

## Quincuagésima tercera reunión ordinaria

Punto 18 del orden del día provisional  
(GC(53)/1)

# Examen de la tecnología nuclear 2009

*Informe del Director General*

## Resumen

- En respuesta a las solicitudes de los Estados Miembros, la Secretaría elabora un amplio Examen de la tecnología nuclear todos los años. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en que se destacan acontecimientos notables ocurridos principalmente en 2008.
- En el *Examen de la tecnología nuclear 2009* se abordan los siguientes temas: aplicaciones eléctricas, fisión y fusión avanzadas, datos atómicos y nucleares, aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación, tecnologías nucleares en la agricultura y la alimentación, salud humana, medio ambiente, recursos hídricos, y producción y disponibilidad de radioisótopos. En el sitio web del Organismo<sup>1</sup> se encuentran, en inglés, otros documentos relacionados con el *Examen de la tecnología nuclear 2009* en los que se tratan las novedades en las esferas de la fitotecnia por mutaciones; la garantía de calidad en dosimetría - logros y tendencias; los isótopos para la gestión de ríos y acuíferos transfronterizos; los métodos de construcción avanzados para nuevas centrales nucleares; las interfaces entre centrales nucleares y la red eléctrica; y la integración de estrategias relativas al clima, la tierra, la energía y el agua.
- También puede obtenerse información sobre las actividades del OIEA relacionadas con la ciencia y la tecnología nucleares en el Informe Anual para 2008 del OIEA (GC(53)/7), en particular en la sección de Tecnología, y en el Informe de cooperación técnica para 2008 (GC(53)/INF/4).
- El documento ha sido modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, las observaciones específicas de la Junta y otras recibidas de los Estados Miembros.

---

<sup>1</sup> <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/Agenda/index.html>



# Examen de la tecnología nuclear 2009

*Informe del Director General*

## Resumen

1. El año 2008 fue paradójico para la energía nucleoelectrica. Aunque las proyecciones de crecimiento futuro se revisaron al alza, no se conectaron reactores nuevos a la red. Fue el primer año desde 1955 sin que entrara en servicio por lo menos un reactor nuevo. Se iniciaron, no obstante, diez construcciones, el número más elevado desde 1985.
2. Al menos hasta la crisis financiera mundial, las estimaciones de costos notificadas en relación con reactores nucleares nuevos fueron, con frecuencia, más elevadas que las de años anteriores, especialmente en regiones con menos experiencia reciente en las nuevas construcciones. No obstante, las cifras fijadas como meta de crecimiento correspondientes a la energía nucleoelectrica se incrementaron en la Federación de Rusia y en China se estaban analizando aspectos similares. La India negoció un acuerdo de salvaguardias con el Organismo en agosto y, posteriormente, el Grupo de Suministradores Nucleares liberó a la India de anteriores restricciones relativas al comercio nuclear, lo que debería permitir que ésta acelere la expansión de la energía nucleoelectrica que tiene prevista.
3. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) recibió solicitudes de licencia combinadas (COL) para 26 nuevos reactores. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) recibió 19 “solicitudes de la Parte I” en relación con garantías de préstamos federales para construir 21 nuevos reactores.
4. Sin embargo, la actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, siguen centradas en Asia. De las diez construcciones iniciadas en 2008, ocho fueron en Asia. Veintiocho de los 44 reactores en construcción al final del año se encontraban en Asia, así como 28 de los últimos 39 reactores nuevos que han sido conectados a la red.
5. Armenia se unió a la Federación de Rusia y Kazajstán como miembros del Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio de Angarsk (Siberia). El Gobierno de Ucrania anunció que su país también se uniría a ellos. AREVA y USEC solicitaron al DOE de los Estados Unidos garantías de préstamos para la construcción de la instalación de enriquecimiento de Eagle Rock propuesta por AREVA y la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América de USEC.
6. En la antigua mina de hierro de Konrad, en Alemania, comenzó la construcción de un repositorio subterráneo para desechos radiactivos de actividad baja y media. El DOE de los Estados Unidos presentó una solicitud oficial para construir y poner en funcionamiento el repositorio para desechos de actividad alta en Yucca Mountain, en Nevada, previsto desde hace mucho tiempo.

7. La Organización Internacional de Energía de Fusión del ITER solicitó oficialmente un permiso de construcción para el Reactor termonuclear experimental internacional (ITER), un reactor de fusión experimental, en Cadarache (Francia).
8. La gestión de los recursos hídricos, la seguridad alimentaria, la salud humana, la protección ambiental y el uso de radioisótopos y radiaciones son ámbitos en que las técnicas nucleares e isotópicas están haciendo valiosas aportaciones al desarrollo socioeconómico en el mundo.
9. En la esfera de la agricultura y la alimentación, las técnicas nucleares junto con técnicas complementarias, se emplean para mejorar la productividad del ganado, así como para prevenir la propagación de enfermedades pecuarias transfronterizas peligrosas como la gripe aviar. A medida que se expande el comercio internacional, aumenta también la necesidad de garantizar la inocuidad de los alimentos. Se están empleando técnicas isotópicas para descubrir el origen de los alimentos y vigilar la filtración de contaminantes como medio para garantizar la calidad de los productos alimenticios.
10. La obtención de imágenes nucleares desempeña una función cada vez más importante en la creación de nuevos medicamentos. Con creciente frecuencia, las intervenciones destinadas a mejorar la nutrición forman parte de las estrategias de desarrollo; el uso de isótopos estables para evaluar aspectos nutricionales clave, como la composición corporal, puede ser parte de estrategias eficaces para contrarrestar la aparición posterior de enfermedades crónicas. La tan buscada “bala mágica”, una sustancia verdaderamente específica que mata células cancerosas sin dañar el tejido sano, se está convirtiendo cada vez más, aunque lentamente, en una realidad en medicina nuclear terapéutica.
11. En la esfera de la gestión de los recursos naturales, las técnicas nucleares están ayudando a evaluar las “partículas calientes” – un tipo de radionucleido que se puede emitir en el medio ambiente desde diversas fuentes, entre ellas los ensayos de armas y los accidentes nucleares. Se están empleando isótopos estables a fin de conocer mejor redes alimentarias complejas y el ciclo del carbono en el medio marino. Se están utilizando instrumentos basados en radiotrazadores para medir los impactos del cambio climático, como la acidificación de los océanos en la biodiversidad marina. Cada vez se recurre más a métodos isotópicos para ayudar a identificar fácilmente acuíferos con aguas viejas y sin recarga, o con aguas nuevas y recarga considerable, información importante para la gestión eficaz del agua dulce.
12. La demanda mundial de radioisótopos y fuentes de radiación va en aumento debido a su uso en la medicina y la industria y a la correspondiente ampliación de centros regionales de producción de radiotrazadores clínicos para la obtención de imágenes mediante tomografía por emisión de positrones. Durante el año pasado, las interrupciones en el suministro del radioisótopo molibdeno 99, fuente del tecnecio 99m, ampliamente utilizado para la obtención de imágenes de diagnóstico, incidió negativamente en los servicios para los pacientes de los centros de medicina nuclear de todo el mundo. Se precisarán el apoyo gubernamental y una cooperación más sólida entre los fabricantes de isótopos, incluida las asociaciones entre entidades de los sectores público y privado, para asegurar que reactores adecuados llevarán a cabo la irradiación de blancos de uranio poco enriquecido para la producción de molibdeno 99 en el futuro.

## A. Aplicaciones eléctricas

### A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad

13. Al final de 2008 había en el mundo 438 reactores nucleares de potencia en funcionamiento. No se conectaron en 2008 reactores nuevos a la red y al final del año se puso fuera de servicio Bohunice 2, de conformidad con el acuerdo de adhesión a la Unión Europea (UE) de Eslovaquia. La potencia nuclear mundial y la parte correspondiente a la energía nucleoelectrica en la producción mundial de electricidad no experimentaron cambios y se mantuvieron en 372 GW(e) y el 14% respectivamente (véase el cuadro A-1).

14. En 2008 se iniciaron diez construcciones: Fangjiashan-1, Fuqing-1, Hongyanhe-2, Ningde 1 y 2 y Yangjiang 1 (todas de 1000 MW(e)) en China, Novovoronezh 2-1 y Leningrad 2-1 (ambas de 1085 MW(e)) en la Federación de Rusia, y Shin-Wolsong 2 (960 MW(e)) y Shin-Kori 3 (1340 MW(e)) en la República de Corea. Esto se contrapone al inicio de ocho construcciones más la reanudación de la construcción de un reactor en 2007. En 2006 se iniciaron cuatro construcciones y se reanudó la construcción de un reactor.

15. La actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, siguen centradas en Asia. De las diez construcciones iniciadas en 2008, ocho fueron en Asia. Como se muestra en el cuadro A-1, 28 de los 44 reactores en construcción al final del año estaban en Asia, así como 28 de los últimos 39 reactores nuevos que han sido conectados a la red. China está estudiando la posibilidad de incrementar su objetivo en lo que respecta a la parte de la electricidad correspondiente a la energía nucleoelectrica para 2020. La India negoció un acuerdo de salvaguardias con el Organismo y, posteriormente, el Grupo de Suministradores Nucleares liberó a la India de anteriores restricciones al comercio nuclear. Gracias a unos intercambios comerciales menos limitados, la India debería poder poner en práctica con mayor rapidez la expansión de la energía nucleoelectrica que tiene prevista.

16. Se incrementaron los objetivos en la Federación de Rusia – a 52-59 GW(e) de capacidad nucleoelectrica para 2020. La Federación de Rusia también concedió una licencia a la central nuclear Kola-1 para prolongar su funcionamiento hasta julio de 2018, lo que ahora representa una vida útil autorizada de 45 años.

17. También en Europa, el Reino Unido publicó un libro blanco en enero de 2008 en el que se destacaba que, en aras del interés público, la energía nuclear debería seguir formando parte de la mezcla energética de baja emisión de carbono del Reino Unido a fin de alcanzar las metas de reducción del carbono y garantizar suministros energéticos seguros. Varias compañías eléctricas europeas expresaron interés en construir nuevos reactores en el Reino Unido. Italia anunció planes encaminados a establecer de nuevo la infraestructura legal, reglamentaria y técnica necesaria para reiniciar su programa de energía nucleoelectrica, que había sido interrumpido tras un referéndum en 1987. A principios de noviembre la cámara baja del Parlamento aprobó un proyecto de ley por el que se anulaba la moratoria nuclear. En Rumania, varios socios firmaron un acuerdo de inversión para financiar la construcción de Cernavoda 3 y 4. En Bulgaria, varios socios firmaron contratos para la construcción de Belene 1 y 2. En Finlandia, Teollisuuden Voima Oyj (TVO) solicitó al Consejo de Estado la aprobación en principio de la construcción de Olkiluoto-4, y otras empresas están preparando dos solicitudes más. En Suiza, Atel, Axpo y BKW FMB Energía han presentado solicitudes para construir nuevas centrales nucleares en Niederramt, Beznau y Gösgen. En Eslovaquia, Solvenské elektrárne inició una licitación para reanudar la construcción de Mochovce 3 y 4.

18. En el Canadá, el gobierno provincial del Ontario seleccionó Darlington como emplazamiento de dos nuevas unidades de reactor a raíz de la solicitud de Ontario Power Generation en 2006 de una licencia para la preparación del emplazamiento. También se concedieron licencias a Ontario Power Generation para la explotación de los reactores de Darlington y Pickering-B por cinco años más, hasta 2013.

19. En los Estados Unidos de América, la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) aprobó diez aumentos de potencia, lo que asciende a un total de 2 178MW(t). La NRC aprobó tres prórrogas de licencias de 20 años (equivalente a una vida útil total autorizada de 60 años), elevando a 51 al final de 2008 el número total de prórrogas de licencias aprobadas. En cuanto a las nuevas construcciones, la NRC recibió solicitudes de licencias combinadas (COL) para 26 nuevos reactores. El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) recibió 19 “solicitudes de la Parte I” relativas a garantías de préstamos federales para construir 21 nuevos reactores. El total solicitado ascendía a 122 000 millones de dólares, considerablemente más que los 18 500 millones ofrecidos.

20. Sigue existiendo gran interés en iniciar nuevos programas nucleoelectricos. En los últimos dos años, 55 Estados Miembros han expresado, por medio de solicitudes al Organismo para participar en proyectos de cooperación técnica, su interés en estudiar la implantación de la energía nucleoelectrica.

21. El Organismo presta asistencia a los Estados Miembros interesados en relación con el análisis de las opciones energéticas y los preparativos para implantar la energía nucleoelectrica y/o producir uranio. El número de proyectos de cooperación técnica (CT) aprobados sobre análisis de opciones energéticas aumentó de 29 a 41 para el ciclo de proyectos de cooperación técnica iniciado en 2009. El número de proyectos sobre prospección y extracción de uranio pasó de 4 a 10, y el de proyectos sobre la implantación de la energía nucleoelectrica aumentó de 13 a 44. El Organismo creó un nuevo servicio que presta asesoramiento integrado a países que estudian la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica. En 2007 y 2008 se realizaron diez misiones de ese tipo en Belarús, Egipto, Filipinas, Jordania, Nigeria, Sudán, Tailandia, y en países miembros del Consejo de Cooperación del Golfo (en tres ocasiones). El Organismo también proporciona documentos de orientación. En 2008 publicó los documentos *Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development* y *Financing of New Nuclear Power Plants* para complementar dos publicaciones básicas de 2007, *Consideraciones para iniciar un programa nucleoelectrico* y *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2008)<sup>a</sup>

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2008		Experiencia operacional total hasta 2008	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	17	20 470			140,9	28,8	734	5
ARGENTINA	2	935	1	692	6,9	6,2	60	7
ARMENIA	1	376			2,2	39,4	34	8
BÉLGICA	7	5 824			43,4	53,8	226	7
BRASIL	2	1 766			13,2	3,1	35	3
BULGARIA	2	1 906	2	1 906	14,7	32,9	145	3
CANADÁ	18	12 577			88,3	14,8	564	2
COREA, REPÚBLICA DE	20	17 647	5	5 180	144,3	35,6	319	8
CHINA	11	8 438	11	10 220	65,3	2,2	88	3
ESLOVAQUIA	4	1 626			14,2	54,3	128	7
ESLOVENIA	4	1 711			15,5	56,4	128	7
ESPAÑA	8	7 450			56,5	18,3	261	6
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	104	100 683	1	1 165	806,7	19,7	3 395	9
FEDERACIÓN DE RUSIA	31	21 743	8	5 809	152,1	16,9	963	4
FINLANDIA	4	2 696	1	1 600	22,1	29,7	119	4
FRANCIA	59	63 260	1	1 600	419,8	76,2	1 641	2
HUNGRÍA	4	1 859			13,9	37,2	94	2
INDIA	17	3 782	6	2 910	13,2	2,0	301	4
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL			1	915				
JAPÓN	55	47 278	2	2 191	241,3	24,9	1 386	8
LITUANIA	1	1 185			9,1	72,9	42	6
MÉXICO	2	1 300			9,4	4,0	33	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,9	3,8	64	0
PAKISTÁN	2	425	1	300	1,7	1,9	45	10
REINO UNIDO	19	10 097			48,2	13,5	1 438	8
REPÚBLICA CHECA	6	3 634			25,0	32,5	104	10
RUMANIA	2	1 300			10,3	17,5	13	11
SUDÁFRICA	2	1 800			12,8	5,3	48	3
SUECIA	10	8 996			61,3	42,0	362	6
SUIZA	5	3 220			26,3	39,2	168	10
UCRANIA	15	13 107	2	1 900	84,5	47,4	353	6
Total <sup>b, c</sup>	438	371 562	44	38 988	2 597,8	14%	13 475	7

a. Los datos provienen del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo, (<http://www.iaea.org/pris>).

b. Nota: El total incluye los datos siguientes en Taiwán (China):

— 6 unidades, 4949 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2600 MW(e) en construcción;

— 39,3 TW·h de generación de electricidad nuclear, lo que representa el 17,5% del total de electricidad producida allí;

— 164 años y un mes de experiencia operacional total al final de 2008.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (81 años) y Kazajstán (25 años y 10 meses).

