, es preciso ampliar la base de datos disponible mediante la realización de nuevos experimentos. Puesto que, en el momento presente, no existe ninguna instalación experimental con las características necesarias para desarrollar estos experimentos, se ha planteado, como única alternativa viable a corto plazo, el modificar la instalación de CABRI, ubicada en el centro de Cadarache (Francia), para sustituir su lazo de refrigeración de sodio por uno de agua ligera a presión.

El Institut de Protection et de Sûreté Nucleaire (IPSN) francés, titular del reactor experimental CABRI, ha propuesto que las modificaciones necesarias en la instalación, y los experimentos que en ella se realicen, se desarrollen dentro de un proyecto internacional patrocinado por la OCDE.

El interés de la participación española en dicho proyecto es indudable porque el problema afecta de lleno a una buena parte de los reactores españoles en operación.

En principio se contempla que las modificaciones en el reactor experimental CABRI se inicien dentro del año 1997, con el objetivo de que la instalación esté totalmente disponible a principios del año 1999.

### ***Programa de la USNRC sobre Integridad Estructural***

Una fuente importante para el CSN sobre actividades de investigación y sus resultados en el área de la integridad estructural lo constituye el ya citado acuerdo bilateral entre la USNRC y el CSN sobre investigación en seguridad nuclear firmado en septiembre de 1996.

Este programa abarca un amplio rango de temas que contempla aspectos tanto estructurales como de envejecimiento de materiales. Es experimental y analítico e incluye la integridad del sistema primario, en

particular la vasija de presión y los efectos de su fragilización debida a la irradiación, mecanismos de degradación de los componentes internos del reactor, respuesta antisísmica de la contención y otras estructuras de obra civil envejecidas y estudios de determinados equipos eléctricos y mecánicos.

#### *Grupos de Trabajo del CSNI/NEA*

Una vez reorganizado el Principal Working Group 3 (PWG3) del CSNI en tres subgrupos, a saber, el de Integridad de Componentes y Estructuras Metálicas, el de Envejecimiento de Estructuras de Hormigón y el de Comportamiento Sísmico de Estructuras, el CSN se plantea su participación en los mismos, así como la promoción de otras participaciones cooperativas de instituciones nacionales. Cabe ya apuntar, a este respecto, la disposición del CSN a participar, dentro del primer subgrupo de trabajo, en tareas consecuentes al programa FALSIRE, apoyando a otras organizaciones españolas, y en temas relacionados con las técnicas de inspección basadas e informadas en el riesgo.

#### **1.2.5. Envejecimiento de Materiales**

Se comprende que es preciso conocer la degradación que pueden experimentar las propiedades de los materiales constituyentes

de componentes, sistemas y estructuras de las instalaciones nucleares, a causa del ambiente generalmente hostil en que se encuentran, en especial a causa de la radiación, pero también por efecto de la temperatura y de la humedad y de sus variaciones, tanto en circunstancias normales como anormales de operación. Este conocimiento constituye la base sobre la que tomar decisiones con respecto a aumentar la esperanza de vida de las instalaciones.

El tema del "envejecimiento" está siendo considerado en los programas de investigación de las distintas instituciones nacionales e internacionales con intereses nucleares. De hecho, los titulares de centrales nucleares españolas, en especial Santa María de Garoña, José Cabrera y Vandellós II, han emprendido un amplio programa de investigación en este sentido.

Por su lado, el CSN está considerando el establecimiento de acuerdos con instituciones de investigación, para el desarrollo de proyectos relativos a los efectos de la radiación sobre los materiales, en especial sobre los que conforman la vasija del reactor. La previsión de actividades al respecto se orienta hacia la determinación de fluencias neutrónicas y la modelización del daño por simulación computacional microscópica.

### 1.3 Instalaciones para el almacenamiento de residuos

La gestión integral de los residuos radiactivos conlleva la disponibilidad de instalaciones de almacenamiento definitivo tanto para los residuos de baja y media actividad como para los de alta actividad. Las estrategias comúnmente empleadas para una y otra clase de residuos son el almacenamiento superficial en el primer caso y el almacenamiento geológico profundo en el segundo.

El almacenamiento superficial de residuos de baja y media actividad no precisa desarrollos tecnológicos importantes por cuanto se considera ha alcanzado un nivel satisfactorio de consolidación. No obstante, se plantean ciertas líneas de actuación como actividades de investigación tendentes al mejor conocimiento del comportamiento a largo plazo de los sistemas de almacenamiento, tal como la durabilidad de las barreras y otros aspectos puntuales. El desarrollo, comparación y validación de metodologías de evaluación de instalaciones y sistemas de las mismas para estos residuos es, de cualquier forma, un objetivo de interés para el CSN.

El almacenamiento geológico profundo para residuos de alta actividad es una técnica compleja, de carácter multidisciplinario que, pese a haber tenido un gran desarrollo

tecnológico, sobre todo en los países más avanzados, requiere aún importantes avances y un mayor desarrollo. También se reconoce la necesidad de avanzar en la concreción de metodologías de evaluación de la seguridad que conduzcan al establecimiento de prácticas reguladoras apropiadas. Como buena parte de la información necesaria para evaluar la viabilidad conceptual de estas instalaciones se obtiene de los denominados laboratorios subterráneos de investigación, España debe, dentro de los programas de cooperación internacional, particularmente los de la Comisión Europea, continuar la prospección de los procesos y resultados obtenidos de los mismos, y asimilar las técnicas de aplicación necesarias.

Principales áreas de investigación:

- Residuos de Baja y Media Actividad
- Residuos de Alta actividad

#### 1.3.1. Residuos de Baja y Media Actividad

Los materiales residuales con muy bajo contenido en radiactividad están siendo objeto en los últimos años de numerosos estudios orientados a demostrar que su gestión como residuos convencionales produce únicamente riesgos radiológicos triviales. El desarrollo y aplicación de metodologías de evaluación del impacto que produciría la gestión, convencional de residuos de muy baja

radiactividad conlleva un profundo conocimiento de tales prácticas, la selección de los escenarios y vías de exposición de los miembros del público y la posterior determinación del impacto asociado para proceder finalmente a comparar todo ello con los criterios internacionalmente aceptados para el riesgo trivial. Ello debe llevarse a cabo con códigos de cálculo que, aunque ya gozan de un buen grado de perfeccionamiento, necesitan adecuarse a la práctica real española.

Por lo que se refiere a los residuos con un contenido sensiblemente mayor de radiactividad, si bien en el rango conocido como de baja y media actividad, los sistemas de aislamiento están basados en la interposición de barreras naturales y artificiales que impidan o retarden la llegada de los radionucleidos al medio ambiente. Las evaluaciones técnicas asociadas al licenciamiento de estas instalaciones necesitan desarrollar y adecuar en el marco regulador español, metodologías que permitan realizar análisis globales de su comportamiento.

#### Previsión de actividades

Con respecto a los residuos de muy baja actividad:

- Adecuación de las metodologías utilizadas a las prácticas reales.
- Realización de estudios de aplicación de las metodologías a residuos procedentes

de las instalaciones nucleares y radiactivas (pequeños productores).

Con respecto a los residuos radiactivos de baja y media actividad:

- Selección de metodologías que permitan abordar reevaluaciones de la seguridad y modificaciones en los límites de operación del Centro de Almacenamiento de El Cabril.
- Mejoras en el conocimiento del comportamiento global de los sistemas de almacenamiento superficiales.
- Evaluación de la seguridad radiológica en las distintas alternativas de gestión que puedan plantearse para residuos especiales (grafito).
- Intercomparación de metodologías para la evaluación de sistemas de almacenamiento.

#### Acciones consideradas

- Proyecto IMPACT.  
A realizar en colaboración con el CIEMAT, tiene por objeto el desarrollo de la metodología para evaluar la propuesta de desclasificación de materiales residuales que contienen muy bajas concentraciones de radionucleidos.
- Proyecto PEQUEÑO.  
Estudio del impacto radiológico de la gestión como residuos convencionales, de los materiales procedente de instalaciones radiactivas con niveles muy bajos de acti-

vidad. Para su desarrollo se prevé contar con la colaboración de algún centro universitario.

- Proyecto COND17.

Desarrollo de una metodología actualizada para la evaluación de la seguridad de las instalaciones de evacuación superficial de residuos radiactivos de baja y media actividad. Se realizará en colaboración con el CIEMAT y complementará con un ejercicio de aplicación al caso del Centro de Almacenamiento El Cabril. El proyecto incluirá también la participación en un ejercicio de validación de estas metodologías que está preparando el OIEA.

- Proyecto GRAFITO.

Estudio del impacto radiológico de las diferentes alternativas de gestión del grafito residual procedente del desmantelamiento de las centrales nucleares tipo CGR. Se desarrollará probablemente con la colaboración del CIEMAT y se está analizando la posibilidad de colaborar con el IPSN de Francia y con alguna otra institución de investigación de otros países que utilicen reactores de grafito, en particular el Reino Unido.

- Ejercicio internacional ISAM/OIEA.

El OIEA prepara un ejercicio de comparación y validación de metodologías de evaluación de la seguridad del almacenamiento superficial de residuos de baja y media actividad. Es continuación

de otro ejercicio realizado con anterioridad, el NSARS, orientado a las agencias operadoras de residuos. El CSN, con la colaboración del CIEMAT, tiene intención de participar en el ejercicio ISAM que será utilizado para contrastar y validar la metodología que se desarrolle en el proyecto COND17. También participarán por parte española ENRESA e INITEC, aportando al ejercicio la visión de las agencias operadoras sobre la cuestión.

### 1.3.2. Residuos de Alta Actividad

Los residuos radiactivos de alta actividad están constituidos básicamente, en nuestro país, por el combustible gastado generado por las centrales nucleares. Dada la estrategia adoptada de ciclo abierto, el almacenamiento directo de dicho combustible, en condiciones de seguridad, constituye el objetivo último de la gestión de esta clase de residuos. La alternativa considerada actualmente más idónea es el almacenamiento geológico profundo (AGP) en formaciones estables y con características adecuadas.

Las actividades de investigación sobre el AGP integran aspectos relativos al diseño y construcción de las barreras de ingeniería, al desarrollo de técnicas para la caracterización geológica y la selección de emplazamientos

y al desarrollo de metodologías para evaluar la seguridad a largo plazo del sistema de almacenamiento.

Dado el enorme esfuerzo de investigación que presenta este tipo de actividades, el CSN considera determinante abordarlas acrecentando al máximo el criterio de la cooperación, tanto a nivel nacional como las promovidas por la UE, las organizaciones OCDE/NEA y OIEA, y países con programas avanzados. Algunos de éstos, como EE.UU., Alemania, Suecia, Canadá y Finlandia disponen de un diseño conceptual bien definido; los dos primeros cuentan además con emplazamientos potenciales en fase de caracterización que han proporcionado una amplia variedad de datos técnicos y conocimientos científicos sobre el comportamiento de las diferentes barreras de aislamiento.

El programa español relativo al AGP prevé para el próximo quinquenio el desarrollo de diseños genéricos para las tres formaciones consideradas en principio (arcilla, granito y sal), así como de evaluaciones genéricas del comportamiento de los sistemas de almacenamiento en granito y arcilla. Las actividades del CSN en este área tendrán como objetivo general la asimilación de los desarrollos tecnológicos y metodológicos tendentes al establecimiento del marco regulador necesario para aco-

meter las correspondientes evaluaciones de seguridad.

#### Previsión de actividades

- Demostración de la idoneidad del diseño, construcción, cierre y sellado de sistemas de almacenamientos.
- Profundización en el conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los diferentes componentes del sistema de almacenamiento para la comprensión de su comportamiento y evaluación de la seguridad a largo plazo.
- Evaluación del comportamiento integrado de los sistemas de almacenamiento. Asimilación de herramientas y metodologías conceptuales:
  - Identificación completa de los procesos, eventos y situaciones futuras que pueden afectar al comportamiento del sistema (desarrollo de escenarios).
  - Desarrollo y aplicación de modelos conceptuales y programas de cálculo apropiados.
  - Evaluación de las posibles consecuencias radiológicas.
  - Análisis de incertidumbres y sensibilidad.
  - Validación y revisión de todos los elementos de la evaluación.
  - Comparación de los resultados con criterios.

## Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Laboratorios subterráneos
  - Análogos naturales
  - Modelización
  - Intercomparación de ejercicios de seguridad realizados
  - Aplicación del juicio de expertos
- Actividades de Cooperación:
  - Comité RWMC/NEA
  - Comité WASSAC/OIEA
  - Grupo Asesor PAAG/NEA
  - Grupo de Coordinación SEDE/NEA
  - Grupo de Trabajo del Comité WASSAC/OIEA para el APG

### *Proyecto Laboratorios Subterráneos*

En la actualidad existe un amplio número de Laboratorios Subterráneos de Investigación (LSI), construidos en diferentes medios geológicos por los países con programas avanzados para el desarrollo de instalaciones de almacenamiento geológico profundo (AGP).

Los desarrollos y proyectos que se llevan a cabo en dichas instalaciones están fundamentalmente orientados a:

- El refinamiento de técnicas para la caracterización detallada de los emplazamientos y desarrollo de técnicas de construcción adaptadas a las características de la formación geológica.

- La demostración de la viabilidad de construcción de las barreras de ingeniería, el estudio de su comportamiento y el del campo cercano en condiciones similares a las del almacenamiento.

Aunque parte de los estudios puedan ser específicos para la aplicación a un sistema de almacenamiento geológico particular, es evidente que la gran mayoría de los fundamentos y conocimientos científicos, técnicos y metodológicos de la planificación, construcción y experimentos en los LSI pueden ser comunes para formaciones geológicas del mismo tipo y aplicables a diseños de AGP similares en la concepción de las barreras de ingeniería.

Durante el año 1996 el CSN inició una primera prospección de algunos de los LSI existentes, comprobándose el interés de profundizar en el estudio de los resultados y experiencia obtenida en este campo.

La asimilación de la experiencia obtenida y que se obtenga en el próximo quinquenio en los LSI es de gran interés para el CSN, tanto para la evaluación de los diferentes métodos de caracterización de emplazamientos y de técnicas de construcción, como para la comprensión del comportamiento de las barreras de ingeniería, su integración a la evaluación de la seguridad de los sistemas de AGP y en su caso la aplicación a las evaluaciones del

diseño y construcción de posibles laboratorios españoles.

Los objetivos y alcance de este proyecto se dividen en las dos partes o subproyectos siguientes:

Parte I.- Consistirá en la prospección de los objetivos y fundamentos del diseño, análisis de las técnicas de construcción utilizadas y métodos de caracterización del emplazamiento desarrolladas en los laboratorios existentes, la asimilación de las lecciones aprendidas, y las conclusiones que puedan derivarse para su aplicación a las formaciones geológicas consideradas en el programa español.

Parte II.- Incluirá el estudio de la finalidad, diseño y características de los experimentos realizados y en curso durante la operación de los laboratorios en los distintos medios geológicos, el análisis de los resultados en cuanto a viabilidad de la construcción de las barreras de ingeniería y al comportamiento de las mismas y del campo cercano, así como de su aportación a la modelización de los procesos estudiados.

El desarrollo de cada una de estas partes o subproyectos será llevado a cabo por organismos o instituciones españolas. La duración prevista para el desarrollo de la Parte I es de 2 años. El desarrollo de la

Parte II se realizará en dos fases sucesivas con una duración de 2 años cada una, la primera referida a los experimentos ya realizados y la segunda destinada a los experimentos en curso y sus resultados.

### *Proyecto Análogos Naturales*

El conocimiento del comportamiento futuro de los componentes de un sistema de almacenamiento geológico profundo para los residuos de alta actividad (AGP) y del comportamiento integrado del sistema en su conjunto, constituye una parte fundamental para la evaluación de seguridad a largo plazo.

Gran parte del conocimiento de los procesos y comportamiento de un sistema de almacenamiento puede obtenerse de las observaciones de campo y experimentación en laboratorios, mediante la simulación de los procesos previsibles y modelización de sus resultados. Esta metodología implica el planteamiento de ciertas hipótesis, que cuando se consideran los largos periodos de tiempo implicados, conlleva cierto grado de incertidumbres asociadas.

Los estudios de análogos naturales pueden aportar evidencias del comportamiento a largo plazo de materiales similares a los componentes de las barreras de ingeniería, así como de los diferentes procesos en medios geológicos que pueden producirse en los sis-

temas de almacenamiento geológico profundo. En consecuencia, el estudio de análogos naturales está reconocido en el ámbito internacional como una base importante para la comprensión y explicación del comportamiento de los sistemas de almacenamiento geológico profundo y un método complementario para la evaluación de la seguridad y el aumento de confianza en la misma.

Durante las últimas décadas se han llevado a cabo extensos programas de investigación de un amplio abanico de análogos naturales, representativos de diferentes materiales y procesos, que cubren gran parte de los aspectos significativos a considerar en la evaluación de seguridad de un sistema de almacenamiento. Los resultados de dichas investigaciones, desarrolladas en gran parte dentro del Programa Marco de la UE y otros organismos internacionales, han sido objeto de diferentes evaluaciones.

Este proyecto se plantea como continuación del estudio preliminar realizado recientemente en el CSN para identificar el papel de los análogos naturales en la evaluación de seguridad del AGP. Su objetivo es la profundización en el conocimiento de los análogos existentes, en los programas de investigación llevados a cabo en ellos y en la aplicación de los resultados al entendimiento y desarrollo de los diferentes componentes de la evaluación de seguridad de un sistema de

AGP (procesos, comportamiento a largo plazo, modelización, validación, etc.).

### *Proyecto Modelización*

La evaluación de seguridad de un sistema de almacenamiento geológico de residuos de alta actividad, además de una sólida comprensión de las propiedades físicas y químicas, así como de los procesos relevantes de los componentes del sistema, requiere el uso de procesos de modelización que representen adecuadamente el comportamiento y evolución futura del sistema.

Los desarrollos en este ámbito, desde el inicio de la década de los ochenta, han dado lugar a un gran número de modelos conceptuales y programas de cálculo de diferentes niveles de detalle y complejidad para la descripción y entendimiento de procesos específicos, individuales o acoplados, del comportamiento de los subsistemas o componentes del sistema de almacenamiento y del comportamiento integrado del mismo.

Como resultado de los trabajos de recolección y análisis de modelos de cálculo aplicables a la evaluación de seguridad, efectuados por organismos internacionales e instituciones de algunos países, se han generado diversos catálogos y bases de datos, elaboradas con diferentes criterios y alcance, algunos de los cuales han sido revisados y actualizados periódicamente.

Los desarrollos realizados en los últimos años en el ámbito de la modelización han estado dirigidos, fundamentalmente, a la verificación y validación de los modelos que han sido realizados mediante ejercicios de intercomparación y a través de la comparación de sus resultados con observaciones de campo, medidas experimentales y estudios de análogos naturales. La mayor parte de estos ejercicios se han llevado a cabo como proyectos de cooperación internacional en el marco de la Comisión Europea y la NEA, principalmente.

Al igual que la evaluación de la seguridad, la modelización y validación de modelos es un proceso iterativo desde las primeras fases de desarrollo de un sistema de AGP y durante su licenciamiento.

La asimilación del estado actual de la modelización es de gran interés para el CSN, a fin de afrontar las primeras fases de la evaluación de seguridad de acuerdo con el programa español para el desarrollo del AGP.

El objetivo de este proyecto es la obtención de una información actualizada sobre el nivel de aplicabilidad y representatividad de los modelos existentes en cada área de la evaluación de seguridad (procesos, subsistemas, sistema de almacenamiento en su conjunto).

El alcance del estudio a realizar para cada área de la modelización comprenderá la identificación de los modelos y el proceso, componente o sistema modelizado, las características de los modelos, los casos prácticos de aplicación a las evaluaciones de seguridad realizadas, los métodos de verificación y validación utilizados para refrendar sus resultados y en su caso los ejercicios de comparación, evaluación o "peer review" a que han sido sometidos, con indicación de las lecciones aprendidas y las conclusiones en cuanto a la aplicabilidad y representatividad de cada uno.

#### *Proyecto Intercomparación de Ejercicios de Seguridad realizados*

En los últimos años, agencias de residuos y organismos reguladores de varios países han desarrollado evaluaciones integradas del comportamiento y evaluaciones integradas de la seguridad de los sistemas de almacenamiento geológico profundo considerados en cada caso. Los objetivos y alcance de dichos ejercicios de seguridad son diferentes de acuerdo con el estado de desarrollo de los respectivos programas y de los procesos de toma de decisiones en cada país. Estos ejercicios de seguridad han suministrado una experiencia valiosa para posteriores desarrollos y han suscitado el interés de algunas agencias, organismos reguladores y organismos internacionales para realizar análisis intercomparativos con diferentes orientacio-

nes, objetivos y alcance, en función de sus competencias y necesidades o desarrollos futuros.

El interés del CSN en el desarrollo de un proyecto propio de intercomparación de los estudios realizados hasta la fecha, es la adquisición de una visión amplia y sólida de las bases y estado de la cuestión de los mismos, su asimilación de los aspectos claves y el desarrollo de capacidad propia para la realización de las evaluaciones de seguridad que sean necesarias de acuerdo con el programa español para el desarrollo del AGP.

Los objetivos de este proyecto de intercomparación son el estudio de los fundamentos técnicos y reguladores de cada uno de los ejercicios de seguridad y el análisis de tratamiento de los aspectos fundamentales de la evaluación de seguridad en cada caso, así como las conclusiones y lecciones aprendidas, con la identificación de los aspectos de interés para su aplicación al caso español.

El análisis a realizar incluirá los aspectos siguientes: objetivo y alcance del desarrollo, marco regulador, estructura y contenido general, características del sistema de almacenamiento considerado (residuos, cápsula de almacenamiento, barreras de ingeniería, características de la formación geológica), criterios y requisitos de seguridad aplicados, metodología de evaluación (desarrollo de

escenarios, modelización, tratamiento de incertidumbres etc...) y la consideración de aspectos específicos (criticidad, salvaguardias, biosfera, escenarios de intrusión humana) y métodos complementarios de evaluación de seguridad (análogos naturales, otros indicadores de seguridad etc.), así como el análisis de los resultados y conclusiones de cada uno de los ejercicios de seguridad.

El desarrollo de este proyecto contará con una participación mayoritaria del CSN, si bien se considerará la colaboración de otras instituciones españolas para el análisis de aspectos concretos. La duración del proyecto se prevé que sea de 3 años.

#### *Proyecto Aplicación del Juicio de Expertos*

El desarrollo y evaluación de la seguridad de un sistema de almacenamiento geológico profundo (AGP) para residuos de alta actividad es un proceso iterativo de realimentación recíproca, también denominado de "etapa-por-etapa", durante el cual pueden ser tomadas decisiones intermedias sobre la base de los conocimientos científicos, técnicos y metodológicos apropiados a cada una de las fases.

La identificación de los datos necesarios en cada fase, así como la interpretación técnica y evaluación de la información disponible en cuanto al conocimiento, comportamiento del sistema, requerirá la aplicación del juicio

de expertos para discernir los aspectos relevantes en cada fase.

El papel de las evaluaciones genéricas de la seguridad correspondientes a las primeras fases del desarrollo de un sistema de AGP es fundamentalmente la identificación de las áreas que necesitan mejoras o posteriores desarrollos, tanto en lo referente a los programas de I+D, como a la adquisición de datos, conocimientos científicos, técnicos y metodológicos adicionales para avanzar en el proceso de manera consecuente.

Dada la importancia del uso del juicio de expertos en diferentes áreas y componentes de la evaluación de seguridad, el CSN está considerando desarrollar un proyecto sobre la aplicación del juicio de expertos a los programas para el desarrollo de sistemas de AGP desde el punto de vista de las funciones reguladoras a realizar.

El proyecto comprenderá la recolección de los trabajos existentes de aplicación del juicio de expertos a la evaluación de seguridad, la identificación de las áreas relevantes de aplicación y el desarrollo de una metodología apropiada para la aplicación del juicio de expertos.

El desarrollo del proyecto se prevé que sea realizado por organizaciones externas con suficiente experiencia en este ámbito y se

realimentará de los estudios paralelos que se lleven a cabo en organizaciones internacionales y en otros países, para lo que se prevé la participación del CSN en los comités y grupos de trabajo relativos a este tema y la posibilidad de extender o establecer acuerdos con otros organismos reguladores.