## A.2. Proyecciones sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica

22. El OIEA actualiza anualmente sus proyecciones bajas y altas en relación con el crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica. En 2008 se revisaron al alza tanto las proyecciones bajas como las altas. En la proyección baja actualizada, la capacidad nuclear mundial alcanza 473 GW(e) en 2030, frente a una capacidad de 372 GW(e) a finales de 2008. En la proyección alta actualizada, esa capacidad se eleva a 748 GW(e).

23. La Agencia Internacional de Energía (AIE) también revisó al alza en un 5% su proyección de referencia respecto de la energía nucleoelectrica en 2030<sup>2</sup>. Ahora bien, los 433 GW(e) de potencia nuclear instalada en 2030, que son el escenario de referencia de la AIE, siguen siendo inferiores a la proyección baja del OIEA. La AIE también publicó dos escenarios normativos relativos al clima. El “escenario normativo 550”, que corresponde a la estabilización a largo plazo de la concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero en 550 partes por millón de CO<sub>2</sub>, equivale a un aumento de la temperatura mundial de aproximadamente 3°C. El “escenario normativo 450” equivale a un incremento de unos 2°C. La potencia nuclear instalada en 2030 asciende a 533 GW(e) en el escenario normativo 550 y, a 680 GW(e), en el escenario normativo 450.

24. La Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE publicó en 2008 un *Nuclear Energy Outlook*, que incluyó proyecciones bajas y altas de la capacidad nuclear hasta 2050<sup>3</sup>. Para 2030, la capacidad proyectada oscila entre 404 y 625 GW(e) y es algo inferior a la del OIEA. Para 2050, la capacidad proyectada oscila entre 580 y 1400 GW(e).

25. La Administración de Información sobre Energía de los Estados Unidos también revisó su proyección de referencia respecto de la energía nucleoelectrica en 2030 ligeramente al alza, a 498 GW(e)<sup>4</sup>. Esta cifra es algo más alta que la de la proyección baja del OIEA.

26. Todas estas proyecciones se hicieron antes de la crisis financiera de fines de 2008. En el momento de elaborarse el presente informe no se habían publicado proyecciones que analizaran las consecuencias de la crisis para la energía nucleoelectrica.

## A.3. Ciclo del combustible<sup>5</sup>

27. El número de asociados de la Alianza Mundial por la Energía Nuclear (GNEP), creada en 2007, aumentó a 25 en 2008. El Grupo de Trabajo sobre desarrollo de infraestructuras de la GNEP puso en marcha una biblioteca de referencias, programas, herramientas y recursos mancomunados en apoyo del intercambio de recursos de enseñanza, la promoción de oportunidades de enseñanza técnica y el establecimiento de nuevos programas de capacitación y enseñanza. También inició varios estudios de viabilidad para los miembros de la GNEP que consideraban por primera vez la opción nuclear. El Grupo de Trabajo sobre servicios fiables relacionados con el combustible nuclear de la GNEP concluyó un estudio de los marcos jurídicos e institucionales de los miembros en relación con el ciclo del combustible, a fin de definir los desafíos comunes. Ahora, el grupo se centrará en las cuestiones relacionadas con la parte final del ciclo del combustible.

---

<sup>2</sup> Agencia Internacional de Energía de la OCDE, *World Energy Outlook 2008*, París (Francia) 2008.

<sup>3</sup> Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, *Nuclear Energy Outlook 2008*, París (Francia) 2008.

<sup>4</sup> Administración de Información sobre Energía, *International Energy Outlook 2008*, Departamento de Energía de los Estados Unidos, Washington, DC, 2008.

<sup>5</sup> Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas al ciclo del combustible en las secciones pertinentes del último Informe Anual del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>) y en <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.



### **A.3.1. Recursos y producción de uranio**

28. En la 22ª edición de del “Libro Rojo” AEN/OCDE-OIEA<sup>6</sup> se notificó un aumento de los recursos de uranio, lo que refleja el crecimiento reciente de las actividades de exploración en todo el mundo. Este aumento de los recursos es una tendencia constante. En los últimos catorce años (siete ediciones del Libro Rojo), los recursos de uranio aún disponibles notificados han aumentado en más de 2,4 millones de toneladas, pese a que se extrajeron más de 0,5 millones de toneladas.

29. Los recursos identificados notificados (5,5 millones de toneladas de uranio natural) serían suficientes para 83 años al ritmo de consumo actual de unas 70 000 toneladas anuales. Ahora bien, esa cifra (83 años) puede inducir a error, ya que todas las cifras relativas a los recursos minerales varían en función de la evolución del precio de los productos básicos, y el uranio no es ninguna excepción. El aumento notificado de los recursos de 2005 a 2007 corresponde a 11 años de la demanda de uranio de 2006, lo que constituye una sólida demostración del impacto del aumento de los precios del uranio en las cifras totales relativas a los recursos. Además, las cifras de los recursos de uranio notificados presentadas en el Libro Rojo sólo representan una parte de los recursos ya conocidos y no constituyen un inventario de la cantidad total de uranio recuperable. Entre los países en los que los recursos de uranio son conocidos, pero no notificados, cabe citar la Federación de Rusia, los Estados Unidos de América y Australia.

30. La duración prevista de los recursos de uranio identificados notificados de 83 años al actual ritmo de consumo supera la de las reservas de otros productos básicos (p. ej., cobre, zinc, petróleo y gas natural), que es de 30 a 50 años. No obstante, se proyecta que la demanda aumentará y es necesario extraer los recursos del suelo. Según la proyección alta del Organismo, las instalaciones de producción de uranio existentes, comprometidas, previstas y futuras podrían satisfacer las necesidades de uranio aproximadamente hasta 2025, a condición de que las minas existentes se amplíen y de que se abran las nuevas minas previstas. La nueva demanda de uranio tendría que satisfacerse mediante el establecimiento de una capacidad de extracción adicional superior a la prevista. Se espera lograr este objetivo a medida que se encarguen en firme nuevas instalaciones nucleares (en el caso de la proyección alta del Organismo), lo que crearía confianza en el aumento de las perspectivas de ventas a largo plazo entre los productores de uranio. Algunas incertidumbres acerca del volumen de uranio sin irradiar requerido para satisfacer la demanda se deben al hecho de que todavía existen fuentes secundarias, aunque su número es cada vez menor. En la actualidad, las fuentes secundarias satisfacen alrededor del 40% de la demanda.

31. En 2008 Kazajstán inició varias operaciones de lixiviación in situ y amplió el alcance de varias operaciones de este tipo ya existentes hasta alcanzar su plena capacidad prevista, de conformidad con los objetivos de producción del país de 10 000 tU anuales en 2010. La capacidad de muchas de las operaciones de lixiviación in situ es de al menos 1 000 toneladas anuales de uranio (tU anuales). En 2008 comenzaron los preparativos para construir una nueva planta de procesamiento de uranio en Tummalapalle, en Andhra Pradesh (India), con una capacidad de diseño de 220 tU anuales.

### **A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible**

32. La capacidad de conversión mundial total es de unas 75 000 toneladas de uranio natural anuales (tU anuales), en el caso del hexafluoruro de uranio (UF<sub>6</sub>), y de 4 500 tU anuales en el caso del dióxido de uranio (UO<sub>2</sub>). La demanda actual es de unas 70 000 tU anuales. AREVA tiene previsto iniciar la construcción de su nueva instalación de conversión COMURHEX II en 2009, con una capacidad inicial de conversión a UF<sub>6</sub> prevista de 15 000 tU anuales en 2012.

---

<sup>6</sup> AEN/OCDE-OIEA, Uranium 2007: Resources, Production and Demand, OECD, París, 2008.

33. La capacidad de enriquecimiento mundial total es actualmente de unos 50 millones de unidades de trabajo de separación anuales (UTS anuales), frente a una demanda total de aproximadamente 45 millones de UTS anuales. Hay tres nuevas instalaciones de enriquecimiento a escala comercial en construcción, a saber, Georges Besse II en Francia y, en los Estados Unidos de América, la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América (ACP) y la Instalación nacional de enriquecimiento (NEF). En todas se utiliza el enriquecimiento por centrifugación y está previsto que todas comiencen a funcionar en 2009. Las instalaciones Georges Besse II y ACP están destinadas a permitir la retirada del servicio de las plantas de enriquecimiento por difusión gaseosa actualmente existentes. AREVA y USEC solicitaron al DOE de los Estados Unidos garantías de préstamos para la construcción de la instalación ACP de USEC y la instalación de enriquecimiento de Eagle Rock propuesta por AREVA. Armenia se unió a la Federación de Rusia y Kazajstán como miembros del Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio (IUEC) de Angarsk (Siberia) y, en diciembre, el Gobierno de Ucrania anunció que Ucrania también se uniría al Centro.

34. La capacidad de fabricación de combustible mundial total es actualmente de unas 1 500 tU anuales (uranio enriquecido), en el caso del combustible para reactores de agua ligera (LWR), y de unas 4 000 tU anuales (uranio natural), en el caso del combustible para reactores de agua pesada a presión (PHWR). La demanda total asciende a unas 12 000 tU anuales. Actualmente se encuentran en curso algunas actividades de ampliación de las instalaciones existente, por ejemplo, en China y la República de Corea. En Rokkasho (Japón) se encuentran en curso los trabajos de construcción de una nueva instalación para fabricar combustible de mezcla de óxidos (MOX), que se prevé se finalizarán en 2012.

### **A.3.3. Parte final del ciclo del combustible**

35. Se preveía que la cantidad total de combustible gastado descargado en todo el mundo ascendiera a 324 000 toneladas de metal pesado (tHM) a fines de 2008. De esta cantidad, unas 95 000 tHM ya han sido reprocesadas, 16 000 tHM se encuentran actualmente almacenadas en espera de ser reprocesadas y 213 000 tHM se encuentran almacenadas en las piscinas de almacenamiento de combustible gastado de los reactores o en instalaciones de almacenamiento fuera de los reactores. Las instalaciones de almacenamiento fuera de los reactores son objeto de ampliaciones periódicas mediante la adición de módulos a las instalaciones de almacenamiento en seco ya existentes y la construcción de nuevas instalaciones.

36. La capacidad de reprocesamiento mundial total es de unas 6 000 tHM anuales. En el Reino Unido, la planta de reprocesamiento de combustible nuclear de Thorp en Sellafield reanudó operaciones comerciales en 2007, o sea tres años después de haber sido cerrada tras una fuga radiactiva. Los ensayos en la nueva planta de reprocesamiento de Rokkasho llevaron más tiempo de lo previsto, por lo que las operaciones comerciales se aplazaron hasta 2009.

37. En la antigua mina de hierro de Konrad, en Alemania, comenzó la construcción de un repositorio subterráneo para desechos radiactivos de actividad baja y media. Está previsto que comience a recibir desechos a principios de 2014.

38. En 2008 se inauguró el repositorio permanente de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia en Bataapati (Hungría). Los desechos se almacenarán provisionalmente en una zona receptora hasta que se inauguren en 2010 las cavernas rocosas para la disposición final permanente.

39. La Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB), encargada de almacenar los desechos nucleares de Suecia, recibió una licencia de explotación para ampliar la capacidad de la instalación central de almacenamiento provisional de combustible nuclear gastado en Oskarshamn de 5 000 tHM a 8 000 tHM.

40. El DOE de los Estados Unidos presentó una solicitud oficial al CNR con el fin de obtener una licencia para construir y explotar en Yucca Mountain, Nevada, un repositorio de

desechos de actividad alta previsto hace mucho tiempo. El repositorio está diseñado para almacenar 70 000 tHM de combustible nuclear gastado, comprendidas 7 000 tHM de desechos provenientes de actividades militares.

41. En 2008 no hubo cambios en las estadísticas mundiales sobre la clausura: se han clausurado completamente diez reactores de potencia en el mundo y se ha autorizado el uso incondicional de sus emplazamientos; diecisiete reactores han sido parcialmente desmantelados y cerrados en condiciones de seguridad; treinta y dos se hallan en fase de desmantelamiento con vistas a declarar el emplazamiento apto para otros usos; y 34 reactores están siendo objeto de un desmantelamiento mínimo antes de su cierre a largo plazo.

## **A.4. Otros factores que afectan al futuro de la energía nucleoelectrónica**

### **A.4.1. Factores económicos**

42. La última vez que en el *Examen de la tecnología nuclear* se reseñaron las estimaciones de los costos de la construcción de nuevas centrales nucleares fue en 2006. En esa reseña se compararon las estimaciones de siete estudios publicados entre 2003 y 2005. Las estimaciones de los costos inmediatos contenidas en esos estudios oscilaban entre 1 200 dólares/kW(e) y 2 510 dólares/kW(e)<sup>7</sup>.

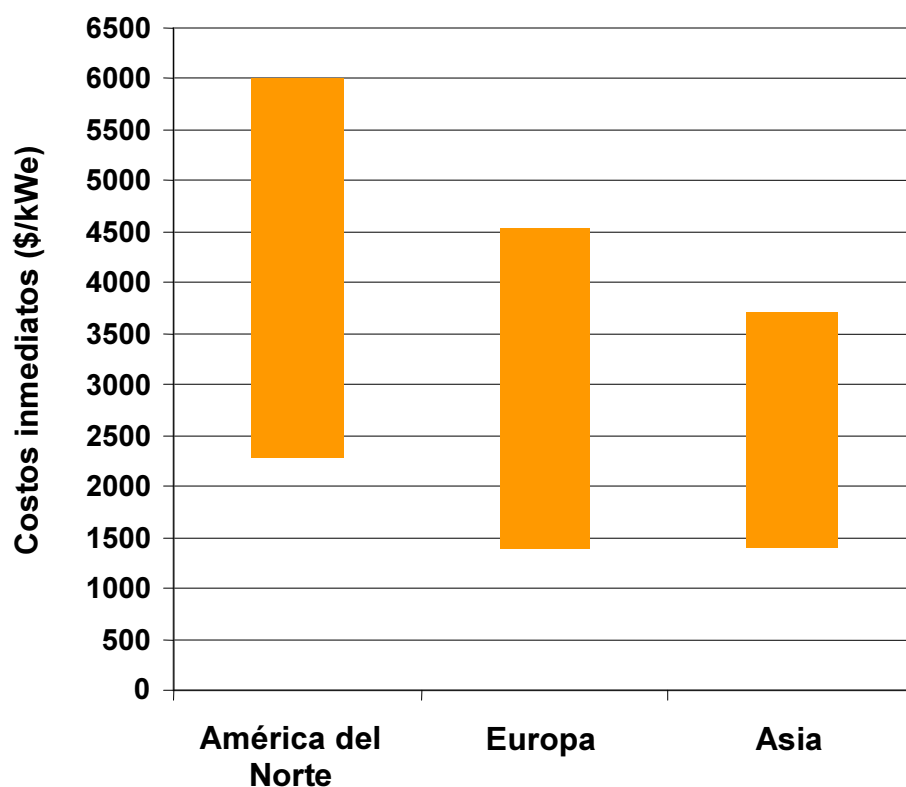
43. Durante el año transcurrido, la escala de estimaciones ha aumentado en su extremo superior. La figura A-1 muestra los valores mínimos y máximos de las estimaciones recientes reunidas por el Organismo de fuentes de libre acceso.

44. No hay una explicación definitiva del aumento de las incertidumbres en las estimaciones de los costos (es decir, la escala más amplia) ni del aumento de las estimaciones de los costos (es decir, la escala más alta), aunque se han sugerido varios factores posibles. Además, las estimaciones de los costos recogidas en la figura A-1 se efectuaron antes de la crisis financiera de fines de 2008. En el momento de elaborarse el presente informe aún no eran claras las repercusiones de esta crisis en las estimaciones de los costos de la energía nucleoelectrónica. Por lo tanto, en esta sección se resumen los factores que pueden haber contribuido al aumento de las estimaciones de los costos y de las incertidumbres, pero la falta de estudios rigurosos no permite ofrecer explicaciones definitivas.

45. Aunque esta sección se centra en los costos inmediatos, el interés durante la construcción (IDC) también es un componente importante de los costos de los reactores nucleares. Los financistas, propietarios e interesados directos tienden a ser más reservados en el caso de las estimaciones del IDC que en el de las de los costos inmediatos, que son más aplicables a proyectos concretos. Por lo tanto, es difícil elaborar un gráfico de los costos totales (comprendido el IDC) que resulte útil, como el de la figura A-1 correspondiente a los costos inmediatos. Sin embargo, el hecho de añadir el IDC puede hasta duplicar los costos totales de los proyectos, particularmente si factores tales como el tiempo de construcción, la tasa de interés o las condiciones del mercado cambian negativamente durante la ejecución del proyecto. Así pues, el hecho de que esta sección se centre en los costos inmediatos no debería restarle importancia al IDC.

---

<sup>7</sup> Los “costos inmediatos” no incluyen intereses, costos de financiación ni costos por reajuste de precios durante la construcción, como si la planta se estuviese construyendo de la noche a la mañana. Los costos por reajuste reflejan los aumentos de precios durante la construcción. No deben confundirse con los costos imprevistos, que guardan relación exclusivamente con los trabajos imprevistos.



*Fig. A-1. Estimaciones mínimas y máximas de los costos inmediatos de nuevos reactores nucleares de potencia, por regiones: 2007–2008.*

#### **Incertidumbres en las estimaciones de los costos**

46. Una razón de la variación de las estimaciones de los costos es que diferentes personas utilizan diferentes definiciones. Los componentes de los costos que unas veces se incluyen, y otras se excluyen, son los costos asociados a la evaluación de ofertas, la selección y preparación de emplazamientos, los costos de la concesión de licencias, los costos de los propietarios y los costos imprevistos, así como algunos costos de financiación.

47. Algunas variaciones se deben a diferencias locales. Construir en un emplazamiento totalmente nuevo es generalmente más costoso que construir en uno en el que ya existen reactores. Asimismo, construir en una zona de mayor actividad sísmica es más costoso. Los costos de personal y de los materiales varían, y su impacto varía en función del porcentaje de componentes de la central que se fabrican o producen localmente. Los subsidios y las garantías financieras para las inversiones en energía nucleoelectrónica difieren según el país y la región. Los requisitos reglamentarios pueden ser diferentes, al igual que la previsibilidad de tales requisitos. La experiencia generalmente reduce las incertidumbres, hecho que parece reflejarse en la figura A-1. La región que posee la experiencia más reciente en la construcción de nuevos reactores, a saber, Asia, registra las estimaciones de los costos más bajas y las menores incertidumbres. América del Norte, que es la región con la menor experiencia reciente, acusa las estimaciones más altas y las mayores incertidumbres.

48. Los arreglos contractuales también afectan las estimaciones de los costos. Un contrato llave en mano podría ser más costoso que un contrato al costo más honorarios si el vendedor establece en el contrato llave en mano el costo de cualquier riesgo relacionado con la finalización del proyecto. Los tipos de cambio, las expectativas respecto de la inflación y sus efectos diferenciales en los distintos componentes de los costos son factores que añaden más variabilidad.

49. Las diversas tecnologías tienen diferentes costos. Los diseños comprobados pueden costar menos que los primeros reactores de un tipo concreto, y la construcción del primer reactor de un diseño concreto costará probablemente más que la construcción de los siguientes. En las distintas estimaciones también se prevé de qué forma la experiencia posibilitará una reducción de los costos según diferentes ritmos de aprendizaje.

50. Distintas perspectivas también pueden conducir a estimaciones diferentes. En un informe de 2006 de la Sustainable Development Commission del Reino Unido se indicó que los vendedores de sistemas de reactores tenían un evidente incentivo comercial, especialmente antes de contraer compromisos contractuales, para subestimar los costos<sup>8</sup>. Las compañías de electricidad quizá tiendan a ser más conservadoras.

### **Incertidumbres en las estimaciones de los costos**

51. Los factores que posiblemente contribuyeron al aumento de las estimaciones de los costos correspondientes a los nuevos reactores fueron los mercados de productos básicos más restringidos y los aumentos marcados, durante gran parte de 2008, de los precios del acero, el hormigón, la energía y otros materiales de construcción. Estos aumentos también afectaron a las estimaciones de los costos de otros tipos de centrales eléctricas, pero como los costos de capital son más elevados en el caso de la energía nucleoelectrica, ésta se ve más afectada<sup>9</sup>. A fines de 2008 los precios de la mayoría de los productos básicos dejaron de aumentar<sup>10</sup>, debido en parte a razones cíclicas (la anterior subida de los precios había estimulado una mayor capacidad de producción y reducido la demanda) y en parte a la crisis financiera.

52. De hecho, la volatilidad de los precios de los productos básicos también contribuyó probablemente al aumento de las reservas para imprevistos y, por ende, al aumento de las estimaciones de los costos. La crisis financiera puede haber tenido un efecto similar.

53. Es posible que las estimaciones de los costos también hayan aumentado por el hecho de que, durante los últimos años, el mercado nuclear mundial ha pasado de estar orientado a los compradores a estarlo a los proveedores, cambio que generalmente ejerce una presión al alza sobre los precios. La cartera de pedidos de los vendedores ha alcanzado un nivel no registrado desde fines del decenio de 1970. La capacidad de la industria metalúrgica pesada es limitada y los plazos de espera de más de 50 meses son comunes.

54. Otro factor que ha contribuido al aumento de las estimaciones de los costos globales podría ser el hecho de que la mayor parte de esas estimaciones provienen de Europa y, especialmente, América del Norte, donde la falta de experiencia reciente en la construcción, en comparación con Asia, y de nuevos diseños de reactores contribuyen probablemente al aumento de las estimaciones recogidas en la figura A-1.

55. Por último, a medida que los proyectos se acercan a su conclusión, es posible que la mayor parte de las estimaciones de los costos recientes reflejen más la actitud conservadora frente a los costos de las compañías eléctricas que el optimismo en la fijación de precios de los vendedores y el optimismo tecnológico de algunos gobiernos y estudios académicos.

---

<sup>8</sup> UK Sustainable Development Commission, *The role of nuclear power in a low carbon economy — Paper 4: The economics of nuclear power*, preparado por Science and Technology Policy Research (SPRU), Universidad of Sussex) y NERA Economic Consulting, marzo de 2006.

<sup>9</sup> Ahora bien, sobre la base del ciclo de vida y en función de los costos de generación, las centrales nucleares son las menos afectadas ya que son las que tienen menos necesidades de materiales específicos por kW h generado.

<sup>10</sup> En noviembre de 2008, el precio de referencia del cobre se había reducido a la mitad desde septiembre de 2008 y los precios mundiales del acero habían caído en casi el 80% desde julio de 2008.

#### A.4.2. Seguridad<sup>11</sup>

56. Los indicadores de la seguridad, como los publicados por la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN) y reproducidos en las figuras A-2 y A-3, mejoraron notablemente en el decenio de 1990. En los últimos años, la situación se ha estabilizado en algunos ámbitos. Sin embargo, la diferencia entre las esferas de peor y mejor desempeño sigue siendo considerable, lo que proporciona un amplio margen para seguir realizando mejoras.

57. En el *Examen de la seguridad nuclear correspondiente al año 2008* (GC(53)/INF/2) que publica el Organismo se presenta información más detallada sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares.

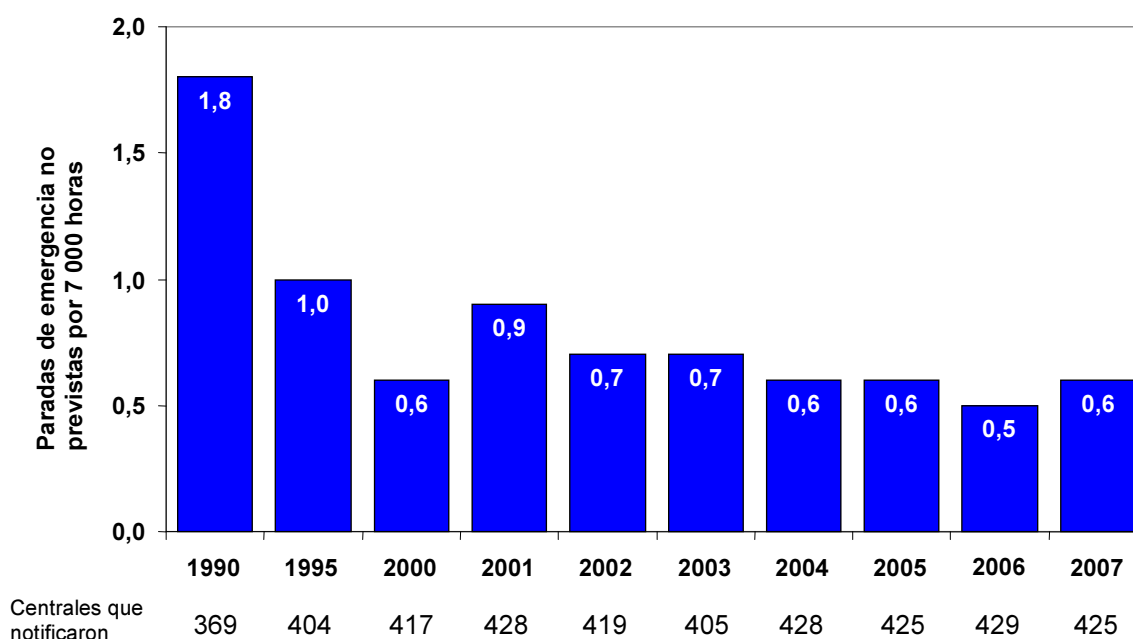


Fig. A-2. Paradas de emergencia no previstas por 7 000 horas de criticidad. Fuente: *Indicadores de ejecución de la AMEIN 2007*.

<sup>11</sup> Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a la seguridad nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>), y en la dirección <http://www-ns.iaea.org/>.

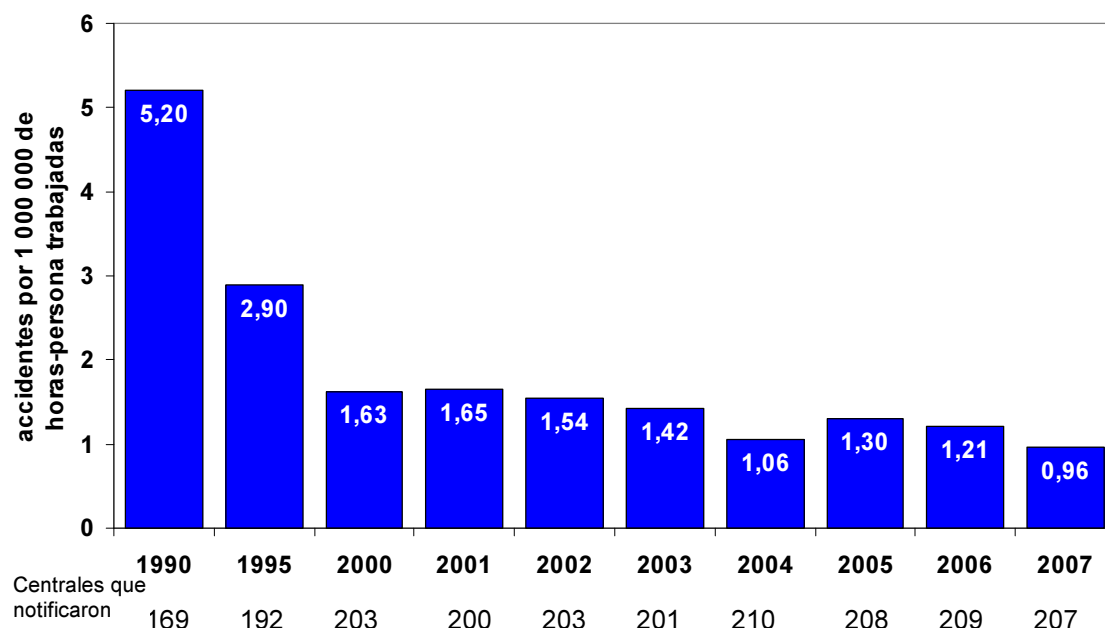


Fig. A-3. Accidentes industriales en centrales nucleares por 1 000 000 de horas-persona trabajadas. Fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2007.