## 2. Protección Radiológica

Las tres líneas básicas de este campo de actividad son:

- Fundamentos biológicos de la Protección Radiológica.
- Protección Radiológica de los trabajadores.
- Protección Radiológica del público y el medio ambiente.

Los programas de investigación y desarrollo relacionados con la Protección Radiológica se orientan hacia tres grandes grupos.

- Programas que buscan ampliar el conocimiento en los aspectos básicos de la Protección Radiológica: los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos, en particular, a nivel molecular, celular y sistémico (tanto somático como genético) y a nivel de poblaciones.
- Programas que se orientan a profundizar en aspectos más detallados; que buscan el desarrollo de técnicas o metodologías de aplicación más inmediata, para una mejor gestión del Sistema de Protección Radiológica Vigente en todo el mundo, en su aplicación a los trabajadores profesionalmente expuestos.
- Programas que se orientan a la protección radiológica del público y del medio ambiente.

En el primer grupo, se encuentran los programas sobre Dosimetría Biológica, Radio-

biología y Estudios de Epidemiología, con diferentes aproximaciones al problema, pero con el objetivo común de proporcionar la más sólida base cognoscitiva posible de los efectos de las radiaciones sobre los seres vivos, y entre los cuales todavía se identifican algunos aspectos que necesitan mayor comprensión.

En el segundo grupo, se encuentran aquellos programas que desarrollan aplicaciones específicas, como es el caso de la exposición ocupacional en la radiología intervencionista, identificada como una práctica que puede ser difícil adaptar a las últimas recomendaciones de la ICRP, o los aspectos relativos a la dosimetría de los trabajadores expuestos.

En el tercer grupo se encajan aquellos proyectos que llevan a cabo estudios sobre las consecuencias de accidentes que liberan material radiactivo de modo incontrolado o de los vertidos controlados de efluentes, lo que en ambos casos supone la dispersión de isótopos radiactivos en la biosfera. El desarrollo de nuevos criterios y técnicas para la gestión de emergencias también se encuadra en este grupo. Finalmente aquellos procesos que profundizan en el conocimiento del funcionamiento de los procesos naturales en relación con el transporte de radionucleidos.

Se presentan a continuación, con un desarrollo mayor o menor, en función del estado de

gestión de cada proyecto, aquellas actividades que el CSN encuadra en cada caso, identificando las organizaciones que colaboran o pueden colaborar en las mismas.

## 2.1. Fundamentos biológicos de la Protección Radiológica

Principales áreas de investigación:

- Efectos biológicos de las Radiaciones Ionizantes.
- Epidemiología de las radiaciones ionizantes.

### 2.1.1. Efectos biológicos de las Radiaciones Ionizantes

La investigación de los efectos de las radiaciones ionizantes hace referencia a los estudios que se llevan a cabo en los seres vivos, el hombre en particular, y en especial sobre el ADN de los núcleos celulares. El objetivo final de esta investigación es el estudio de la oncogénesis radioinducida.

Este programa comprende dos áreas bien diferenciadas: la radiobiología y la dosimetría biológica.

#### A) Radiobiología

Aunque las radiaciones pueden originar numerosos cambios en la célula, cuando se considera la oncogénesis (principal efecto

estocástico) el blanco más probable es el ADN.

Numerosos estudios muestran que la mayoría de los tumores son monoclonales, es decir, se derivan de una primera y única célula transformada.

Las células contienen toda una batería de mecanismos llamados de “reparación” que como su nombre indica reparan estos errores que se producen continuamente en todas las células en condiciones normales. Si la reparación es completa no se producirá daño alguno. No obstante, no todo el ADN codifica proteínas, de forma que el daño en el ADN puede tener consecuencias si afecta a zonas que codifican proteínas pero puede no tener ninguna significación si afecta a una zona no codificante.

Pueden existir variaciones interpersonales en la batería de enzimas reparadoras lo cual explicaría, al menos en parte, las diferentes susceptibilidades personales a la radiación (y a otros agentes) existiendo actualmente un gran interés en este tema.

Otro factor que influye en los efectos de las radiaciones es que aunque todas las células del cuerpo contienen la misma dotación genética, cada población celular tiene “activados” distintos tipos de genes dependiendo de su función. Este hecho de las diferencias

en la activación de genes en los distintos tejidos es crucial para el desarrollo normal de los distintos tipos de órganos cada uno con funciones a su vez diferentes. Un posible mecanismo de la activación e inactivación genética puede ocurrir a través de procesos químicos secundarios. Estos procesos pueden estar influenciados por una serie de componentes como pueden ser las hormonas. Investigaciones en este sentido pueden conducir a explicar porqué un cierto evento causado por la radiación sobre el ADN en diferentes tipos de células puede tener diferentes efectos.

Actualmente existe un gran interés en el estudio de la caracterización de determinados puntos en los cromosomas llamados "fragile sites" los cuales se piensa que son zonas con menor resistencia a las roturas. Estas zonas cromosómicas han sido demostradas para diferentes tipos de compuestos químicos aunque no está todavía claro si estos mismos puntos son dañados por las radiaciones ionizantes de una manera preferente.

La frecuencia relativa de cada tipo de lesión varía según el tipo de radiación de manera que con radiaciones de baja transferencia lineal de energía (LET) predominan las lesiones de bases y roturas simples mientras que con radiación de alta LET predominan las roturas dobles.

Dadas las incertidumbres existentes sobre la pendiente de las curvas dosis respuesta a bajas dosis, el paradigma para la estimación de riesgos a muy bajas dosis, donde no es posible obtener datos, ha sido extrapolar los resultados obtenidos para dosis altas. Este procedimiento ha conducido a la existencia de algunas controversias sobre si:

- la extrapolación debería ser lineal, lo cual está basado en que la dosis aumenta de forma lineal (por definición).
- si existe o no un umbral, que explique los fenómenos biológicos a nivel molecular o,
- que sea supralineal.

La respuesta adaptativa u hormesis consiste en la capacidad celular de responder de forma resistente a los efectos de dosis muy bajas de radiación (<20 mGy), de tal manera que disminuye el daño radioinducido. Se desconocen los mecanismos exactos por los que se produce dicha respuesta, pero el hecho cierto es que ocurre con rangos de dosis muy pequeños, es dosis-dependiente y depende de la constitución genética del individuo.

Se han propuesto, entre otros, dos modelos o mecanismos de actuación que no tienen que ser excluyentes entre sí, ni con otros posibles. Estos dos son :

- Incremento de los mecanismos de reparación del ADN propios de la célula.
- Apoptosis o muerte celular programada. Se postula que se produciría en las células

más radiosensibles antes de una segunda irradiación.

Estos dos modelos han sido descritos y observados a nivel celular. Apenas existen estudios individuales o poblacionales.

Actualmente los esfuerzos se dirigen en el sentido de dilucidar cuáles son los mecanismos exactos que producen este fenómeno.

Se puede resumir lo que se conoce en:

- Las radiaciones ionizantes, al nivel de exposiciones que interesan a la Protección Radiológica, se puede considerar como un carcinógeno débil.
  - Un cáncer individualizado no puede asignarse específicamente a una exposición dada.
  - Los diferentes órganos y tejidos presentan una gran variedad de su sensibilidad para iniciar un cáncer radioinducido.
  - Factores ambientales e individuales contribuyen al riesgo de cánceres a un nivel de exposición dada.
  - Mientras hay una firme evidencia de cánceres radioinducidos para exposiciones agudas (un exceso de 200 mGy), no hay tales evidencias (ni hay consenso científico) para las exposiciones más bajas y, ciertamente, para menos de 50 mGy.
  - Aunque se dan mecanismos de reparación, pueden ocurrir errores en tal reparación o daño residual no reparado.
- Mientras a nivel molecular o celular los efectos de la exposición se relacionan linealmente con la dosis, para órganos y tejidos de mucha más complejidad al producir procesos notablemente no-lineales.

A su vez, se puede resumir lo que no se conoce en:

- El origen preciso de iniciación de un proceso cancerígeno y cuáles son los factores que modifican, en uno u otro modo, tal proceso.
- No se conoce qué lesiones críticas, a nivel del ADN, son responsables de iniciar un cáncer. Tampoco se conoce cuántas células son necesarias para producir un cáncer en un ser vivo complejo.
- No se conoce porqué los órganos y tejidos presentan tal variedad de radiosensibilidad, no cómo puede producirse un cáncer radioinducido a partir de la incidencia espontánea de cánceres.
- No se entiende la influencia de los procesos de reparación a dosis bajas y tasa de dosis bajas.
- Se mantienen todavía las incertidumbres estadísticas sobre la forma de las relaciones efectos-dosis en relación con los tumores sólidos para exposiciones a dosis bajas. La cuestión de si hay linealidad por debajo de 100-200 mSv no se puede resolver hoy día a partir de los datos radiológicos epidemiológicos.

## Previsión de actividades

Las acciones previstas en esta área de actividad son las siguientes:

- Mecanismos de control celular:
  - Modelos experimentales de carcinogénesis molecular.
  - Ciclo celular.
- Corrección del daño:
  - Mecanismos de reparación del ADN
  - Terapia génica.
  - Alternativas para la corrección de lesiones hematopoyéticas.
- Análisis de riesgos:
  - Carcinogénesis ambiental.
  - Valoración del riesgo de inducción de anomalías hematológicas.
- Variabilidad interindividual a la radiosensibilidad.
- Respuesta adaptativa.

A continuación se concretan las acciones ya en curso para desarrollar las actividades indicadas.

## Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Mecanismos Carcinogénicos
  - Reparación
- Acuerdos:
  - CSN - CIEMAT
- Tareas Adicionales

## *Proyecto Mecanismos Carcinogénicos*

El Proyecto estudia los mecanismos carcinogénicos implicados en el desarrollo de anomalías hematológicas a fin de obtener resultados cualitativos y cuantitativos que sobre los efectos biológicos de naturaleza estocástica derivados de la exposición a dosis bajas de radiaciones ionizantes, información de interés para el CSN puesto que afecta a las asunciones hechas en la estimación del riesgo carcinogénico para la población, con la implicación que ello tendría en Protección Radiológica

El objetivo principal es la caracterización de los eventos secuenciales que conducen a la aparición de anomalías hematológicas irreversibles como consecuencia de la exposición a dosis bajas y medias/altas de radiaciones ionizantes así como su modelización mecanicista.

Los estudios necesarios para efectuar dicha caracterización se llevan a cabo mediante un modelo experimental de ratones genéticamente manipulados, deficientes en el gen supresor de tumores p53, que poseen una elevada sensibilidad a desarrollar cáncer radioinducido; habiéndose observado un aumento en la frecuencia de aparición de linfomas y una reducción significativa en el periodo de latencia. Estos ratones desarrollan linfomas en aproximadamente 3-4

meses sin haber sido expuestos a agresores externos. Por lo demás dichos ratones tienen un desarrollo totalmente normal.

El interés del CSN en el proyecto radica en el hecho de que el conocimiento de los mecanismos de oncogénesis de las radiaciones y la caracterización de los eventos secuenciales asociados a este proceso, constituyen, en el momento actual, la opción adecuada para contribuir a la mejora de los criterios de protección radiológica en cuanto al riesgo carcinogénico asociado a la exposición a dosis bajas de radiaciones ionizantes.

#### **Proyecto Reparación**

La radiación ionizante da lugar a lesiones en el ADN. El CSN tiene interés en el conocimiento de los mecanismos de reparación de las lesiones producidas a dosis bajas de radiación puesto que pueden aportar resultados de interés en relación con las incertidumbres asociadas al actual desconocimiento de la eficacia relativa con la que actúan estos mecanismos a bajas y altas dosis respectivamente.

El Proyecto que está llevando a cabo el CIEMAT estudia la implicación de los mecanismos de reparación y mutagénesis en la respuesta celular a bajas dosis de radiación y estudiar la viabilidad de sistemas experimentales *in vitro* para el estudio de incertidumbres asociadas a la extrapolación a dichas dosis.

Para abordar estas cuestiones se hace uso de animales (ratones transgénicos) que permiten determinar la frecuencia de mutaciones inducidas como consecuencia de una exposición a radiación en un gen marcador incorporado en el genoma del animal. En paralelo se realiza un análisis de expresión génica, es decir, de los genes que se están activando o expresando en cada momento del estudio, este tipo de análisis permite establecer la relación entre la expresión de genes de reparación y la inducción de mutaciones a distintas dosis de radiación. Simultáneamente, la posibilidad de realizar análisis de mutagénesis tanto "in vivo" como "in vitro" permite obtener conclusiones acerca de la validez de estos modelos para extrapolar los resultados obtenidos de una a otra situación.