#### A.4.3. Desarrollo de los recursos humanos

58. No se puede acceder fácilmente a estimaciones de las necesidades de recursos humanos asociadas a ninguna de las proyecciones examinadas en la sección A.2. Además, se dispone de pocos datos sobre el número de personas que actualmente cuentan con las diversas aptitudes necesarias en la industria nuclear y sobre el número de las que están siguiendo programas educativos y de capacitación.

59. En varios países se ha expresado preocupación sobre posible escasez de personas con las aptitudes que precisa la industria nucleoelectrónica. En un informe de la AEN/OCDE publicado en 2000 se cuantificaba por primera vez la situación de la enseñanza en el ámbito nuclear en sus países miembros, y se señalaba que en la mayoría de los casos la enseñanza nuclear había disminuido hasta el punto de que los conocimientos especializados y la competencia en tecnologías nucleares básicas eran cada vez más difíciles de mantener<sup>12</sup>. No obstante, la AEN/OCDE también ha observado que las pérdidas generales de competencias y aptitudes técnicas varían de un país a otro según la solidez del programa nucleoelectrónico<sup>13</sup>. El resultado paradójico es que las preocupaciones sobre la escasez de personal parecen expresarse con menor frecuencia en países que tienen programas de más rápida evolución.

60. Las preocupaciones sobre una posible escasez han dado lugar a iniciativas de los gobiernos y la industria encaminadas a atraer a estudiantes y ampliar la enseñanza y la capacitación en el ámbito nuclear. Según los datos disponibles, esas iniciativas parecen tener éxito. En la figura A-4 se muestra un aumento del número de licenciados con títulos en ingeniería nuclear en los Estados Unidos de América, en gran medida como resultado del programa universitario sobre infraestructura de reactores y asistencia en la enseñanza.

<sup>12</sup> Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, *Nuclear Education and Training: Cause for Concern?* París (Francia) 2000.

<sup>13</sup> Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, *Nuclear Energy Outlook 2008*, París (Francia) 2008.

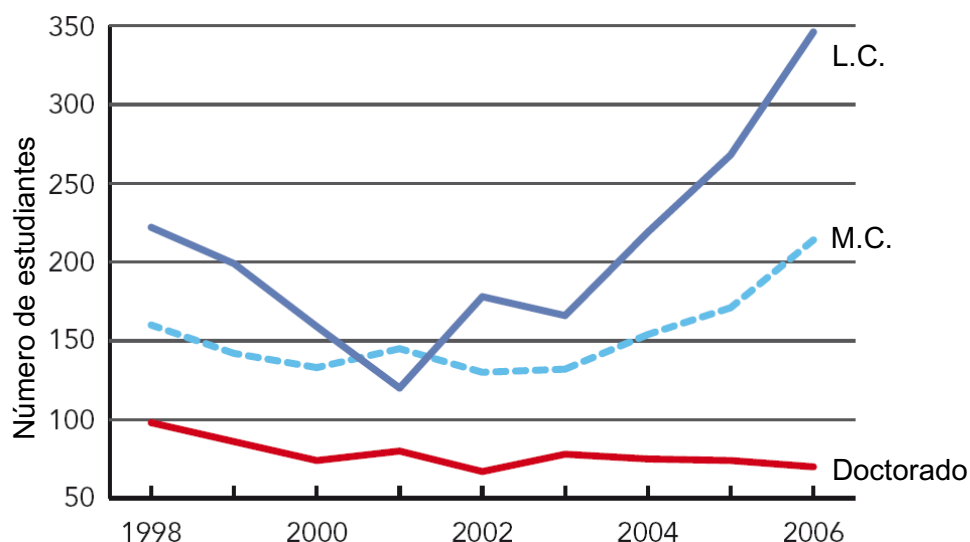


Fig. A-4. Títulos en ingeniería nuclear en universidades estadounidenses (L.C. = Licenciado en ciencias, M.C. = Maestría en ciencias). (Fuente: Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, *Nuclear Energy Outlook 2008*, París (Francia) 2008.)

61. Si se cumplen las proyecciones altas para la energía nucleoelectrónica descritas en la sección A.2, el éxito que se indica en la figura A-4 tendrá que repetirse varias veces. Aunque será considerable, no se tratará de un desafío sin precedentes. La proyección alta del Organismo, por ejemplo, requeriría la conexión a la red de un promedio de 17 reactores nuevos al año, básicamente el mismo promedio anual de 16 reactores nuevos registrado durante el decenio de 1970. Además, en la proyección alta, la parte correspondiente a la energía nucleoelectrónica en la producción mundial de electricidad es casi constante hasta 2030, lo que significa que otras fuentes de electricidad – y sus necesidades de personal – crecerían al mismo ritmo que la energía nucleoelectrónica. El reto al que se enfrenta esta energía no es excepcional.

#### A.4.4. Aceptación de la energía nuclear por el público

62. La primera cuestión que figura en las orientaciones del Organismo para países que estén estudiando la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrónica<sup>14</sup> se denomina “posición nacional”: “El gobierno debería aprobar una declaración de intenciones clara para desarrollar un programa nucleoelectrónico y comunicar esa intención a escala local, nacional, regional e internacional”. Asimismo, se puede facilitar asesoramiento comparable a países que ya disponen de energía nucleoelectrónica, y todos los gobiernos que apoyan esa energía deberían tratar de obtener un amplio apoyo nacional.

63. La forma más común de averiguar si existe un apoyo nacional amplio en relación con la energía nucleoelectrónica que corresponda a las crecientes expectativas examinadas en la sección A.2 es por medio de encuestas de la opinión pública. Sin embargo, esas encuestas tienen sus puntos débiles. Las respuestas pueden depender de la formulación de la pregunta, e incluso los expertos pueden discrepar acerca de cómo se deberían interpretar algunas respuestas. No obstante, existen técnicas seguras para eliminar la parcialidad en la selección de la muestra, la formulación de las preguntas y la interpretación de los resultados.

<sup>14</sup> OIEA, *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*, Colección de Energía Nuclear, NG-G-3.1, Viena (Austria), 2007.



64. En las figuras A-5 y A-6 se presentan tendencias recientes o, cuando no se dispone de datos de series cronológicas, visiones generales de la aceptación pública de la energía nuclear en países que ya utilizan la energía nucleoelectrica (figura A-5) y en algunos países que carecen de ella (figura A-6). El valor en el eje vertical, el índice de aceptación pública (PAI), es el promedio de las encuestas analizadas para un país y un año dados, representado en una escala del 0 (rechazo total) al 100 (aprobación total).

65. Los PAI en los países que ya disponen de programas nucleoelectricos (figura A-5) son por lo general más altos que los de los países sin esos programas (figura A-6).

66. En la mayoría de los doce países con programas nucleoelectricos que se muestran en la figura A-5, se experimentó un incremento de la aceptación del público. Las dos excepciones fueron España y Alemania, ambos países con políticas de eliminación gradual de la energía nuclear. El tercer país de la figura A-5 con una política de eliminación gradual, Suecia, muestra un apoyo a la energía nucleoelectrica más sólido, estable y ligeramente mayor.

67. De los siete países sin programas nucleoelectricos indicados en la figura A-6, cinco están considerando la posibilidad de iniciar o reiniciar esos programas: Egipto, Indonesia, Italia, Polonia y Tailandia. En esos cinco países, los PAI superan el 50% o están cerca de esa cifra.

68. Los detalles de las encuestas que se analizaron para las figuras A-5 y A-6 contienen más información que la que se desprende de los resultados totales de las cifras, y pueden ayudar a diseñar programas de información pública para situaciones específicas. Por ejemplo, los resultados correspondientes a Hungría muestran una recuperación bastante rápida de los bajos niveles a los que cayó la aceptación del público tras un accidente relacionado con la limpieza de combustible en 2003. Esto indica la importancia de la aceptación del público en cuanto al funcionamiento seguro y sin incidentes de todas las instalaciones nucleares.

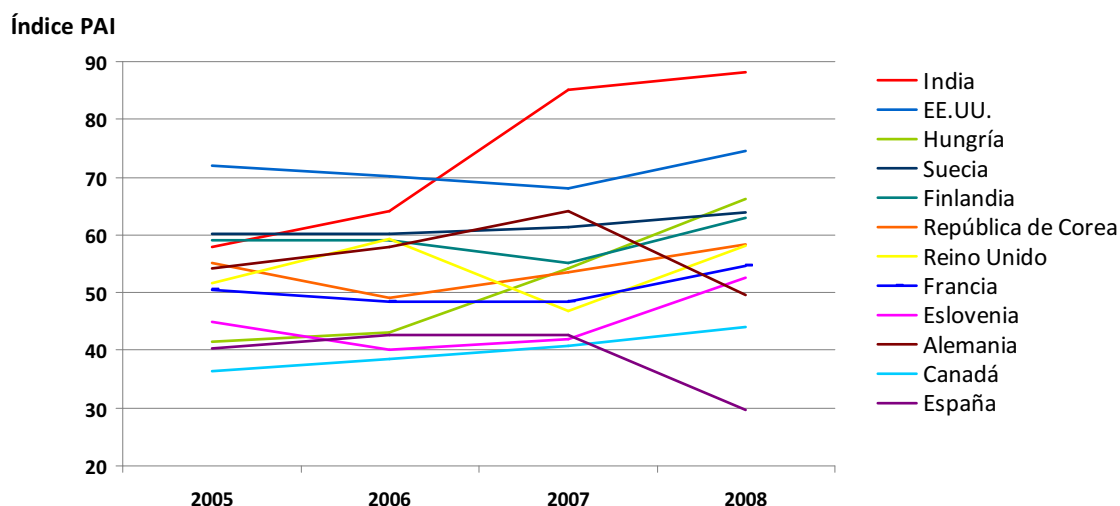


Fig. A-5. Aceptación del público en varios países que utilizan la energía nucleoelectrica.

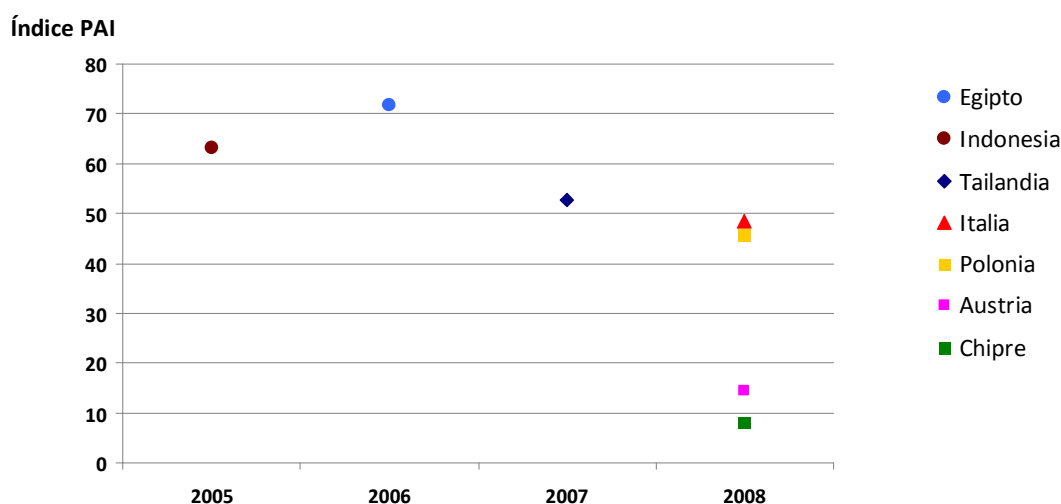


Fig. A-6. Aceptación del público en varios países que no utilizan la energía nucleoelectrica.

## B. Fisión avanzada y fusión

### B.1. Fisión avanzada<sup>15</sup>

#### B.1.1. Reactores refrigerados por agua

69. En China, los seis reactores cuya construcción comenzó en 2008 son PWR de 1000 MW(e), un diseño evolutivo basado en tecnología de la Generación II con modificaciones mínimas. El primer proyecto de PWR de la Generación III, basado en tecnología AP-1000, está avanzando sin complicaciones y la construcción comenzó en 2009.

70. En el Japón, Mitsubishi Heavy Industries ha desarrollado una versión de 1700 MW(e) del reactor avanzado de agua a presión (APWR) para el mercado estadounidense, el US-APWR, en relación con el cual se inició, en 2008, el proceso de la NRC de los Estados Unidos de certificación del diseño. La versión europea del APWR, el EU-APWR, también se presentó en 2008 para que se evaluara si cumple los requisitos europeos para compañías eléctricas.

71. En la República de Corea se inició en 2008 la construcción del primer reactor avanzado de potencia, APR-1400, el Shin-Kori 3.

72. En la Federación de Rusia comenzó en 2008 la construcción de las primeras unidades del WWER-1200, Novovoronezh 2-1 y Leningrad 2-1. Se cambiaron el contratista y el emplazamiento para los primeros reactores flotantes KLT-40S (dos reactores de 35 MW(e) cada uno), cuya construcción comenzó en 2007. La fecha fijada para la puesta en servicio pasó de 2010 a 2012.

<sup>15</sup> Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a los reactores de fisión avanzada en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>).

73. En 2008 se inició el proceso de la NRC de los Estados Unidos de certificación del diseño de una versión estadounidense del reactor europeo de agua a presión (EPR), así como el de una solicitud para modificar la certificación del diseño del AP-1000. Se presentó nueva documentación como parte del proceso previo a la presentación de la solicitud a la NRC para el PWR integrado de 335 MW(e) de Westinghouse llamado IRIS.

74. En el Canadá, la Atomic Energy of Canada Limited (AECL) está desarrollando un reactor CANDU avanzado, que incorpora un gran número de componentes normalizados, y que funciona con uranio ligeramente enriquecido para compensar la utilización de agua ligera como refrigerante primario. En 2008, la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear comenzó el examen del diseño del ACR-1000.

75. La India tiene dos reactores de agua pesada (HWR) de 540 MW(e) en funcionamiento. Está diseñando un HWR evolutivo de 700 MW(e) y un reactor avanzado de agua pesada (AHWR), que utilizará torio y estará moderado por agua pesada, un refrigerante de agua ligera hirviendo en tubos de presión verticales, y sistemas de seguridad pasivos.

### **B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos**

76. En 2008 se finalizó la labor de instalación de componentes para el reactor rápido experimental de China tipo piscina de 65 MW(t) (20 MW(e)). Se están llevando a cabo actividades de depuración. Se enviaron a la planta 250 toneladas de sodio de pureza nuclear y en abril de 2009 se llenaron los lazos primario y secundario.

77. La cámara del reactor del prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e) de la India fue finalizada en 2008 y la vasija de seguridad fue instalada en la cámara. La construcción civil de los edificios del PFBR que forman parte de la isla nuclear está casi terminada. Se han finalizado la pantalla termal, los paneles de aislamiento térmico, las cisternas de almacenamiento de sodio, las cisternas de sellado de argón, el recipiente del núcleo y la estructura de apoyo del núcleo, y casi se ha terminado la vasija principal.

78. El Japón finalizó la renovación del reactor MONJU y el ensayo de los componentes. También concluyeron la mayoría de los ensayos del sistema completo. No obstante, la nueva puesta en funcionamiento prevista se aplazó de 2008 a 2009. El Japón también inició un proyecto nacional de desarrollo de tecnología de ciclos de reactores rápidos con miras a comercializar la tecnología de reactores rápidos.

79. En la Federación de Rusia, se finalizó la construcción de las placas fundamentales del compartimiento del reactor y la sala de turbinas para el reactor rápido BN-800 en Beloyarsk. La puesta en servicio está prevista para 2012.

80. En Bélgica avanzaron las actividades de diseño del sistema primario, el diseño del núcleo y la disposición de la planta, de MYRRHA, un reactor rápido experimental subcrítico, para que sea compatible con el proyecto de la CE sobre un sistema experimental accionado por acelerador (XT-ADS). Con el fin de ensayar la vigilancia de la subcriticidad se está construyendo una instalación experimental, GUINEVERE, que combina un acelerador de deuterio continuo con un blanco de titanio-tritio instalado en un sistema multiplicador subcrítico rápido refrigerado por plomo. Está previsto que GUINEVERE sea operacional en marzo de 2010.

### **B.1.3. Reactores refrigerados por gas**

81. La instalación de ensayo con helio, puesta en servicio en 2007 para el reactor modular de lecho de bolas (PBMR) de Sudáfrica, permitió realizar los primeros ensayos de funcionamiento en plena escala de componentes críticos del sistema de control de la reactividad, el sistema de parada de reserva y el sistema de manipulación de combustible. En 2008, el Organismo Nacional de Reglamentación Nuclear de Sudáfrica concedió una licencia de puesta en servicio en caliente de la instalación avanzada de revestimiento de Pelindaba, lo que hizo posible comenzar a fabricar esferas de combustible en el marco del proyecto.

82. En el Japón, está previsto realizar antes de que finalice 2009 ensayos más estrictos del reactor experimental de alta temperatura (HTTR), de 90 días en total con 50 días a 950°C. En 2007 se realizó un primer ensayo a plena potencia de 30 días con la temperatura del refrigerante a la salida a 850°C, lo que confirmó las mejoras en la fabricación de partículas de combustible revestidas.

83. En los Estados Unidos de América, el proyecto de centrales nucleares de la próxima generación (NGNP) alcanzó un importante hito en 2008 al lograr que no se produjera ningún fallo del combustible durante prolongados períodos de irradiación (quemado del 9%) en el reactor experimental avanzado del Laboratorio Nacional de Idaho. Se trata de un gran logro en la demostración de la seguridad del combustible TRISO. El próximo objetivo es lograr un quemado del 16-18% antes de septiembre de 2009.

84. En China, el Consejo de Estado de la República Popular China aprobó el plan de ejecución relativo al reactor de demostración de alta temperatura refrigerado por gas. La licencia del proyecto está siendo examinada y se prevé iniciar la construcción a finales del año próximo.

### **B.1.4. El INPRO y el GIF**

85. El Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) del Organismo finalizó un exhaustivo manual sobre métodos para evaluar sistemas innovadores de energía nuclear, titulado *Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems*, que se publicó a principios de 2009 como documento IAEA-TECDOC-1575. Se realizaron un estudio de evaluación conjunto y seis nacionales utilizando métodos del INPRO para determinar vínculos débiles en la cadena de desarrollo, es decir, ámbitos prioritarios en cada caso para proseguir las actividades de investigación y desarrollo. El INPRO publicó un informe a principios de 2009 sobre *Consideraciones comunes para usuarios de países en desarrollo para futuras centrales nucleares*, en cuya redacción participaron 26 países además de los ya 30 miembros del INPRO. El Gobierno de Rusia decidió prestar, por primera vez, apoyo por varios años al INPRO, de 2008 a 2012.

86. Mediante un sistema de contratos y acuerdos, el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) coordina actividades de investigación sobre los seis sistemas de energía nuclear de la próxima generación seleccionados en 2002 y descritos en la publicación *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems*: los reactores rápidos refrigerados por gas (GFR), los reactores refrigerados por plomo, los reactores de sales fundidas, los reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR), los reactores refrigerados por agua supercrítica (SCWR) y los reactores de muy alta temperatura (VHTR). En 2008, China firmó un “acuerdo sobre sistemas” para participar en las actividades de colaboración relativas a los VHTR. Francia, el Japón y los Estados Unidos de América están armonizando las actividades

sobre los prototipos de SFR, incluidos los objetivos del diseño, los principios de seguridad, la configuración de sistema, el nivel de potencia, el tipo de combustible, las reducciones de costos mediante la innovación, los calendarios y las fechas objetivo para los prototipos y las infraestructuras conexas. Se están llevando a cabo proyectos específicos sobre integración de sistemas, seguridad y funcionamiento, combustible avanzado, equilibrio de la planta, y la “demostración internacional del ciclo completo de los actínidos”.

## **B.2. Fusión**

87. En febrero de 2008, la Organización Internacional de Energía de Fusión del ITER solicitó oficialmente un permiso de construcción para el Reactor termonuclear experimental internacional (ITER), un reactor de fusión experimental, en Cadarache (Francia).

88. En octubre de 2008 se conmemoraron cincuenta años de investigación internacional sobre la fusión en la 22ª Conferencia del OIEA sobre energía de fusión (FEC 2008) en Ginebra (Suiza). La FEC 2008 se celebró en el mismo lugar que la segunda Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre la utilización de la energía atómica con fines pacíficos en 1958, momento en que se había dado libre acceso a la información sobre la fusión para su debate público. En la FEC 2008 se presentó un número sin precedentes, más de 500, de memorias científicas.

89. También en la FEC 2008 se firmó un acuerdo de cooperación entre el Organismo y la organización del ITER. El alcance de la cooperación incluye el intercambio de información, el análisis de la contribución de la fusión a los escenarios futuros de la energía nucleoelectrónica, la capacitación, las publicaciones, la organización de conferencias científicas, las investigaciones sobre la física del plasma y la elaboración de modelos, y la seguridad tecnológica y física de la fusión. El acuerdo está concebido para facilitar las interacciones entre las partes en el ITER y otros Estados Miembros del Organismo que están interesados en las investigaciones sobre la fusión pero que no son miembros del ITER.

90. Además de los avances en relación con el ITER, laboratorios de fusión de Bélgica, Brasil, Canadá, China, Federación de Rusia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República Islámica del Irán y Tailandia están desarrollando una red de investigación de usuarios de pequeños dispositivos de fusión. El Organismo participa y, entre otras cosas, coordina las investigaciones con pequeños tokamak por medio de experimentos conjuntos destinados a promover la colaboración internacional, la planificación de redes y la enseñanza de jóvenes científicos.

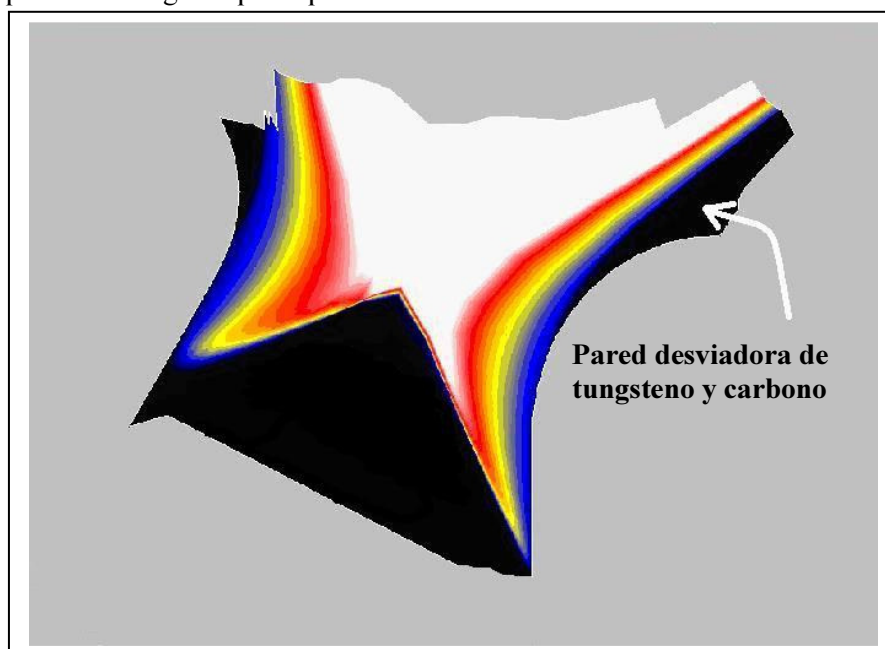
## **C. Datos atómicos y nucleares**

91. Con el aumento de las expectativas relativas a la energía nucleoelectrónica, los progresos en la esfera de la fusión y una nueva generación de reactores de fisión, en varias memorias y charlas en la Conferencia Internacional sobre la física de reactores (PHYSOR'08) se destacaron los esfuerzos que se están desplegando, también en el Organismo, para satisfacer las necesidades de datos nuevos y actualizados sobre fisión y secciones eficaces de captura correspondientes a los actínidos, la necesidad de reducir las incertidumbres y de disponer de datos que se precisan para implementar el reciclaje del combustible gastado.

92. En una reunión del Subcomité de datos atómicos y moleculares para la fusión, del Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión (CIIF), celebrada en 2008, se examinaron cuestiones relativas a la interacción plasma-pared en reactores de fusión que da lugar a la formación de partículas de polvo y cuestiones conexas de seguridad sobre retención de tritio, comportamiento pirofórico, manipulación e inhalación. Se recomendó que el Organismo iniciara proyectos coordinados de investigación multinacionales para estudiar el tamaño, la composición y el origen del polvo y los datos espectroscópicos, de colisiones y de pulverización catódica correspondientes al tungsteno como posible candidato para dispositivos de fusión (en la figura C-1 se puede ver un ejemplo de cómo se utilizan esos datos). Además, a fin de cuantificar el daño por radiación y la activación de componentes estructurales de nuevos dispositivos de fusión, es necesario actualizar y ampliar la Biblioteca de datos nucleares evaluados sobre fusión (FENDL) que se emplea para estudios de diseños y para establecer parámetros de las propiedades de materiales de importancia para el ITER.

93. Como parte del apoyo mediante supercomputadoras para la preparación de modelos de dispositivos de fusión que se está organizando en el marco del Acuerdo Europeo para el Desarrollo de la Fusión, en mayo de 2009 se inauguró un centro de informática para fusión de alto rendimiento en el Centro de Supercomputación de Jülich, en Alemania.

94. La irradiación directa de los tumores en los pacientes, mediante partículas cargadas producidas en aceleradores, permite que la dosis administrada en el blanco sea muy precisa y no se afecte al tejido sano circundante. En breve dos nuevos centros de terapia con hadrones estarán en funcionamiento en Heidelberg (Alemania) y Pavia (Italia). Reconociendo la necesidad de datos exactos para diseñar y planificar las instalaciones de tratamiento de pacientes, se está dando prioridad a la realización de actividades internacionales coordinadas destinadas a cuantificar y recomendar datos actualizados sobre las interacciones de las partículas cargadas para aplicaciones médicas.



*Fig. C-1. Simulación por computadora del perfil de temperatura de la zona de desviación de un dispositivo de fusión. Las temperaturas oscilan entre ~ 200 000 (azul) y 1 000 000 (rojo) grados Kelvin, nivel cercano a la temperatura en el centro del sol. Para este estudio, en cuyos cálculos se utilizó el modelo informático B2-IRENE (Centro de Investigación de Jülich), se precisó una enorme cantidad de datos atómicos y moleculares fiables, muchos de los cuales se han extraído y recopilado a partir de varios proyectos coordinados de investigación recientes del Organismo.*

## **D. Aplicaciones de los aceleradores y de los reactores de investigación**

### **D.1. Aceleradores**

95. Un medio importante de fomentar la competencia de los países en desarrollo en ciencia nuclear consiste en establecer una instalación de acelerador y utilizarla con eficacia en actividades de enseñanza y capacitación nucleares, así como para adquirir experiencia práctica en todas las aplicaciones conexas. A fin de ampliar aun más las oportunidades de enseñanza en las regiones en desarrollo, el Organismo promueve la cooperación internacional para aprovechar las competencias técnicas e instalaciones existentes, por ejemplo, en Sudáfrica, en beneficio de posibles asociados regionales, como Ghana y Nigeria.

96. Los métodos analíticos desarrollados en fuentes de radiación sincrotrónica facilitan el conocimiento de nuevos materiales y materiales biológicos. Nuevas técnicas desarrolladas mediante fuentes convencionales de rayos X más pequeñas ya se aplican en sincrotrones como el ANKA de Alemania y también se prevé utilizarlas en la instalación Elettra de Italia. Este método aprovecha las características superiores de los rayos X generados por radiación sincrotrónica y, por consiguiente, proporciona una mayor sensibilidad analítica y mejora la fiabilidad.