El Proyecto se ha presentado, en conjunto con otros cuatro laboratorios europeos, al programa Biomed 2 del IV Programa Marco de la Unión Europea. El título de esta propuesta es *DNA Repair Syndromes and their Relationship to Cancer Predisposition* cuyo objetivo consiste fundamentalmente en profundizar en el papel de los mecanismos de reparación en cuanto a la predisposición a desarrollar cáncer por exposición a radiaciones, para lo cual se propone la utilización de modelos animales representativos de enfermedades humanas causadas por deficiencias en genes de reparación del ADN.

## B) Dosimetría biológica

La dosimetría biológica trata de medir la respuesta de un organismo a las radiaciones ionizantes utilizando el propio organismo como indicador de lesión. Tiene su principal aplicación en la investigación de accidentes con radiaciones ionizantes, ya que en estos casos es necesario saber la dosis absorbida por las personas expuestas para conocer su pronóstico y tratamiento. Aunque en muchos accidentes es posible medir la dosis absorbida por métodos físicos (dosímetros personales, reconstrucción de las características del accidente y contadores de radiactividad corporal) es muy importante contar con una estimación de dosis independiente mediante un método biológico que ha demostrado ser muy útil, aunque no está exento de un cierto número de incertidumbres.

La dosimetría biológica permite cuantificar las dosis a través de efectos biológicos ocasionados por radioexposiciones, bien de tipo bioquímico, en plasma y orina; inmunológico; físico o celular. Este último procedimiento es el que reúne más requisitos para su utilización como dosímetro biológico por medio del estudio de las aberraciones cromosómicas presentes en los linfocitos de sangre periférica.

De las distintas aberraciones cromosómicas fueron los cromosomas dicéntricos los que se

consideraron más adecuados para la obtención de curvas dosis-efecto, tanto por su fácil identificación como por el bajo nivel de fondo en la población. Por ello, el CSN desarrolló un Programa de Establecimiento de Laboratorios de Dosimetría Biológica en España por el que, mediante acuerdos específicos, ha venido garantizando su apoyo a centros e instituciones cuyos trabajos fundamentales ayudan a la elaboración de dichas curvas para distintos tipos de radiación.

La inestabilidad de los cromosomas dicéntricos no hace posible la medida de dosis crónicas o agudas sufridas hace años. Actualmente ha surgido una nueva técnica, denominada *Fluorescence In Situ Hybridization* (FISH), que elude el inconveniente señalado al permitir realizar cuantificaciones adecuadas de translocaciones, por tratarse de aberraciones estables, es decir, persistentes tras sucesivas divisiones celulares.

### Previsión de actividades

Las actividades previstas para el próximo quinquenio en este área de la protección radiológica se concretan en el apoyo de:

- Laboratorios establecidos en España para el desarrollo de la dosimetría biológica.
- Desarrollo de técnicas de dosimetría biológica e intercomparación de resultados

entre laboratorios nacionales y extranjeros.

- Validación de las técnicas de dosimetría biológica y desarrollo de aplicaciones.

Seguidamente se refieren las acciones consideradas para satisfacer las actividades de apoyo señaladas.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Inter-laboratory Comparison on Stable Chromosome Aberrations Scoring by FISH Technique.
  - Citogenética Molecular
- Acuerdos:
  - Centro Oncológico de Galicia "José Antonio Quiroga y Piñeiro".
  - Universidad Autónoma de Barcelona.
  - Hospital General Universitario Gregorio Marañón.
- Tareas Adicionales

#### *Proyecto Inter-Laboratory comparison on stable chromosome aberrations scoring by fish technique*

El desarrollo y la estandarización de la técnica FISH para el estudio de efectos biológicos radioinducidos son considerados en la actualidad de máximo interés por la Unión Europea, ya que supondrán un gran avance en la comprensión de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre las células; puesto

que permite la identificación rápida de aberraciones cromosómicas estables y su clasificación, es considerada la técnica adecuada para la realización de numerosos tipos de estudios, por ejemplo análisis retrospectivos en individuos profesional o accidentalmente irradiados.

Con el objetivo de lograr la normalización de la técnica FISH, por lo que se refiere a metodología y uso, varios laboratorios europeos han decidido participar en este Proyecto auspiciado por la UE dentro del ámbito de su IV Programa Marco en materia de investigación y enseñanza. El Hospital General Universitario Gregorio Marañón de Madrid ha sido invitado a integrarse en el grupo de laboratorios, contando con el apoyo del Consejo de Seguridad Nuclear.

#### *Proyecto Técnica de Hibridación in situ con fluorescencia*

En el contexto general del proyecto anterior, el Hospital General Universitario Gregorio Marañón va a poner a punto la técnica de hibridación in situ para el estudio de las alteraciones cromosómicas estables, elaborando mediante esta técnica las correspondientes curvas de calibración para rayos X y gamma.

Adicionalmente y con la técnica desarrollada está prevista la colaboración con el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones, Departamento de Radiobio-

logía de Cuba, para el estudio citogenético de niños procedentes de Chernobyl.

La técnica que se va a desarrollar consiste básicamente en hibridar el ADN de una muestra seleccionada con sondas de ADN marcadas. Mediante la técnica se observan translocaciones que son anomalías derivadas de dos roturas cada una de ellas de un cromosoma diferente. Estas translocaciones persisten en las sucesivas divisiones celulares por lo que se denominan estables. En consecuencia, este tipo de anomalías puede proporcionar una información valiosa acerca de la dosis recibida en el pasado o acumulada como consecuencia de exposición crónica.

#### *Proyecto Citogenética Molecular*

El Proyecto que está siendo llevado a cabo por el Centro Oncológico de Galicia José Antonio Quiroga y Piñeiro, tiene por objeto la aplicación de las técnicas FISH a cuestiones actuales de la radiobiología; en concreto este centro se ha planteado el estudio de la influencia de determinadas secuencias del ADN en el daño radioinducido.

Algunos estudios recientes sugieren que ciertas secuencias del ADN podrían promover una tendencia a los reordenamientos cromosómicos tras la acción de agentes mutagénicos. Las secuencias elegidas son: teloméricas intersticiales y el cromosoma X humano.

Se está realizando también un análisis de la evolución del daño originado por radiación de alta LET (partículas alfa procedentes de plutonio 239). Por último este estudio pretende además analizar el posible efecto adaptativo a la radiación de células fetales.

La mayor parte de estos estudios, practicados en humanos, lo han sido sobre células sanguíneas de individuos adultos. No se ha realizado ningún estudio sobre células fetales. Es bien conocido que la repercusión de la acción de los mutágenos sobre el individuo es mucho más acusada en estas fases precoces del desarrollo. De aquí el gran interés de trabajar con material fetal.

El proyecto pretende avanzar en el estudio de los efectos producidos por la radiación a nivel citogenético utilizando las técnicas puestas al alcance por la genética molecular y en las líneas de trabajo propuestas por organismos internacionales relacionados con la Protección Radiológica.

Para ello se va a comparar la magnitud de la posible respuesta adaptativa presente en linfocitos de adultos y en células fetales de varios individuos; analizar la radiosensibilidad de estas células en función de su envejecimiento y estudiar las posibles modificaciones en la magnitud de la hipotética adaptación en función del enve-

jecimiento progresivo de las células fetales en varios individuos.

Gran parte del trabajo del proyecto se lleva a cabo en estrecha colaboración con el NRPB.

#### ***Proyecto Detección de Anomalías Cromosómicas mediante Técnicas de Hibridación in situ***

El proyecto que está siendo desarrollado por la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) tiene como objetivos principales, poner a punto la técnica FISH, determinar una curva dosis-efecto mediante la misma y realizar, como aplicación, un estudio en personal ocupacionalmente expuesto a radiaciones ionizantes. Todo ello a fin de continuar estudios sobre adaptación celular radioinducida.

El laboratorio dispone en la actualidad de la curva de calibración para radiación gamma, elaborada con la colaboración de este Organismo, por lo que mediante el presente proyecto se van a ampliar las capacidades del laboratorio incluyendo la calibración para rayos X.

Adicionalmente, para el establecimiento de curvas dosis-efecto es interesante efectuar una valoración previa de la sensibilidad de los diferentes cromosomas, a fin de escoger la combinación de sondas cromosómicas más informativa.

Dado que se han descrito con otras técnicas diferencias de radiosensibilidad entre cromosomas, se pretende determinar mediante la técnica de hibridación in situ la magnitud de dichas diferencias.

Efectivamente, estudios realizados tanto con técnicas de bandeado cromosómico como de hibridación in situ indican que hay determinados cromosomas y regiones cromosómicas especialmente sensibles al efecto de las radiaciones. Tales diferencias de sensibilidad podrían tener su origen en los diferentes tipos de secuencias que se pueden encontrar en el ADN humano y la estructura que adquieren los cromosomas.

#### ***Proyecto Estudio Aneugénico de las Radiaciones Ionizantes***

Los objetivos del proyecto, que será llevado a cabo por el Departamento de Biología Celular y Fisiología de la Facultad de Medicina, son :

- Desarrollar un nuevo sistema de ensayo para investigar la inducción de aneuploidías en espermatozoides humanos.
- Determinar la capacidad de las radiaciones ionizantes para producir alteraciones numéricas en los cromosomas de las células germinales masculinas.
- Estudiar el mecanismo de actuación caso de que se produzcan dichas alteraciones.

Se ha previsto desarrollar el nuevo sistema de ensayo mediante la combinación de técnicas de fecundación interespecífica con técnicas FISH, todo ello a fin de investigar la inducción de alteraciones de tipo numérico en la dotación genética de un individuo.

Por otra parte, si bien es conocida la capacidad de las radiaciones para producir alteraciones cromosómicas estructurales, se sabe muy poco de su capacidad para producir alteraciones de tipo numérico, las cuales pueden tener como consecuencia la aparición de graves síntomas en la descendencia.

#### Tareas adicionales

- Estudio de la sensibilidad citogenética a las radiaciones ionizantes.

Teóricamente, mediante análisis de las lesiones que, a partir de ciertas dosis de radiación aparecen en los cromosomas, podría determinarse la sensibilidad de pacientes a la radioterapia y, como consecuencia, adaptar determinados protocolos de tratamiento de localizaciones tumorales específicas en el paciente estudiado y reducir efectos secundarios.

- Variabilidad interindividual a la sensibilidad.

La respuesta a la radiación parece depender de las distintas sensibilidades interindividuales, al menos a nivel celular. Este hecho no está suficientemente estudia-

do y su impacto en radioterapia, entre otros campos, se prevé importante.

- Respuesta adaptativa.

Se ha demostrado que a nivel celular existe una cierta respuesta a la radiación de forma que con dosis muy bajas se consigue una mejor adaptación a dosis posteriores. Se han propuesto varias hipótesis para explicar este fenómeno, entre otros un aumento de las enzimas de reparación tras la primera dosis. Existen dudas razonables sobre la importancia de esta respuesta a nivel orgánico.

#### 2.1.2. Epidemiología de las Radiaciones Ionizantes

Pocos estudios epidemiológicos se han realizado en España, hasta la fecha, sobre poblaciones ocupacionalmente expuestas a radiaciones ionizantes. Sólo cabe señalar a este respecto el análisis de los efectos de la exposición a dosis bajas de radiaciones ionizantes sobre la salud de los trabajadores de la antigua Junta de Energía Nuclear (JEN), realizado por el CIEMAT. Entre las conclusiones alcanzadas se destaca que dicho trabajo epidemiológico, al que se ha dado relevancia en el medio laboral del país, tiene bajo significado estadístico debido a las características y pequeño tamaño de la población estudiada y a pormenores relacionados con los datos dosimétricos en los primeros años del período analizado. Para que

se puedan obtener resultados estadísticamente significativos de los efectos de las bajas dosis que ocurren en la exposición ocupacional, resulta necesaria la realización de estudios epidemiológicos en poblaciones de tamaño mucho mayor.

La Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM) señala en su IV Programa Marco sobre Investigación y Enseñanza que en el ámbito de la protección contra las radiaciones, la comprensión de los mecanismos biológicos relacionados con la exposición sigue siendo la clave para la mejor cuantificación del efecto de las dosis pequeñas, al tiempo que propicia la realización de un estudio epidemiológico internacional (Proyecto IARC). Por otra parte, la sociedad demanda de forma continua el estudio de las condiciones de la población en el entorno de las centrales nucleares

Se plantea la cuestión de conocer cuantitativamente el estado de salud de la población residente en el entorno de las instalaciones nucleares con una preocupación remota, no planteada específicamente de identificar una potencial influencia o riesgo con origen en el funcionamiento de estas instalaciones.

#### Previsión de actividades

Las actividades previstas durante los próximos cinco años en este área de actividad se

centran en las siguientes colaboraciones internacionales y nacionales:

- Estudios relativos a los trabajadores profesionalmente expuestos en el ámbito del ciclo del combustible nuclear.
- Estudios relativos a las poblaciones residentes en el entorno de instalaciones nucleares.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación
- Acuerdos:
  - Instituto de Salud Carlos III.
- Actividades de cooperación:
  - Proyecto IARC
- Tareas Adicionales

#### *Proyecto IARC*

Se trata de un estudio sobre el riesgo de contraer cáncer entre los trabajadores de la industria nuclear ocupacionalmente expuestos a radiaciones ionizantes. Sus principales objetivos consisten en evaluar de forma directa tal riesgo y en validar los actuales modelos de extrapolación propuestos por el *Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations* (BEIR) del National Research Council estadounidense y por el *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR), para la estimación del riesgo de cáncer por exposición continua a bajas dosis de radiación. Para detectar los efectos, sobre la

salud, de bajas dosis de radiaciones ionizantes se necesitan estudios con suficiente significado estadístico, lo cual se consigue estudiando poblaciones muy numerosas. De aquí se deriva la necesidad de realizar estudios que unan las cohortes de diferentes países, aunque añade dificultades prácticas en cuanto a la coordinación y homogeneidad de los datos.

El proyecto tiene carácter internacional realizándose bajo la dirección del Organismo Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC). El CSN está coordinando la participación española en el proyecto donde se incluyen datos de las centrales nucleares, ENRESA y ENUSA. Es de destacar la importante labor que está desarrollando el grupo de medicina y protección radiológica de UNESA en cuanto al soporte técnico necesario para la adecuación de los datos médicos y dosimétricos al protocolo de IARC.

#### Tareas adicionales

- Estudios socio-sanitario de la población residente en el entorno de las instalaciones nucleares.

El actual sistema de licenciamiento y seguimiento de estas instalaciones tiene toda la garantía para confirmar la ausencia de riesgos como consecuencia de su funcionamiento, pero la atención debida a

la mayor sensibilidad social sobre el tema lleva a plantearse este tipo de investigación, concibiéndose básicamente como un estudio sanitario que complementa desde este punto de vista las garantías que ofrecen las condiciones impuestas a la operación de las instalaciones nucleares.

## 2.2 Protección Radiológica de los trabajadores

Principales áreas de investigación:

- Protección Radiológica Ocupacional
- Dosimetría

### 2.2.1. Protección Radiológica Ocupacional

La Protección Radiológica Ocupacional tiene como objetivo establecer criterios, normas y métodos que sirvan para aplicar y garantizar el cumplimiento de los Principios Básicos de Limitación y de Optimización a los trabajadores profesionalmente expuestos, manteniendo una mejora continua en las condiciones de trabajo que garanticen que las dosis de exposición se mantengan en valores óptimos.

La investigación y desarrollo en esta especialidad se refiere, en primer lugar, a un colectivo cuya tarea, la radiología intervencionista, se lleva a cabo en unas condiciones que con frecuencia ponen a estos profesionales en valores de dosis muy próximos a los límites.

La radiología intervencionista es una técnica en la que la intervención médica sobre el paciente se hace bajo control radioscópico, lo que supone comúnmente riesgos de irradiación importantes para los profesionales que la practican, ya que deben permanecer junto al paciente mientras se están emitiendo rayos X, durante sustanciales periodos de tiempo. Un número relativamente grande de profesionales debe permanecer dentro de la sala, mientras se está produciendo la emisión de rayos X, por lo que el riesgo se extiende también a todos los presentes.

Pese a que esta rama de la medicina implica a un elevado número de especialistas, su nivel de riesgo no es bien conocido, debido a que los registros dosimétricos presentan importantes lagunas, al no ser utilizados de forma regular los dosímetros personales. Por otra parte, bastantes de los profesionales que utilizan esta técnica no son radiólogos (como, por ejemplo, los que realizan cateterismo cardíaco) y, debido a su desconocimiento, las medidas básicas de protección radiológica no son siempre seguidas. La radiología intervencionista más importante por su frecuencia e implicaciones en el riesgo radiológico es la vascular. Las intervenciones pueden ser diagnósticas o terapéuticas.

Por ser una de las prácticas médicas que representan mayor riesgo de exposición ocu-

pacional para los especialistas que la practican, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ha mostrado interés y preocupación por el tema, en sus últimas recomendaciones publicadas sobre protección ocupacional en exposiciones médicas (ICRP 57). De hecho, se está prestando especial atención a los riesgos ocupacionales en intervencionismo, en las discusiones de los grupos de trabajo de la ICRP y de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre protección radiológica en radiodiagnóstico.

Por otra parte, los resultados que periódicamente se obtienen en los controles de contaminación interna en las centrales nucleares españolas vienen mostrando que apenas existen casos de contaminación interna lo que, de alguna forma, puede ser un indicativo de que los programas de protección respiratoria que se aplican en el sector son efectivos.

A pesar de estos buenos resultados siempre ha existido una cierta preocupación en esta temática y, de hecho, hace unos años se llevó a cabo algún estudio en esta línea. Como consecuencia de la experiencia de funcionamiento existente parece oportuno retomar el tema a fin de poder valorar las prácticas que se siguen en la actualidad mediante el estudio de los equipos y sus condiciones de utilización.

#### Previsión de actividades

- Estudio de las condiciones radiológicas en diversos colectivos de trabajadores expuestos.
- Estudio de la efectividad de los programas de protección respiratoria.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Proyecto PRORI
- Acuerdos:
  - CSN-Universidad Complutense de Madrid
- Tareas Adicionales

#### *Proyecto PRORI*

Los riesgos de exposición ocupacional de la radiología intervencionista, junto al notable incremento paulatino de profesionales implicados, llevaron al CSN y a la Universidad Complutense de Madrid a establecer un acuerdo específico por el que la Cátedra de Física Médica del Departamento de Radiología de su Facultad de Medicina desarrolla un proyecto sobre Protección Radiológica Operacional en Radiología Intervencionista (PRORI), con el objetivo de evaluar el nivel de dosis recibida por los especialistas de esta disciplina en función del tipo y número de intervenciones, así como estimar las influencias de las diversas circunstancias concurrentes en el transcurso de las mismas.

El ámbito del Proyecto se extiende al establecimiento de criterios y protocolos relativos al uso de dosímetros y dispositivos de protección, así como a la formación de los distintos grupos de facultativos y personal auxiliar.

Dada la gran cantidad de variables implicadas en el Proyecto y la dispersión de los resultados obtenidos, se ha procedido a su ampliación a fin de identificar y analizar las causas de dispersión de resultados registrados en el anterior proyecto y ampliación de la base de datos de dosis ocupacionales recibidas por especialistas a cuerpo entero, en manos, en cristalino y en brazos en función del tipo y número de intervenciones que realicen.

Los resultados del proyecto permitirán la optimización desde el punto de vista de la protección radiológica en las salas de radiología intervencionista, dado que se estudian aquellos aspectos en los que puede incidirse para la reducción de las dosis, tanto al personal profesionalmente expuesto como al paciente.

#### Tareas adicionales

- Medida de dosis de referencia y en órganos críticos en pacientes y trabajadores expuestos a exploraciones de radiodiagnóstico.

Diversos países de nuestro entorno, así como organismos como la OMS y la ICRP están comprometidos en la consecución de programas de optimización en protección radiológica en el ámbito de las instalaciones médicas.

España viene participando en proyectos de la UE al objeto de identificar y evaluar los riesgos asociados a las prácticas médicas donde se utilizan radiaciones. El objetivo final supone elaborar protocolos que permitan la aplicación de las técnicas de radiodiagnóstico o radiología intervencionista con una mejora en la reducción de las dosis sin detrimento de las imágenes obtenidas ni del tratamiento del paciente. El Hospital General Gregorio Marañón ha presentado un proyecto para desarrollar los siguientes objetivos :

- Evaluar las dosis recibidas por los pacientes sometidos a exploraciones mediante rayos X, determinando las dosis de referencia en todas y cada uno de los distintos tipos de exploraciones que se realizan en el hospital, así como la evaluación de dosis en órganos críticos.
- Evaluar las dosis recibidas por los profesionales que en el desarrollo de sus funciones están sometidos a exposición.

Este trabajo permitirá la aplicación de las mejoras alcanzadas en los propios servicios

del hospital y en el resto de los hospitales de la Comunidad Autónoma de Madrid. El número de profesionales que podrían beneficiarse de la aplicación de los resultados se aproxima a los 1000.

### 2.2.2. Dosimetría

El sistema de protección radiológica y las magnitudes operacionales suministran una base consistente y coherente para la gestión y control del riesgo. Sin embargo la puesta en práctica de este sistema ha de tener en cuenta la disponibilidad de técnicas y procedimientos para la determinación de las magnitudes que representan la medida de la cantidad de energía transferida por las radiaciones ionizantes a los órganos y tejidos.

Todo ello requiere un proceso continuo de investigación que se enfoca en el desarrollo de instrumentos para la medida de la radiación, así como con el desarrollo de conceptos y magnitudes adecuadas para la gestión del riesgo en un rango amplio de exposiciones como consecuencia de la irradiación externa e interna.

La investigación en instrumentación refleja la necesidad de mejorar las técnicas debido a diferentes factores: la reducción de los límites de dosis, el aumento de los factores de calidad y, en consecuencia, de los correspondientes factores de ponderación de la

radiación, la necesidad de introducir procedimientos de optimización, así como la incorporación de las normas de protección radiológica a nuevas áreas profesionales hacen que se mantenga la búsqueda de instrumentos y técnicas de medida con mejores capacidades en cuanto a sensibilidad y respuesta.

En la actualidad el interés se centra fundamentalmente en la exposición a neutrones y campos mixtos, radiación de alta energía, como la que se produce en las cercanías de los aceleradores y en aviación civil, radiación débilmente penetrante y finalmente, en relación con la exposición procedente de radionuclidos incorporados al organismo.

Los métodos y procedimientos para la evaluación de las dosis como consecuencia de la incorporación de material radiactivo constituye un objetivo fundamental de investigación tanto básica como aplicada. El conocimiento de los datos correspondientes al metabolismo del material incorporado son consecuencia de procesos de investigación. Dichos datos sirven de base para el establecimiento de modelos metabólicos en los que basar el correspondiente cálculo de dosis.

La evaluación retrospectiva de exposición a radiaciones ionizantes como consecuencia de accidentes o exposiciones incontroladas ha

sufrido un interés creciente después del accidente de Chernobyl.

#### Previsión de actividades

- Desarrollo de técnicas para la reconstrucción de dosis retrospectiva o de accidente.
- Estudio de nuevos sistemas y metodología para la estimación de la dosis.
- Dosimetría de campos mixtos.
- Códigos de cálculo en estimaciones dosimétricas.
- Métodos y técnicas para la estimación individual de dosis neutrónicas.
- Dosimetría interna.

#### Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Dosimetría Retrospectiva DOSE
- Acuerdos:
  - CSN- CIEMAT
- Tareas Adicionales

#### *Proyecto Dosimetría retrospectiva DOSE*

Este proyecto se encuadra dentro de una de las tres líneas de investigación (modelización y evaluación, métodos luminiscentes y dosimetría con materiales humanos), que contempla un proyecto más amplio denominado *Dose Reconstruction*, que se está desarrollando actualmente dentro del IV Programa Marco de I + D de la UE. Este proyecto en el que participan un total de

dieciséis instituciones europeas, está coordinado por el GFS de Alemania.