97. Gracias a los adelantos en tecnología e instrumentación de haces iónicos ha aumentado la utilización de haces de protones e iones centrados en investigaciones biomédicas, en particular las relativas a los efectos de la radiación en las células vivas. En noviembre de 2008 entró en funcionamiento en el Reino Unido el primer nanohaz centrado de barrido vertical para investigaciones básicas, que permitirá obtener nuevos datos sobre sensibilidad de los tumores cancerosos a las radiaciones, así como sobre los procesos que pueden provocar el cáncer y sobre los riesgos de la exposición a fuentes radiactivas de baja actividad. Mediante este nuevo nanohaz de protones los investigadores dispondrán por primera vez en el mundo de haces de protones de escala nanométrica para centrar e irradiar con gran precisión puntos concretos en células humanas. Esto permitirá aclarar las interacciones entre los fármacos quimioterapéuticos y la irradiación y ayudará a los clínicos a determinar la eficacia de las diferentes estrategias de tratamiento oncológico.

### **D.2. Reactores de investigación**

98. Una de las principales aplicaciones de los reactores de investigación es la producción de radioisótopos. En 2008 surgieron problemas debido a la imposibilidad de seguir utilizando algunos reactores más antiguos para producir radioisótopos, lo cual generó preocupación acerca de la seguridad de los suministros de radioisótopos (en particular, de molibdeno 99) para aplicaciones médicas e industriales de importancia vital. Es probable que en lo inmediato la única ampliación de la capacidad consista en la incorporación del nuevo reactor OPAL de Australia, que funcionó por primera vez a plena potencia en 2006. Una serie de centros de reactores nacionales están estudiando con el Organismo la posibilidad de aumentar la capacidad mediante el aprovechamiento de reactores actualmente infrautilizados. En la sección I, dedicada a los radioisótopos, se facilita más información a este respecto.

99. El primer reactor de investigación de Marruecos, un reactor de tipo TRIGA Mark-II (2 MW) alcanzó la criticidad inicial en mayo de 2007; en junio alcanzó plena potencia y en septiembre de ese año se completaron todos los ensayos necesarios. Este reactor se encuentra en el Centro de Estudios Nucleares de Maâmora (CENM), situado a unos 25 km al norte de

Rabat. Utiliza combustible de UPE y está diseñado para una futura ampliación de capacidad hasta 3MW. La instalación se utilizará para capacitación del personal, producción de isótopos, suministros de servicios analíticos; como análisis por activación neutrónica y examen no destructivo; e investigación básica en física del estado sólido y de reactores.

100. Habida cuenta de que, según las proyecciones, el número de reactores de investigación se reducirá de 245 en la actualidad a un total de entre 150 y 200 en 2020, será preciso potenciar la cooperación internacional para asegurar un mayor acceso a esas instalaciones y su utilización más eficiente. A tal efecto, el Organismo ha empezado a establecer una serie de redes regionales: la Iniciativa sobre reactores de investigación de Europa oriental (EERRI), la Coalición de Reactores de Investigación del Caribe (CRRC), la Red de utilización de reactores de investigación en la región del Mediterráneo (M-RRUN) y la Red de utilización de reactores de investigación en la región del Báltico (B-RRUN). Otra red sobre tensiones residuales y análisis de texturas para asociados industriales (STRAINET) se centra más en una aplicación concreta que en una región. Estas redes también contribuirán a mejorar las instalaciones existentes, desarrollar nuevas instalaciones y ampliar el acceso para los países que no tienen reactores de investigación. El nuevo reactor de Marruecos estará abierto a la comunidad de usuarios nacionales e internacionales mediante un sistema de repartición del tiempo y contribuirá a impulsar tanto la colaboración como el establecimiento de redes y de coaliciones de reactores de investigación a nivel regional.

101. El objetivo del programa de enriquecimiento reducido para reactores de investigación y ensayo (RERTR) – establecido en el marco de la Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM) – es convertir los reactores de investigación que utilizan combustible de uranio muy enriquecido (UME) en reactores que utilicen combustible de uranio poco enriquecido (UPE). A finales de 2008, 62 reactores de investigación de todo el mundo que utilizaban combustible de UME se habían parado o convertido para la utilización de combustible de UPE, y se prevé convertir otros 39 para la utilización de combustibles existentes que cumplen los requisitos necesarios. En octubre de 2008 el programa RERTR celebró su 30º aniversario con ocasión de su reunión anual en Washington DC.

102. Para utilizar los combustibles avanzados de uranio-molibdeno de muy alta densidad, cuyo desarrollo y cualificación aún no ha concluido, será preciso convertir otros 28 reactores de investigación. La labor relativa a esos combustibles se puso en marcha a principios de los años noventa, pero tropezó con dificultades debido a la dilatación de la capa de reacción que se forma entre el combustible y la matriz de aluminio durante la irradiación. Estas investigaciones están a cargo de un Grupo Internacional de Trabajo sobre desarrollo de combustibles, integrado por Alemania, la Argentina, Bélgica, el Canadá, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia y la República de Corea. Si bien se ha avanzado bastante en muchos aspectos, todavía será preciso realizar nuevos progresos y ensayos importantes para lograr el objetivo del programa RERTR de ofrecer a finales de 2011 un combustible que reúna los requisitos necesarios.



## E. Tecnologías nucleares en la agricultura y la alimentación

### E.1. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias

103. Las tecnologías nucleares y de sectores conexos contribuyen a mejorar la productividad pecuaria. Se emplean isótopos de carbono, hidrógeno, azufre, fósforo o nitrógeno para estudiar la conversión y absorción de los nutrientes del forraje y evaluar la función de los microbios del rumen de los animales en la digestión del forraje. Estos microorganismos, que viven en el tracto gastrointestinal de los rumiantes, convierten los componentes del forraje en útiles fuentes de energía y proteínas.

104. Mediante el marcado directo del ADN es posible reconocer y seleccionar características genéticas que permitan, por ejemplo, lograr carne más magra y aumentar la producción de leche o la tolerancia a las enfermedades. El marcado isotópico se utiliza para determinar el parentesco de los animales o el origen de los productos, así como para prestar asistencia a los países en desarrollo a fin de que puedan acceder a los mercados de exportación.

105. Los isótopos estables son ‘registros ecológicos’ de la naturaleza que sirven para estudiar el movimiento de los animales. Los perfiles de carbono 13 y nitrógeno 15 pueden indicar el origen y las zonas de reproducción de las aves migratorias y, por ende, facilitar la evaluación de riesgos y la predicción de la propagación de enfermedades (por ejemplo, la gripe aviar). Los trazadores más eficaces disponibles en la actualidad son los isótopos de hidrógeno que se encuentran en tejidos metabólicamente inertes de crecimiento estacional, como las plumas y las uñas. Una vez establecido el perfil isotópico de una población de aves o de un ecosistema determinados, cualquier espécimen proporciona información sobre la migración de esa especie en el mundo o a partir de ese punto de referencia. Mediante la base de datos de la Red Mundial sobre Isótopos en las Precipitaciones (GNIP), establecida por el Organismo en colaboración con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se elaboran redes isotópicas del hidrógeno y el oxígeno del agua, que se comparan en diferentes lugares con los perfiles de las plumas de las especies de aves migratorias para determinar en cuáles se ha producido el crecimiento de las plumas y de esa manera establecer el origen de dichas aves.<sup>16</sup>

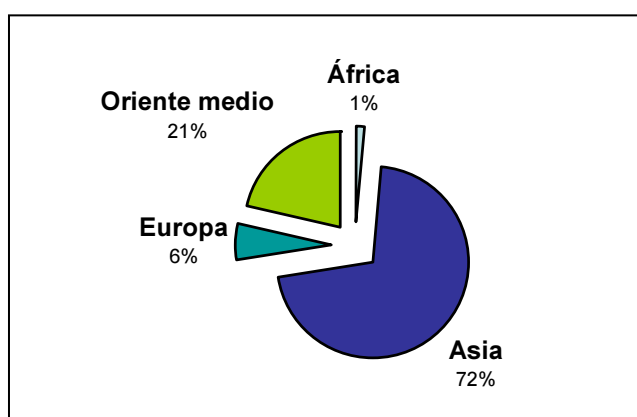


FIG. E-1. Distribución geográfica de los brotes de gripe aviar (subtipo H5N1) en aves de corral desde 2003 hasta 2008; Fuente: Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE).

<sup>16</sup> Para más información sobre la labor del OIEA en este ámbito, puede consultar la dirección <http://www-naweb.iaea.org/nafa/aph/index.html>

## **E.2. Investigaciones sobre vacunas**

106. La inactivación de patógenos mediante irradiación está revolucionando las investigaciones sobre vacunas. Esas vacunas tratadas estimulan una respuesta inmunitaria de protección similar a la que provocan los patógenos vivos y superior a la conseguida mediante tratamiento térmico o químico. La irradiación ofrece nuevas oportunidades de prevenir enfermedades como la nagana, la fiebre aftosa, la fascioliasis y la neospora en el ganado, en cuyo caso las vacunas genéticamente manipuladas han tenido escaso éxito. Estudios recientes indican que se ha logrado mejorar la protección alterando la expresión genética en patógenos mediante la administración cuidadosa de dosis de radiación.

107. El conocimiento adecuado de las diferencias genéticas raciales e individuales en cuanto a la resistencia a enfermedades infecciosas proporciona medios alternativos de abordar las enfermedades de los animales mediante la determinación de los marcadores genéticos asociados con esa resistencia. Estos métodos abarcan el uso de nucleótidos radiomarcados en hibridación de ADN, como caracterización del ADN, y procedimientos de mapeo híbrido por radiación. La adquisición de información genética relativa a las especies pecuarias es fundamental para poder aprovechar los beneficios de la variación genética de rasgos que presentan importantes ventajas económicas. Este proceso se facilita en gran medida colocando marcadores moleculares en los cromosomas seleccionados.

108. Los mapas híbridos elaborados por radiación-fragmentación de los cromosomas en líneas celulares híbridas pueden utilizarse para determinar la presencia de marcadores de ADN o para efectuar un mapeo genético comparativo a fin de identificar los genes que puedan corresponder a determinados rasgos. Si bien se han hecho progresos considerables en la secuenciación del genoma de los bovinos, no ha sucedido lo mismo en el caso de los ovinos y los caprinos. Es preciso elaborar con urgencia mapas híbridos por radiación sobre los locus de rasgos cuantitativos (QTL) correlacionados con la resistencia a las enfermedades y la productividad (producción de leche, y calidad de la res sin despojos y de la lana). La inversión en estas tecnologías, junto con los análisis mediante fósforo 32, azufre 35, metionina marcada con azufre 35 y yodo 125 para vigilar la productividad y la reproducción, permitirá obtener mejores resultados.

## **E.3. Lucha contra plagas de insectos**

### **E.3.1. Esterilización de insectos mediante irradiación con rayos X**

109. Las actuales dificultades en la obtención y el transporte de isótopos para irradiación han puesto de relieve la necesidad de evaluar con urgencia la posible sustitución de la irradiación gamma por los rayos X. La labor de adaptación de un irradiador de rayos X RS2400 para la esterilización de insectos ha avanzado mediante la introducción de un sistema giratorio mejorado y de nuevos contenedores de resina reforzada con fibras de carbono que incluyen filtros de acero, lo cual permite lograr un coeficiente de uniformidad de la dosis aceptable, inferior a 1,3. También se ha revisado el programa de control para poder seleccionar la cantidad de energía que ha de administrarse a los insectos.

110. Mediante bioensayos se ha evaluado la eficacia relativa de los sistemas de irradiación con rayos X y de irradiación gama en cuanto a la calidad de los insectos sometidos a la técnica de los insectos estériles (TIE). Después de administrar las mismas dosis nominales a pupas de mosca de la fruta mediante la máquina de rayos X y el irradiador gamma se las evaluó en las mismas condiciones para determinar las correspondientes tasas de eclosión de

adultos, de supervivencia y de esterilidad. También se realizaron pruebas con jaulas sobre el terreno para evaluar en condiciones similares a las del terreno las diferencias de competitividad del apareo en los machos tratados con rayos gamma y con rayos X. Mediante la aplicación de procedimientos dosimétricos después del tratamiento se determinaron las dosis reales recibidas por las pupas<sup>17</sup>. Datos preliminares sobre el nivel de fertilidad residual y sobre la eclosión y el comportamiento normales de los adultos de *Bactrocera cucurbitae* (mosca del melón), *Ceratitis capitata* (mosca mediterránea de la fruta) y *Anastrepha fraterculus* (mosca sudamericana de la fruta) – que constituyen importantes plagas en Asia, África y las Américas – sugieren que los resultados del tratamiento de estas especies con rayos gamma y con rayos X no presentan diferencias.

### **E.3.2. Aplicación de la TIE para luchar contra la mosca tsetsé**

111. Se están adoptando medidas para prestar apoyo a Estados Miembros de África con respecto a la transferencia de la TIE para luchar contra la mosca tsetsé en zonas prioritarias. Estas actividades abarcan a Etiopía (*Glossina pallidipes*), KwaZulu-Natal en Sudáfrica y Mozambique (*G. austeni* y *G. brevipalpis*), y el Senegal, donde el Gobierno tiene un programa para la erradicación de *G. palpalis* en Niayes, región de alta densidad pecuaria situada al noreste de Dakar.

112. En el Senegal, gracias a la reunión de datos entomológicos de referencia, sobre la base de los cuales se han elaborado mapas precisos de distribución de la mosca tsetsé con ayuda de instrumentos espaciales modernos, modelos matemáticos y estudios de genética de las poblaciones, se ha podido demostrar que la población de moscas tsetsé en la región de Niayes está totalmente aislada del resto del cinturón infestado por este insecto. Esto ofrece la posibilidad de mantener una zona libre de la mosca tsetsé. Los estudios realizados indican que la TIE será un componente esencial de un enfoque integrado; se prevé realizar a comienzos de 2009 pruebas de suelta de moscas estériles procedentes de Burkina Faso.