El Grupo de Dosimetría de Radiaciones del CIEMAT, participa junto con las Universidades de Oxford y Durham (Reino Unido) y Helsinki (Finlandia), y el Laboratorio Nacional de Riso (Dinamarca), en la línea de métodos luminiscentes.

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de técnicas y métodos físicos de dosimetría retrospectiva, mediante la optimización de los métodos luminiscentes en minerales y el estudio de la incidencia de aquellos parámetros que pueden afectar a la fiabilidad de los datos dosimétricos.

Se trata de reproducir escenarios dosimétricos después de un accidente radiológico empleando para ello materiales naturales. Asimismo, permitirá consolidar un grupo con capacidad y experiencia en el desarrollo de técnicas y métodos físicos de dosimetría retrospectiva o de accidente.

Las técnicas de dosimetría retrospectiva, son un complemento de las técnicas convencionales e incluso en ocasiones son la mejor vía para caracterizar dosimétricamente una situación post-accidental, dada la distribución en el ambiente de los potenciales materiales dosimétricos.

La amplia variedad de materiales naturales, minerales (feldespatos y cuarzos), materiales de construcción (ladrillos y tejas), textiles (algodón) y materiales orgánicos como dientes, cabello y piel, confieren a esta técnica una gran utilidad y dada la estabilidad de la información que queda almacenada en algunos de los materiales indicados, permite que puedan evaluarse las dosis recibidas años después de producirse el accidente.

Este método, se está utilizando para la evaluación de las dosis recibidas por los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki y los habitantes del entorno de la central nuclear de Chernobyl.

#### Tareas adicionales

- Nuevas técnicas de dosimetría personal externa de tipo electrónico.

El desarrollo de sistemas de lectura directa de tipo electrónico con características tales que permiten la determinación de dosis en términos de dosis personal profunda y superficial, ha despertado enorme interés en el ámbito de la protección radiológica, puesto que tal determinación antes solo era posible con dosímetros de lectura indirecta. Por otra parte presentan ventajas asociadas tanto a los sistemas de lectura directa como indirecta, lo cual plantea su posible uti-

lización como sistemas de dosimetría oficial.

Tal consideración requiere la determinación de su respuesta real y la fiabilidad de los valores registrados, así como la determinación de los procesos de calibración.

Todo ello, implica la realización de diversos estudios, entre los que se encuentran la respuesta en función de energía y tipo de radiación, linealidad y umbrales de detección, que implican la disponibilidad de fuentes de radiación debidamente caracterizadas.

La Universidad Politécnica de Cataluña cuenta con el laboratorio del Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) acreditado como Laboratorio de Calibración por el Ministerio de Industria para las magnitudes de exposición, kerma y magnitudes derivadas en niveles de protección, para haces de radiación X (calidades ISO de espectro estrecho y radiación gamma (Co-60 y Cs-137), lo que le capacita para llevar a cabo los estudios apropiados.

### 2.3. Protección Radiológica del público y el medio ambiente

Principales áreas de investigación:

- Impacto Radiológico ambiental de la operación de las instalaciones nucleares.
- Consecuencias Radiológicas de los accidentes severos: gestión de emergencias y recuperación ambiental.
- Radiación natural.

#### 2.3.1. Impacto radiológico ambiental de la operación de las instalaciones nucleares

La operación normal de las instalaciones nucleares da lugar a la evacuación al medio ambiente de efluentes radiactivos líquidos y gaseosos, así como a la disposición fuera de la instalación de residuos sólidos.

La evaluación del impacto radiológico que origina esta situación ha llevado al desarrollo de métodos de cálculo y a programas experimentales para progresar en este conocimiento, de modo que los resultados obtenidos permitan una mejor vigilancia y control de la calidad radiológica del medio ambiente y una garantía de que la población no está expuesta a riesgos radiológicos innecesarios.

Por otra parte, hay una corriente de investigación de otros vectores del medio ambiente que necesitan de investigación por constituir las vías de acceso de los radionúclidos a la población. En consecuencia es necesario conocer el comportamiento de los radio-núclidos, especialmente los de vida larga y relevancia biológica, mediante la realización de estudios sobre los mecanismos que condicionan su migración, acumulación y transferencia en el medio ambiente.

## Previsión de actividades

En relación con este área, hay un conjunto de actividades programadas, algunas de ellas en curso, que son objeto de consideración por el CSN a fin de poder establecer con este Centro, y con otros interesados que sean competentes, las colaboraciones más adecuadas. Estas actividades son:

- Estudios encaminados a la caracterización del campo de radiación externa en un emplazamiento, identificando a los radionucleidos que lo originan y permitiendo simultáneamente la estimación de las dosis ambientales resultantes mediante algoritmos de cálculo.
- Estudios de transferencias de radionucleidos

## Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Proyecto Espectrometría Gamma in Situ
  - Hongos
- Acuerdos:
  - CSN- CIEMAT
  - CSN-Universidad de Extremadura-UCM
- Tareas Adicionales

### *Proyecto Espectrometría Gamma in situ*

El proyecto que está desarrollando el CIEMAT para aplicar la espectrometría gamma in situ a la dosimetría gamma ambiental de

radiación externa, se encuadra dentro de las actividades de I+D de la Unión Europea y específicamente dentro del proyecto titulado Measurement of Environmental Radiation Doses, en el ámbito del cual el CIEMAT está colaborando con grupos de investigación pertenecientes al Environmental Measurement Laboratory (EML) de los Estados Unidos y al Institute of Radiation Dosimetry (IRD) de la República Checa.

El proyecto tiene como objetivo final disponer de una técnica completa de espectrometría gamma in situ que considere la conversión de medidas espectrales en medidas dosimétricas. Es decir, se dispondrá, en campo, de un método operativo mediante el cual y a través de los resultados de los espectros de radiación gamma obtenidos, determinar los valores de dosis asociados, así como los isótopos que darían lugar a dichas dosis.

En resumen el proceso consiste en analizar los fotopicos detectados interpretándolos en términos de fluencia de fotones por intervalo de energía y mediante los correspondientes factores de transferencia de energía asociados a cada intervalo se obtendrían las dosis en un material de referencia, normalmente el tejido humano.

Este Proyecto de Investigación es de interés para el CSN pues posibilita el desarrollo en nuestro país de una nueva técnica que per-

mitirá obtener, a la vez, la concentración de actividad de diferentes isótopos gamma y la dosis externa originada por todos y cada uno de los isótopos detectados.

### *Proyecto estudio de la transferencia de radiactividad a los hongos. Interacciones y consecuencias*

La capacidad que poseen los talofitos (musgos líquenes y hongos) para ser utilizados como bioindicadores de diferentes elementos presentes en el medio ambiente, entre ellos los radiactivos, se ha constatado a través de diversos estudios realizados en varios países. En nuestro país, sin embargo, no se han realizado muchos trabajos de investigación sobre la transferencia de radionucleidos en el medio ambiente.

El Proyecto tiene por objeto cuantificar la transferencia de Cs y Sr. en diferentes tipos de hongos preferentemente comestibles, en condiciones de crecimiento controlado en laboratorio, estudiando la influencia relativa de los diferentes parámetros que condicionan su incorporación, como son la diferencia temporal entre el momento de la contaminación y la fructificación, las posibles interferencias existentes con otros cationes estables (Ca y K) y la influencia de la temperatura y la humedad relativa.

Todo ello, se basa en la realización de campañas de recolección de muestras en las

estaciones micológicas, a fin de identificar la diversidad, abundancia y periodo de fructificación de las especies que crecen en monte mediterráneo; cultivo en laboratorio, marcando con material radiactivo los hongos en sus diversas fases vegetativas y finalmente, realización de los oportunos análisis para determinar el contenido radiactivo de las muestras cultivadas.

El proyecto se realiza mediante colaboración entre la Universidad de Extremadura (Grupos de Ecología e Ingeniería Ambiental y de Radiactividad Ambiental) y la Universidad de Alcalá de Henares (Grupo de Biología Vegetal)

### Tareas adicionales

- Estudio de consumo de alimentos por diferentes grupos de edad de la población española.

La emisión de radionucleidos al medio ambiente puede dar lugar a su transferencia a través de las cadenas alimentarias, y por tanto, su incorporación al hombre. El cálculo de las dosis recibidas como consecuencia de la ingestión de dichos alimentos requiere conocer de la forma más precisa posible la actividad incorporada, lo que conlleva el conocimiento de los hábitos alimenticios de la población. A fin de sustituir los parámetros teóricos utilizados actualmente por valores realistas, es

necesaria la realización de estudios que permitan identificar dichos hábitos.

El CIEMAT, a través de la experiencia del Departamento de Nutrición de la Facultad de Farmacia de Madrid, tiene capacidad para llevar a cabo un Proyecto de Investigación, que permita obtener datos actuales acordes con la realidad nacional, el cual tiene una aplicación inmediata en las estimaciones de impacto radiológico, tanto en la verificación de los límites de vertido fijados a las instalaciones, como en la estimación realista de las dosis.

### **2.3.2. Consecuencias radiológicas de los accidentes severos: gestión de emergencias y recuperación ambiental**

Es preciso analizar los efectos radiológicos en el exterior de la instalación en caso de escape de una fracción importante del inventario de isótopos radiactivos presentes en el combustible y estudiar su dispersión en las zonas adyacentes, las medidas de emergencia a establecer para proteger a la población y las actividades previstas para la recuperación ambiental de los terrenos contaminados.

El análisis de las consecuencias radiológicas atribuibles a los accidentes severos comenzó con la propia energía nuclear; en primer lugar, de forma desagregada o determinista

y más recientemente dentro de la metodología probabilista. En el primer caso, los estudios realizados dieron lugar al desarrollo de varios códigos de cálculo que consideran, a partir de un término fuente proporcionado al código, los fenómenos físicos relevantes y estiman las consecuencias radiológicas, sanitarias y económicas de tales escapes, como consecuencia del accidente severo postulado. En el segundo caso, tanto el propio término fuente como las condiciones de dispersión y las propias consecuencias se estudian de forma integrada, considerando además el carácter aleatorio del propio término fuente, así como el de los parámetros de dispersión y climatológicos que definen las características del emplazamiento, y el propio comportamiento social de la población.

A pesar de los indudables progresos, se han iniciado diferentes proyectos internacionales analíticos con el objetivo de mejorar los procedimientos y reducir las incertidumbres asociadas con estos temas. Se está de hecho participando en trabajos que comprenden: definición de escenarios y evaluación de las contramedidas posibles en cada caso; construcción de bancos de datos de los distintos emplazamientos, identificación o desarrollo de técnicas de tratamiento y gestión de los residuos originados, sobre la base inicial de que se trata de cantidades muy grandes y no es posible una gestión convencional de tales residuos.

la intervención, por otra siendo responsable del desarrollo de la metodología de análisis y optimización de las estrategias de intervención.

El resultado del proyecto supondrá un avance en el tratamiento de las fases posteriores en los planes de actuación tras un accidente nuclear con consecuencias ambientales.

#### ***Proyecto Vulnerabilidad***

El proyecto pretende caracterizar la vulnerabilidad radiológica de los suelos españoles en caso de un accidente nuclear grave en relación con la vegetación natural y los cultivos.

El estudio se centra en los suelos agrícolas y seminaturales españoles, mediante la asignación de Índices de Vulnerabilidad representativos del impacto radiológico que se derivaría de una potencial contaminación accidental por Cs-134/137 y Sr.-90.

Este objetivo incluye, en el caso de suelos agrícolas, una valoración del modo en que las distintas prácticas agrícolas (abonos orgánicos y minerales y tipo de riego) pueden influir sobre la movilidad y disponibilidad de ambos contaminantes. La fase final del proyecto se dirige a la incorporación de los resultados obtenidos en un sistema informático georeferenciado y a la base de datos del código TEMAS.

En este proyecto participa además, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) a través del departamento de Biología Vegetal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) bajo acuerdo específico de colaboración con el CIEMAT.

El CSN está interesado en obtener una información peninsular específica capaz de ser utilizada por los códigos para la intervención tras accidente, RODOS y TEMAS, que están siendo desarrollados bajo patrocinio de la UE dentro del programa específico de seguridad de la fisión nuclear, correspondiente al IV Programa Marco de I + D de la UE. Todo ello supondrá disponer a nivel nacional de los criterios adecuados para enfrentar una situación de contaminación radiológica ambiental.