## **E.4. Calidad e inocuidad de los alimentos**

### **E.4.1. La trazabilidad como medio para luchar contra los contaminantes alimentarios y mejorar la inocuidad de los alimentos**

113. El uso de productos agroquímicos, como plaguicidas y medicamentos veterinarios, es fundamental para la producción agrícola, teniendo en cuenta sobre todo la necesidad de aumentar la productividad para afrontar a la actual crisis alimentaria mundial. Sin embargo, los residuos de estas sustancias en los alimentos, y otros contaminantes naturales y ambientales, como las micotoxinas y los contaminantes orgánicos persistentes, suponen riesgos para la salud humana y pueden crear obstáculos para el comercio agrícola. Factores mundiales como el cambio climático y la transformación de las prácticas de producción agropecuaria también pueden agravar los problemas relacionados con los contaminantes alimentarios.

114. Para luchar contra estos riesgos es preciso adoptar un método holístico que abarque toda la cadena de producción alimentaria y se base en la aplicación de directrices encaminadas a reducir al mínimo esos riesgos y en mecanismos de retroinformación que aseguren la eficacia de los controles. Un elemento esencial de este método es la capacidad de rastrear el origen de

---

<sup>17</sup> Se puede consultar información acerca de la base de datos sobre esterilización de los insectos, y de cómo acceder a ella, en la dirección <http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/index.html>

los alimentos – la “trazabilidad” – para facilitar la aplicación de medidas correctivas cuando se detecte una contaminación. Las técnicas isotópicas presentan claras ventajas a este respecto y – cuando se las utiliza en combinación con la tecnología convencional – pueden aprovecharse para aportar sólidos mecanismos de trazabilidad de los alimentos y sistemas de vigilancia de los contaminantes alimentarios. Incluso cuando el principal objetivo no es asegurar la inocuidad de los alimentos, la capacidad de establecer su origen y autenticidad mediante la aplicación de técnicas basadas en relaciones de isótopos estables puede ser importante para los exportadores, ya que dicha capacidad puede añadir un valor considerable a los productos procedentes de determinadas regiones. Las técnicas isotópicas son un instrumento sin igual para estudiar los factores ambientales que provocan la contaminación de los alimentos y cuya importancia es cada vez mayor habida cuenta de las previsiones relativas a la evolución del cambio climático.

115. Se ha comprobado que las técnicas de medición comparativa de isótopos estables como los del estroncio, son excelentes instrumentos para rastrear el origen de una variedad de productos alimenticios. La abundancia relativa de isótopos del estroncio en las plantas depende de la composición isotópica de dicho elemento en el medio ambiente donde éstas crecen. La medición de las relaciones de isótopos del estroncio en las plantas proporciona la ‘huella digital’ de su lugar de origen. Esto se ha demostrado con respecto a diversos productos de origen tanto vegetal (por ejemplo, espárragos) como animal (por ejemplo, el perfil isotópico del estroncio en la leche guarda relación con el lugar de pastoreo del ganado). Otras relaciones de isótopos, como hidrógeno/deuterio/tritio, nitrógeno 14/nitrógeno 15, carbono 13/carbono 12, y oxígeno 18/oxígeno 16, pueden utilizarse para esos mismos fines o bien para aportar datos complementarios.

## **E.5. Mejora de los cultivos**

116. La inducción de mutantes con determinadas características es importante para impulsar la producción de diversos cultivos alimentarios<sup>18</sup>. En los últimos años el rápido desarrollo de la biología molecular ha aportado información de dominio público sobre la constitución genética de los organismos vivos. En esta ‘era de la genómica’ los científicos están descifrando los códigos genéticos de un número cada vez mayor de organismos, incluidos los cultivos.

117. Revisten particular importancia los métodos que promueven la mutación reforzando o suprimiendo determinadas características genéticas naturales para producir variedades mejoradas de cultivos. La inducción de mutaciones ya no se basa tanto en la ampliación de la base genética de los cultivos para obtener nuevas especies como en la incorporación de investigaciones de biología molecular, lo cual ha supuesto una expansión considerable de la labor científica relacionada con la mutagénesis de cultivos.

118. La tendencia actual a aumentar los niveles de eficacia en la obtención de especies mediante la inducción de mutaciones consiste en integrar estratégicamente en los procesos aspectos pertinentes de innovaciones biotecnológicas. A continuación se examinan dos de esas estrategias: una de ellas destinada a identificar rápidamente partes mutadas del material genético para llevar a cabo investigaciones de nivel superior, y la otra para una integración uniforme de las biotecnologías en la generación e identificación de mutantes.

---

<sup>18</sup> Se puede consultar información adicional en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>), o en la dirección <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/Agenda/index.html>

### **E.5.1. Identificación de genes y dilucidación de funciones mediante la inducción de mutantes**

119. La estrategia tradicional en la inducción de mutaciones para mejorar los cultivos – conocida como ‘genética directa’ – consistía en determinar la función de los genes a partir de la observación de las características modificadas de los mutantes. La información que aporta la biología molecular favorece, en cambio, la adopción de un procedimiento inverso: cada vez se tiende más a partir del estudio de las modificaciones a nivel molecular para luego relacionarlas con las características alteradas de los cultivos.

120. Esta estrategia más reciente – conocida como ‘genética inversa’ – se basa en la disponibilidad de existencias de mutantes bien caracterizados de los principales cultivos, por ejemplo, arroz, maíz, cebada y trigo. Se han elaborado protocolos que permiten ampliar considerablemente la escala de los procedimientos para la búsqueda simultánea de mutaciones en miles de mutantes en partes seleccionadas del material genético. La genética inversa se ha convertido en un instrumento decisivo para identificar genes y dilucidar funciones.

### **E.5.2. Integración de tecnologías para mejorar la inducción de mutaciones**

121. La principal razón para mejorar la eficacia en la aplicación ordinaria de la inducción de mutaciones ha sido, entre otras, la necesidad de generar grandes poblaciones de mutantes y de identificar en el menor tiempo posible los mutantes que se desee obtener. Los avances en la biología de las células y los tejidos, en particular los que aprovechan la capacidad de cada célula para desarrollar la planta entera (fenómeno conocido como ‘totipotencia’), permiten generar rápidamente grandes poblaciones de mutantes.

122. Es posible desarrollar decenas de miles de mutantes en condiciones de asepsia en tubos de ensayo de laboratorio y, después de extraer su ADN, estudiar determinadas características (por ejemplo, resistencia a toxinas patógenas, tolerancia a la sal) en el tubo de ensayo o bien buscar mutaciones de partes seleccionadas del material genético mediante instrumentos neutros de biología molecular. En cualquier caso, se reduce considerablemente el tamaño de las poblaciones que pueden evaluarse sobre el terreno, con el consiguiente ahorro de recursos humanos y financieros. Entre las tendencias actuales de la investigación figura la agrupación de estos instrumentos en paquetes tecnológicos para mejorar la eficacia en la obtención de variedades de los principales cultivos mediante fitotecnia basada en la inducción de mutaciones.

## **E.6. Ordenación sostenible de las tierras y los recursos hídricos**

### **E.6.1. El estudio de la influencia de los microorganismos en la calidad y fertilidad del suelo en condiciones de cambio climático cambiantes<sup>19</sup>**

123. Las comunidades microbianas desempeñan un papel importante en relación con la fertilidad del suelo mediante la descomposición de los residuos de cultivos, del estiércol y de la materia orgánica del suelo. Estos microbios suelen verse afectados por las variaciones en los regímenes de precipitaciones y de temperaturas que conlleva el cambio climático. Algunos avances recientes en la utilización de isótopos estables – por ejemplo, carbono 13,

---

<sup>19</sup> En la dirección <http://www-naweb.iaea.org/nafa/swmn/index.html> figura información relativa a la ordenación de los suelos y los recursos hídricos.

nitrógeno 15 y oxígeno 18 – como biomarcadores para caracterizar comunidades microbianas y sus interacciones con los procesos de los nutrientes y la materia orgánica del suelo – el llamado ‘análisis de isótopos estables’ (SIP) – tienen aplicaciones importantes en la gestión de las interacciones suelo-agua-nutrientes.

124. El SIP ayuda a conocer las interacciones entre las comunidades microbianas del suelo y sus funciones específicas en el secuestro del carbono, la estabilización de la materia orgánica, la fertilidad, la capacidad de recuperación y el potencial productivo del suelo, con miras al establecimiento sostenible de prácticas agropecuarias intensivas.

125. Este tipo de análisis, que abarca la introducción de un sustrato marcado con isótopos estables en una comunidad microbiana del suelo para determinar su destino final, permite realizar observaciones directas de la asimilación de dicho sustrato en comunidades de microorganismos con un mínimo de perturbación. De esta manera es posible identificar los microorganismos que participan activamente en determinadas transformaciones metabólicas en condiciones parecidas a las que intervienen en los procesos naturales.

#### **E.6.2. Utilización de trazadores isotópicos estables para apoyar el control de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de tierras agrícolas**

126. Las pérdidas de nitrógeno procedentes de fertilizantes químicos, del riego con aguas residuales y del estiércol pueden contaminar el agua. Es posible reducir estos efectos mejorando las prácticas de gestión agrícola mediante la aplicación correcta de los fertilizantes nitrogenados y aprovechando zonas ribereñas u hondonadas húmedas en los terrenos agrícolas en declive para eliminar los nitratos de las escorrentías superficiales y subsuperficiales. Los nitratos que fluyen por las zonas ribereñas o las hondonadas húmedas están sujetos a procesos microbianos que los convierten en óxido nitroso ( $N_2O$ ) y en dinitrógeno ( $N_2$ ). El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero de larga duración que puede contribuir a la degradación de la capa de ozono. Recientemente se han usado nitratos enriquecidos con nitrógeno 15 para cuantificar no sólo la eliminación del nitrato sino también las tasas de generación de  $N_2O$  y de  $N_2$  en hondonadas húmedas de cuencas agrícolas. Mediante el nitrógeno 15 se comprobó que esas hondonadas son fuentes de emisiones de  $N_2O$  cuando las concentraciones de trióxido de nitrógeno ( $NO_3$ ) no están limitadas, pero pueden funcionar como sumideros eficaces de  $N_2O$  cuando los niveles de  $NO_3$  son bajos. Estos resultados ofrecen una solución equilibrada para el uso de las hondonadas húmedas, que combina la consecución de los objetivos en materia de calidad del agua (eliminación del  $NO_3$ ) con el control de las emisiones de gases de efecto invernadero (reducción al mínimo de las emisiones de  $N_2O$ ) mediante el uso de corrientes de derivación artificiales para regular la descarga de nitratos en las hondonadas húmedas en momentos de gran aflujo. De esta manera se aumenta el tiempo de retención y se mejoran las condiciones que limitan las concentraciones de nitratos, sin generar emisiones de  $N_2O$ . Tanto los planificadores agrícolas como los encargados de la ordenación de los recursos necesitan recurrir al nitrógeno 15 para poder distinguir entre la emisión de  $N_2O$  y de  $N_2$  y la eliminación de  $NO_3$ .

## **F. Salud humana**

### **F.1. Vínculos entre la formación de imágenes en medicina nuclear y la industria farmacéutica**

127. La formación de imágenes se utiliza cada vez más como biomarcador para evaluar el desarrollo de nuevos medicamentos. A medida que aumenta el número de ensayos clínicos realizados en países en desarrollo resulta cada vez más evidente la importancia capital de introducir enfoques innovadores en el desarrollo de nuevos productos farmacéuticos.

128. La formación de imágenes desempeña un papel fundamental en el descubrimiento de los medicamentos y el desarrollo temprano de aplicaciones clínicas. En este contexto tanto la fluorodesoxiglucosa (FDG) como la tomografía por emisión de positrones (PET) combinada con la tomografía computarizada (TC) son medios útiles no sólo para diagnosticar y determinar el grado de gravedad de las enfermedades sino también para el seguimiento y la cuantificación de los beneficios del tratamiento. En el desarrollo de medicamentos estas técnicas podrían aplicarse en la identificación y clasificación de pacientes que reúnan los requisitos para participar en ensayos clínicos y posteriormente en la cuantificación de los resultados del tratamiento. La convergencia de la clasificación y el diagnóstico, o la cuantificación de los beneficios de los tratamientos tanto en las investigaciones como en el tratamiento clínico, constituye una importante novedad que puede suponer beneficios considerables para la industria farmacéutica y, en última instancia, para los pacientes.<sup>20</sup>

### **F.2. Aplicación de técnicas nucleares en la esfera de la nutrición**

129. La creciente prevalencia de las enfermedades no transmisibles está creando graves problemas sanitarios. Tanto los países industrializados como los países en transición afrontan una variedad cada vez más amplia de enfermedades, incluidas la diabetes tipo II y las cardiopatías. En cambio los países en desarrollo se ven afectados simultáneamente por problemas de desnutrición y de hipernutrición. Esta es, indudablemente, la cuestión más importante entre las prioridades sanitarias mundiales y en muchos países se ve agravada por la crisis del VIH/SIDA.

130. Los grupos de población más vulnerables son las mujeres embarazadas, las madres lactantes y los niños pequeños. Los adelantos técnicos recientes se han centrado en el descubrimiento de un eslabón perdido en la esfera de la nutrición y la salud del lactante: la evaluación de la composición corporal para entender mejor la calidad del crecimiento durante la lactancia y su relación con la posterior aparición de enfermedades crónicas. Las técnicas nucleares proporcionan instrumentos imprescindibles para evaluar la composición corporal, en particular, las técnicas isotópicas para medir el agua corporal total, y la absorciometría de rayos X de energía dual para determinar la masa ósea. Estas técnicas son el mejor instrumento disponible para evaluar la composición corporal y, por consiguiente, se utilizan para validar otras técnicas, como el análisis de impedancia bioeléctrica.

131. La estructura y la función del cuerpo al comienzo de la vida determinan el estado de salud tanto a corto como a más largo plazo. Existen etapas críticas durante las cuales la

---

<sup>20</sup> Se da respuesta a las preguntas más frecuentes sobre la PET y las tecnologías conexas en la dirección <http://www-naweb.iaea.org/nahu/nm/faqanswers.asp#pet>.

nutrición puede influir (positiva o negativamente) en la biología del crecimiento físico y en el estado de salud: los períodos de crecimiento rápido durante el desarrollo del feto y en los dos primeros años de la vida. Las intervenciones nutricionales en esas etapas son el mejor medio para prevenir las consecuencias a más largo plazo de la desnutrición en la edad temprana, incluidas las derivadas del crecimiento intrauterino limitado y del retraso del crecimiento. Es preciso elaborar con urgencia estrategias eficaces para intervenir en estas etapas iniciales a fin de prevenir el posterior desarrollo de enfermedades crónicas.<sup>21</sup>

### **F.3. Avances en formación de imágenes cuantitativas y en dosimetría interna para la medicina nuclear**

132. La tan buscada “bala mágica”, una sustancia verdaderamente específica que mate células cancerosas sin dañar el tejido sano, se está convirtiendo poco a poco en una realidad en la medicina nuclear terapéutica. Se trata de un principio cuya eficacia se ha demostrado durante más de 50 años de utilización del radioisótopo yodo 131 para el tratamiento de varias enfermedades de la tiroides. En la actualidad se dispone de sustancias de bioingeniería más sofisticadas que permiten tratar un mayor número de enfermedades. Unas pocas ya se han aprobado para su uso clínico, pero muchas otras están siendo sometidas a ensayos clínicos, en algunos casos con la participación directa del Organismo. Un aspecto clave de la evaluación de la eficacia de esos nuevos compuestos radiomarcados consiste en cuantificar la distribución y determinar la dosis de radiación absorbida tanto en el lugar de la enfermedad como en los tejidos sanos vitales.