#### **2.3.3. Radiación natural**

El UNSCEAR, en su informe del año 1993, ya indicaba que la dosis efectiva media anual a nivel mundial, debida a la radiación natural, está estimada en 2,4 mSv, contribuyendo la inhalación del Rn-222 en un 50%.

La consideración de las concentraciones de radón existentes en el interior de las edificaciones como la principal fuente de radiación natural ha llevado a que las primeras recomendaciones surgidas sobre protección a la radiación natural hayan estado encaminadas

a limitar la exposición de la población a esta fuente de radiación recomendando el uso de niveles de acción para iniciar la intervención.

En España se tiene conocimiento del contenido de diferentes isótopos naturales en distintas vías de exposición al hombre, tanto directas como indirectas, a través de los resultados que se vienen obteniendo en los Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental. También hay que considerar la información existente sobre los niveles de radiación gamma obtenida a través de los PVRA, la red de estaciones automáticas del CSN y el Proyecto Marna.

Adicionalmente, el proyecto Radón ha suministrado un primer conocimiento de los niveles de Rn 222 en el interior de edificios y se han identificado puntos de altos valores que superan los recomendados por ICRP. Queda por realizar un estudio de la dosis recibida por la población, para, en su caso, establecer medidas de mitigación o remedio.

La UE ha revisado recientemente las normas básicas de Protección Radiológica, que han sido publicadas mediante la Directiva 96/29/Euratom. Entre las modificaciones más importantes se encuentran la extensión del ámbito de aplicación a actividades profesionales que impliquen una exposición a

fuentes naturales de radiación y que den lugar a un aumento significativo de la exposición de los trabajadores o miembros del público, que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Este hecho plantea la necesidad de llevar a cabo estudios que contribuyan a identificar tales actividades.

Finalmente, se contempla continuar con las tareas encaminadas a completar los mapas de radiación gamma natural en España.

#### Previsión de actividades

- Estudio de las condiciones radiológicas ambientales con origen en la radiación natural en lugares de trabajo convencional.
- Estudio de las dosis que recibe la población como base para el establecimiento de medidas de remedio en aquellas zonas o poblaciones donde se han identificado, o se identifique en un futuro, viviendas con concentraciones elevadas de radón.
- Desarrollo del mapa de radiación gamma natural de España.
- Desarrollo de sistemas de medida que permitan la caracterización ambiental de las viviendas y lugares de trabajo.

## Acciones consideradas

- Proyectos de Investigación:
  - Estudio radiológico de zonas, materiales de construcción como fuente de Radón y técnicas de mitigación
  - MARNA
- Acuerdos:
  - CSN - Universidad de Cantabria
  - CSN - ENUSA
- Tareas Adicionales

### *Proyecto Estudio radiológico de las zonas de los Arribes del Duero y la Sierra de Guadarrama y estudio de materiales de construcción como fuente de Radón y técnicas de mitigación*

Como consecuencia de los estudios realizados en el denominado Proyecto Radón, impulsado por el CSN para conocer las concentraciones de Rn-222 en el interior de edificios de nuestro país, principalmente viviendas, se detectaron algunas zonas que presentaban valores puntuales elevados. Por ello se planteó la necesidad de llevar a cabo un estudio más exhaustivo a fin de poder evaluar la dosis que como consecuencia de la radiación natural reciben las personas que habitan dichas zonas para poder compararla con los valores promedio nacionales así como con los recomendados por la UE para la iniciación de acciones de remedio.

El estudio mencionado está siendo llevado a cabo por la Universidad de Can-

tabria en la zona de los Arribes, Salamanca, y en la Sierra de Guadarrama, Madrid. Para ello se están efectuando medidas de:

- Concentración de radionúclidos naturales en suelos.
- Niveles de radiación en el interior y exterior de las casas.
- Concentración de radionúclidos naturales en las aguas de consumo.
- Niveles de radón en el interior de las viviendas.

Por otra parte y con el objetivo de conocer la incidencia de los materiales de construcción se está llevando a cabo la identificación, clasificación y medida del contenido radiactivo de las pizarras españolas, evaluando su contribución a la concentración de Radón en las viviendas.

Finalmente y dentro del estudio de las posibles medidas de remedio, se está procediendo a estudiar la efectividad de pinturas e impermeabilizantes en la reducción de los niveles de Radón en las viviendas.

### *Proyecto MARNA 3*

Como ya se ha indicado, se va a continuar la realización de mapas a diversas escalas a fin de conocer los niveles de radiación natural en España.

Desde el punto de vista de la protección radiológica los resultados del proyecto pue-

den constituir la base de partida para identificar las zonas de mayor fondo radiactivo natural. Asimismo pueden constituir una inestimable ayuda en el planteamiento de estudios complementarios, como por ejemplo identificación de zonas propensas a la posible existencia de niveles elevados de radón.

De este modo se pueden distribuir mejor los recursos destinados a tales estudios, al poder plantear directamente las áreas primordiales de interés, eliminando la necesidad de barridos previos.

#### Tareas adicionales

- Impacto radiológico del Radón y descendientes en recintos cerrados y en atmósfera libre.

Dentro del IV Programa Marco de I + D de la UE se está desarrollando el proyecto denominado RARAD (Risk assessment of exposure to Radón and thoron decay products), siendo en la actualidad el único proyecto europeo dedicado a los estudios básicos del radón en el IV Programa Marco, cuya finalidad es determinar el riesgo debido a la inhalación de radón y sus descendientes en un proyecto dividido en cinco líneas paralelas:

- Estudio de aerosoles.
- Modelización del sistema respiratorio.

- Estudios de irradiaciones controladas en humanos.
- Estudios de irradiaciones controladas en animales.
- Reconstrucción retrospectiva de la concentración de radón.

La Universidad Politécnica de Cataluña a través del grupo de estudios del radón del INTE forma parte del grupo de Estudios de Aerosoles liderado por la Universidad de Göttingen. Este grupo tiene como finalidad determinar las propiedades y comportamiento de los descendientes del Radón para caracterizar las condiciones ambientales de inhalación de las distintas regiones Europeas a fin de determinar los parámetros ambientales necesarios para la utilización del modelo dosimétrico y en los estudios de irradiación en humanos y animales.

- Contribución a la contaminación radiológica de la generación de energía en centrales térmicas de carbón.

Parte de la energía mundial se genera a partir de la combustión del carbón. Los elementos radiactivos contenidos en el mismo pasan al ambiente por diversos mecanismos: emisión a través de polvo de carbón y emisión a través de los productos de combustión.

El estudio del contenido de elementos radiactivos en muestras tanto de carbones como de cenizas y la correlación con otras características técnicas de los carbones

(volátiles, cenizas, poder calorífico, etc.) permitirá tener una indicación de la proporción de material en sólidos y en gases. Con ello podría realizarse una primera estimación del impacto radiológico derivado de esta forma de producción de energía.

La Universidad Politécnica de Madrid, a través de la ETSI de Minas está planteando el desarrollo de un proyecto de investigación encaminado al estudio del mencionado impacto.

- Estudio de la dosis de radiación natural recibida por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas.

La información que se dispone al respecto proviene de los resultados de los programas de vigilancia radiológica ambiental y adicionalmente de estudio realizados dentro del proyecto MARNA.

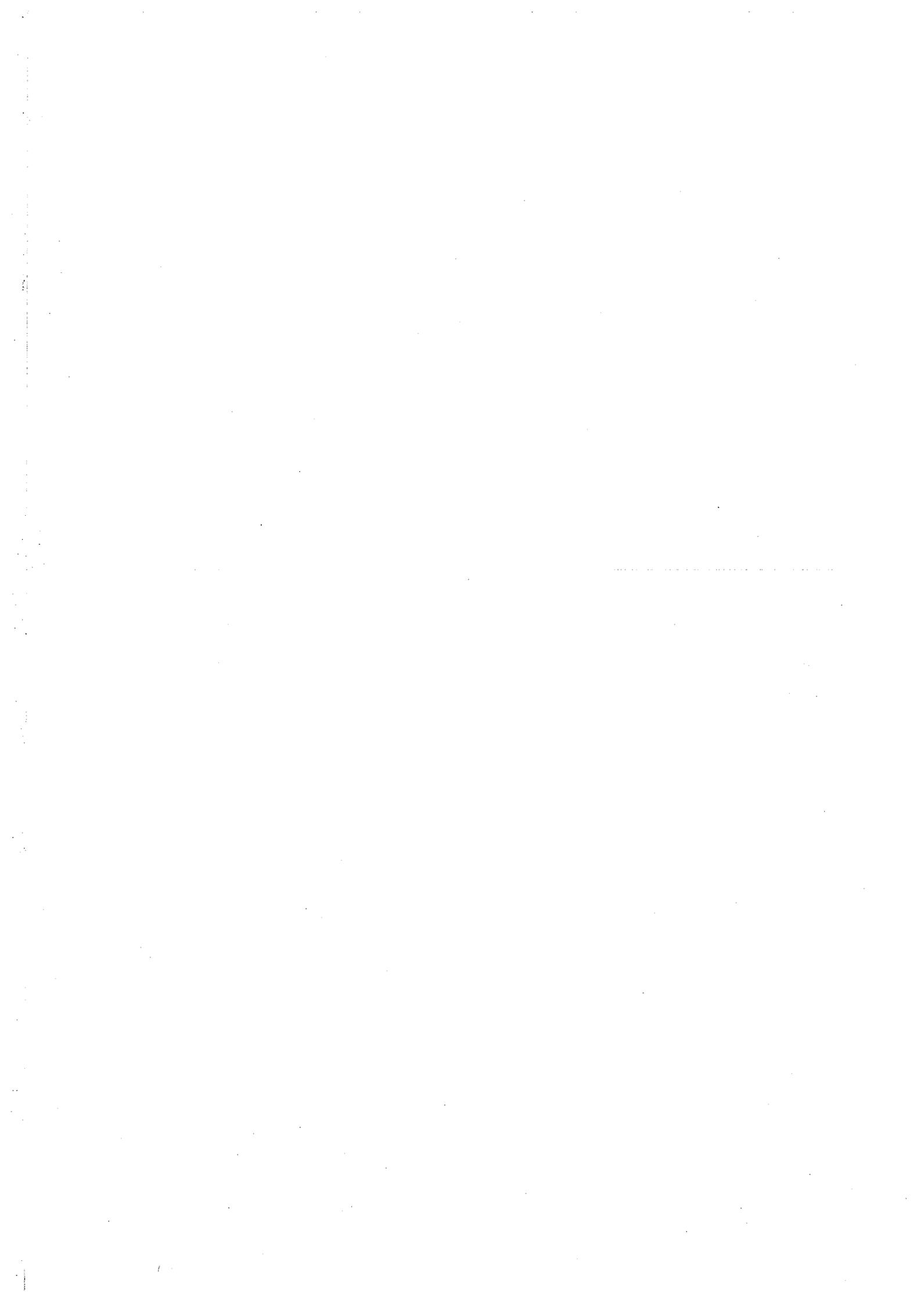
Dichas fuentes suministran una estimación general de las dosis en el exterior de las edificaciones pero no las dosis que se recibirían en el interior de las viviendas, donde generalmente las dosis son más elevadas debido a la contribución adicional de los materiales de construcción. El UNSCEAR en su publicación de 1993 indica que el efecto de dichos materiales puede aumentar la dosis en un 40-50%.

# Anexos



**1. Presupuesto para proyectos de investigación en 1997 y su distribución prevista por áreas temáticas en pesetas**

Emplazamientos	60.000.000
Termohidráulica y Neutrónica	20.500.000
Accidentes Severos	81.250.000
Análisis del Riesgo	37.000.000
Integridad de Componentes y Estructuras	17.250.000
Subtotal Seguridad Nuclear	216.000.000
Efectos de las Radiaciones Ionizantes	41.000.000
Protección Radiológica Ocupacional	5.000.000
Dosimetría	10.250.000
Impacto Radiológica Ambiental II.NN .	8.250.000
Consecuencias Radiológicas Accidentes Severos	17.000.000
Radiación Natural	2.500.000
Subtotal Protección Radiológica	84.000.000
TOTAL	300.000.000



## 2. Lista de Acrónimos

ADN:	Acido Desoxiribonucleico	CSNI:	Committee on the Safety of Nuclear Installations. (Comité para la Seguridad de las Instalaciones Nucleares).
AGP:	Almacén Geológico Profundo	CTN:	Cátedra de Tecnología Nuclear.
AMYS:	Asociación de Medicina y Seguridad en el Trabajo	DAÑOS:	Daño Sísmico.
APS:	Análisis Probabilista de Seguridad	DTN:	Agrupación Eléctrica para el Desarrollo Tecnológico Nuclear.
ASP:	Análisis de Secuencias de Precursores de Accidentes.	ECCS:	Emergency Core Cooling System. (Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo).
BEIR:	Biological Effects of Ionizing Radiation. (Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante).	EE.UU.:	Estados Unidos.
BWR:	Boiling Water Reactor. (Reactor de Agua en Ebullición).	ENRESA:	Empresa Nacional de Residuos, S.A.
CAMP:	Code Applications and Maintenance Program. (Programa de Aplicaciones y Mantenimiento de Códigos).	ENUSA:	Empresa Nacional del Uranio, S.A.
CAMS:	Computerized Accident Management System. (Sistema Computerizado de Gestión de Accidentes).	ESTELA:	Estrategia Tecnológica Energética de Largo Alcance.
CC.NN.:	Centrales Nucleares.	ETSII:	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
CEDEX:	Centro de Estudios y Experimentación del MOPTMA.	ETSIM:	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
CGR:	Cooling Gas Reactor (Reactor Refrigerado por Gas).	EURATOM:	Comunidad Europea de la Energía Atómica.
CIEMAT:	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.	FISHF	Fluorescence In Situ Hybridization. ( <i>Hibridación in Situ con Fluorescencia</i> ).
CSARP:	Cooperative Severe Accident Research Program. (Programa de Investigación Conjunta sobre Accidentes Severos).	FPT	Fision Products Test. (Prueba sobre Productos de Fisión).
CSN:	Consejo de Seguridad Nuclear.	HIDROBAP:	Hidrología en Medios de Baja Permeabilidad.
		I + C:	Instrumentación y Control.
		IARC:	International Agency for Research on Cancer. ( <i>Organismo Internacional de Investigación sobre el Cáncer</i> ).

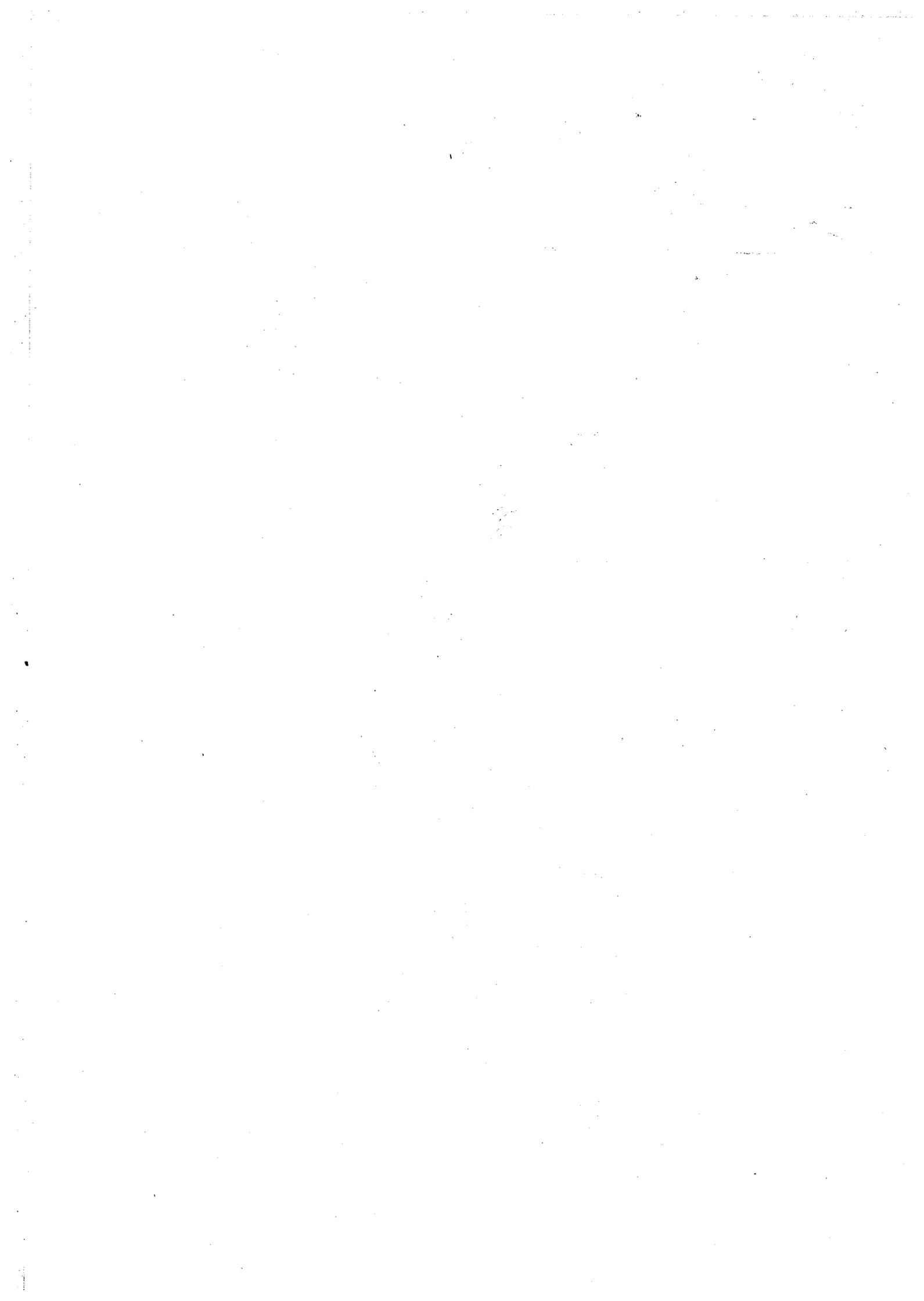
ICAP:	International Code Assessment Program. ( <i>Programa Internacional de Evaluación de Códigos</i> ).	OIEA:	Organismo Internacional de Energía Atómica.
ICRP:	International Commission on Radiological Protection. ( <i>Comisión Internacional de Protección Radiológica</i> ).	OMEGA:	Obtención de Modelos Para la Evaluación de Accidentes Graves.
II.NN.:	Instalaciones Nucleares.	OMS:	Organización Mundial de la Salud.
IPSN:	Institut de Protection et Sureté Nucleaire. ( <i>Instituto de Protección y Seguridad Nuclear</i> ).	PAAG:	Performance Assessment Advisory Group. ( <i>Grupo Asesor sobre Evaluación del Comportamiento</i> ).
ISP:	International Standard Problem. ( <i>Problema Standard Internacional</i> ).	PC:	Personal Computer. ( <i>Ordenador Personal</i> ).
JEN:	Junta de Energía Nuclear.	PORV:	Power Operated Relief Valve. ( <i>Válvula de Alivio Motorizada</i> ).
LOCA:	Loss of Coolant Accident. ( <i>Accidente con Pérdida de Refrigerante</i> ).	PRORI:	Protección Radiológica Operacional en Radiología Intervencionista.
LSI:	Laboratorio Subterráneo de Investigación	PWG:	Principal Working Group. ( <i>Grupo Principal de Trabajo</i> ).
MACE:	Melt Attack and Coolability Experiments. ( <i>Experimentos de Ataque y Refrigeración del Fundido</i> ).	PWR:	Presurized Water Reactor. ( <i>Reactor de Agua a Presión</i> ).
MARNA:	Mapa de Radiación Natural de España.	RWMC:	Radioactive Waste Management Committee. ( <i>Comité de Gestión de Residuos Radiactivos</i> ).
MCAPMELCOR:	Code Assessment Program. ( <i>Programa de Evaluación del Código MELCOR</i> ).	R5SCAP:	RELAP5/SCDAP Code Assessment Program. ( <i>Programa de Evaluación del Código RELAP5/SCDAP</i> ).
MOPTMA:	Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.	SEDE:	Coordinating Group on Site Evaluation and Design of Experiments for Radioactive Wastes Disposal. ( <i>Grupo de Coordinación sobre Evaluación de Emplazamientos y Diseño de Experimentos relativos al Almacenamiento de Residuos Radiactivos</i> ).
NEA:	Nuclear Energy Agency. ( <i>Agencia de Energía Nuclear</i> ).	SEPAMA:	Secretaría de Estado para las Políticas de Agua y el Medio Ambiente.
NSC:	Nuclear Science Committee. ( <i>Comité de la Ciencia Nuclear</i> ).	SHISTO:	Sismicidad Histórica.
NRC:	Nuclear Regulatory Commission. ( <i>Comisión Reguladora Nuclear</i> ).		
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.		

- TEMAS: Techniques and Management Strategies for Environmental Restoration and their Ecological Consequences. (*Técnicas y Estrategias de Gestión para Restauración Ambiental y sus Consecuencias Ecológicas*).
- TMI-2: Three Mile Island-2. (*Isla Tres Millas-Unidad 2*).
- TREAR: Transferencia de Radionucleidos en Ecosistemas Acuáticos Regulados.
- TREM: Transferencia de Radionucleidos en Ecosistemas Mediterráneos.
- UCM: Universidad Complutense de Madrid.
- UAB: Universidad Autónoma de Barcelona.
- UE: Unión Europea.
- UNESA: Unidad Eléctrica, S.A.
- UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (*Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica*).
- UPC: Universidad Politécnica de Cataluña.
- UPM: Universidad Politécnica de Madrid.
- UPV: Universidad Politécnica de Valencia.
- USEPRI: United States Electric Power Research Institute. (*Instituto de Investigación de Energía Eléctrica de Estados Unidos*).
- USNRC: United States Nuclear Regulatory Commission. (*Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos*).
- WASSAC: Waste Safety Standards Advisory Committee. (*Comité Asesor de Normas de Seguridad sobre Residuos*).



### 3. Relación de Códigos Referenciados

- ANSYS:** Análisis estructural de componentes sometidos a esfuerzos mecánicos, mediante elementos finitos.
- CONTAIN:** Análisis termohidráulico y de comportamiento de aerosoles en la contención de LWRs, durante accidentes severos.
- CORCON:** Análisis de interacción térmica y química entre el corium fundido depositado en la cavidad del reactor y el hormigón del suelo de la cavidad, durante un accidente grave.
- COSYMA:** Determinación de las consecuencias radiológicas después de un accidente.
- FRACAS:** Módulo del código SCDAP para el análisis mecánico de la vaina del combustible en situación de accidente en LWR.
- MAACS:** Determinación de las consecuencias radiológicas después de un accidente.
- MAAP:** Código integrado, desarrollado por la industria eléctrica de EE UU, destinado al análisis global del accidente severo. Su capacidad llega hasta la determinación del término fuente.
- MELCOR:** Código integrado, desarrollado por la NRC, destinado al análisis global del accidente severo. Su capacidad llega hasta la determinación del término fuente.
- RELAP5/MOD3:** Análisis de transitorios y LOCAS en reactores LWR.
- RELAP5/SCDAP:** Análisis detallado mecanicista de accidentes con fusión de núcleo en el sistema primario de reactores LWR.
- SAPHIRE:** Código de la NRC/INEL de cuantificación de APS, que dispone de distintas herramientas para aplicaciones.
- SCDAP:** Módulo del código RELAP5/SCDAP, que en el pasado se usaba como código independiente, destinado al análisis de los fenómenos de degradación del núcleo durante un accidente severo.
- SOLGASMIX:** Módulo destinado al estudio de las interacciones químicas entre los productos de fisión liberados al sistema primario en un accidente severo.
- STCP:** Código integrado destinado al estudio global del accidente severo, llegando hasta la determinación del término fuente. Antecesor de MELCOR.
- TRAC/BF1:** Análisis de transitorios y LOCAs en reactores BWR.
- TRAP-MELT:** Estudio de la evolución de los productos de fisión en el interior del sistema primario de un LWR durante un accidente severo.
- VANESA:** Estudio de la evolución de los productos de fisión en el interior de la contención de un LWR durante un accidente severo.
- VICTORIA:** Estudio de la evolución de los PFs en el interior del sistema primario, incluyendo el estudio de las transiciones químicas, durante un accidente severo.



**Plan Quinquenal  
de Investigación**  
(1997-2001)

Colección Documentos  
Nº 2. 1997