133. Las imágenes de medicina nuclear suelen utilizarse para tareas de detección, como la identificación de defectos de perfusión, o de cuantificación, por ejemplo, el cálculo de la fracción de eyección ventricular izquierda, el valor de captación estándar (SUV) o la dosis absorbida en los órganos<sup>22</sup>. Durante los últimos 15 años se han hecho muchos progresos en el desarrollo de métodos que permiten cuantificar con precisión las imágenes de medicina nuclear. Sin embargo, estos métodos han tardado en aplicarse a la clínica y todavía no existen métodos estandarizados para cuantificar datos de tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT) o de PET.

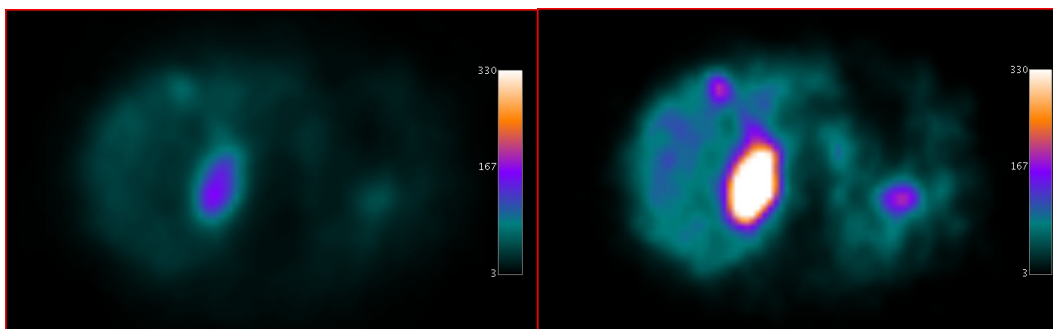
134. La elaboración de imágenes para fines de cuantificación suele ser más compleja que en el caso de las imágenes de interpretación visual. Esta elaboración adicional permite mejorar en muchos casos la resolución y el contraste de las imágenes y reducir las interferencias (Fig. F-1). Estas mejoras de la imagen redundan a menudo, aunque no siempre, en una mayor eficacia en las tareas de detección. Otra ventaja de utilizar esas imágenes consiste en que pueden mejorar la coherencia de las mediciones sobre el terreno al reducir la variabilidad entre los centros de formación y los equipos de formación de imágenes, los protocolos de barrido y los pacientes.

---

<sup>21</sup> A fin de ayudar a los Estados Miembros a determinar los niveles nutricionales, el OIEA, USAID, HarvestPlus e ILSI iniciaron un Grupo de Trabajo sobre trazadores de la vitamina A para preparar documentos sobre el uso adecuado de la metodología de este tipo de trazadores (isótopos estables) y un manual sobre métodos de dilución de trazadores de la vitamina A para evaluar situaciones y programas de intervención.

<sup>22</sup> Se puede consultar información adicional en la dirección <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC53/Agenda/index.html>.





*Fig. F-1. Yodo 123 metayodobencilguanidina (I-123 MIBG): corte transaxial del abdomen superior en paciente con feocromocitoma recurrente. A la izquierda figura la imagen original de SPECT. A la derecha figura la imagen corregida mediante datos sobre la densidad de los tejidos obtenidos por TC. Este tipo de imagen de SPECT corregida puede proporcionar información diagnóstica más rigurosa y permite cuantificar con más precisión la captación de la sustancia radiofarmacéutica. (Escuela de Medicina, Universidad de Pisa, Italia)*

#### **F.4. Mejora de las aplicaciones radiooncológicas**

135. La terapia de modalidad combinada (cirugía, radioterapia, quimioterapia, tratamiento con fármacos específicos) prolonga la supervivencia en la mayoría de los cánceres. Los avances en radioterapia de haces externos exigen una mayor exactitud en cuanto a las dosis que han de administrarse a los pacientes. La radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) es el tratamiento estándar en la mayoría de las indicaciones de radioterapia curativa y en muchos centros un número considerable de pacientes recibe radioterapia de intensidad modulada (IMRT).

136. Se está introduciendo en la práctica clínica la terapia de arco modulado de intensidad volumétrica, diversas innovaciones en radioterapia combinada con tomografía, la radioterapia corporal estereotáctica de dosis individualizadas y la radioterapia guiada por imágenes de cuatro dimensiones (IGRT) (que amplía el volumen del blanco a fin de abarcar el movimiento tumoral). Estas técnicas permiten lograr un máximo de conformidad y un alto grado de protección de las estructuras vitales al reducir la irradiación de los tejidos sanos adyacentes. Ya se dispone de programas informáticos mejorados para los sistemas de grabación y de verificación de la calidad que redundan en una mayor eficacia de los procesos de radioterapia clínica.

137. Cada vez se establecen más centros de producción de protones a fin de elaborar aplicaciones de alta precisión para salvaguardar los tejidos sanos. En la mayoría de los casos será preciso disponer de más pruebas para demostrar la superioridad de estos métodos con respecto a la radioterapia convencional.

138. Por otra parte, la tecnología de la información ha modificado los métodos de trabajo en radiooncología. En los hospitales de todo el mundo se están estableciendo rápidamente registros nacionales de casos e historiales clínicos electrónicos.<sup>23</sup>

---

<sup>23</sup> En una Conferencia Internacional sobre avances en radiooncología, copatrocinada por el OIEA y celebrada en abril de 2009, el OIEA alentó a los principales fabricantes de equipo de radiooncología del mundo a producir equipos más sólidos, menos costosos y portátiles para su uso en entornos pobres y rurales.

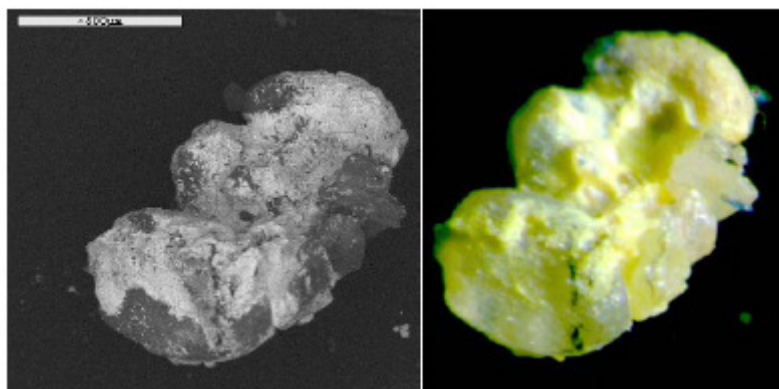
## G. Medio ambiente

### G.1. 'Partículas calientes' en el medio ambiente

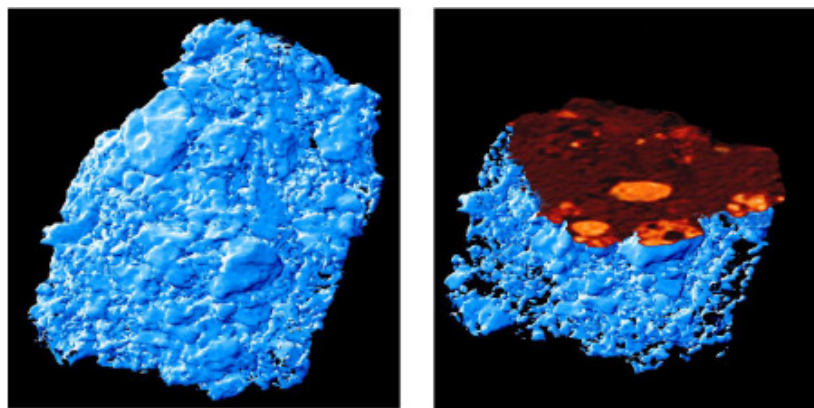
139. Las partículas radiactivas liberadas revisten importancia para evaluar las dosis y el impacto de la radiación en el medio ambiente. Estas 'partículas' son pequeños objetos radiactivos que contienen una cantidad considerable de radionucleidos cuya radiactividad puede ser muy elevada. Estas partículas, que pueden tener diversos orígenes – ensayos de armas nucleares, emisiones del ciclo del combustible nuclear y accidentes con materiales nucleares – presentan unos niveles de radiactividad considerablemente superiores a los de los materiales a granel o los de la población de otras partículas procedentes de estas fuentes.

140. Las propiedades y el comportamiento ambiental de los radionucleidos contenidos en partículas dependen de su composición y su estructura matricial, factores que están relacionados con los términos fuente y que dependen de los escenarios de liberación (Fig. G-1 y Fig. G-2). La movilidad, el comportamiento ambiental, la biodisponibilidad y los efectos ecológicos y sanitarios de los radionucleidos están determinados fundamentalmente por las propiedades de las partículas, como su microestructura, su composición química y su especiación. Si bien todavía se dispone de escasa información sobre el impacto ambiental de las partículas calientes, esta situación cambiará con la introducción de nuevas técnicas para caracterizar esas partículas.

141. Debido a su pequeño tamaño – que suele ser del orden de unos pocos micrometros o inferior – las partículas calientes transportadas por el aire son difíciles de aislar. Se ha desarrollado un método sencillo para manipular manualmente y aislar partículas de un orden de magnitud de  $1\mu\text{m}$  o superior mediante un microscopio óptico y en el caso de las partículas más pequeñas para la utilización directa a esos efectos de un microscopio electrónico de barrido (Fig. G-1). Una vez aisladas, las partículas pueden examinarse mediante una variedad de técnicas aplicables a escala microscópica, como la microscopía electrónica de barrido, la detección de partículas alfa, la ablación por láser-espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y otras técnicas de espectrometría de masas, así como la microtomografía con rayos X.



*Fig. G-1. Micrografías por microscopía electrónica de barrido (SEM) (izquierda) y por microscopía óptica (derecha) de un grano de arena donde se aprecia la forma y cobertura de una partícula con uranio empobrecido procedente del incendio del depósito de municiones de Al-Doha (Kuwait). Escala:  $500\mu\text{m}$  (Lind).*



*Fig. G-2. Tomografía microscópica por absorción de rayos X de una partícula de combustible oxidado liberada durante el incendio posterior a la explosión registrada en el accidente del reactor de Chernóbil. Imagen tridimensional de los cortes tomográficos que muestran la superficie de la partícula (izquierda) y división computarizada (virtual) de la imagen tridimensional en la que se aprecia su estructura interna heterogénea (derecha). Anchura de la partícula: aproximadamente 300µm (Salbu et al., 2000).*

## **G.2. Acceso en línea a datos mundiales sobre radiactividad marina**

142. La principal finalidad del Sistema de información marina (MARIS) (<http://maris.iaea.org>) consiste en facilitar el acceso a datos sobre radiactividad marina. Además, este sistema es una fuente de referencia internacional sobre niveles y tendencias de radionucleidos en el medio marino, con respecto a la cual se puede evaluar cualquier nueva aportación de datos correspondientes a eventuales liberaciones en el medio marino. Por su intermedio se han facilitado datos mejorados a los encargados de formular políticas en las regiones costeras.

143. El sistema MARIS contiene datos históricos y actuales sobre la radiactividad de los radionucleidos de origen artificial y natural más importantes en los océanos y mares del mundo, en las fosas profundas, las zonas costeras y el agua, así como en la materia particulada, los sedimentos y la biota marina. Estos datos proceden de artículos científicos, así como de informes y de bases de datos creadas en el marco de instituciones o de programas científicos de los Estados Miembros.

144. Los datos del sistema MARIS se utilizan en estudios de referencia para establecer los niveles, los inventarios y las tendencias de los radionucleidos en el medio marino, para efectuar evaluaciones del impacto ambiental y para determinar las dosis existentes en las vías de exposición marinas. Junto con datos oceanográficos, estos datos se utilizan para mejorar la caracterización de las corrientes oceánicas, los procesos de la columna de agua y la dinámica de los sedimentos, así como para determinar el destino final de los contaminantes en el medio marino utilizando radionucleidos como elementos análogos. También se emplean para validar modelos de circulación y dispersión a escala regional y mundial que permiten, por ejemplo, elaborar predicciones sobre el cambio climático y la acidificación de los océanos.

## **G.3. Marcado con isótopos estables en estudios sobre redes tróficas marinas**

145. Las composiciones isotópicas estables de carbono tienen amplia aplicación en el estudio de las fuentes de carbono orgánico en los ecosistemas y su utilización en la red trófica. Para mejorar el conocimiento de los ciclos bioquímicos y el funcionamiento de los ecosistemas es fundamental entender los procesos de transferencia de carbono y de nutrientes entre el medio

ambiente y los organismos marinos. Es posible obtener valiosa información mediante la adición de un trazador – por ejemplo, un compuesto marcado con carbono 13 – en condiciones controladas, y su rastreo a través de los diversos componentes. Esto puede indicar qué vías hay que estudiar para determinar la función de los organismos importantes en el ecosistema. En la figura G-3 se presenta un esquema de la distribución del delta carbono 13 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) en el medio ambiente. Mediante el análisis de los biomarcadores lípidos típicos de algunos grupos de organismos y la presencia de firmas isotópicas en estas sustancias es posible definir las interacciones específicas de determinadas especies mediante isótopos estables a nivel molecular. En combinación con la elaboración de modelos matemáticos, esos datos también pueden utilizarse para estimar las tasas de producción y renovación de productos fotosintéticos de diferentes organismos marinos. El Organismo presta ayuda a los Estados Miembros para rastrear compuestos marcados con carbono 13 o sin marcar a través de las cadenas tróficas, como corales, plancton y bacterias, sobre la base del análisis de las relaciones isotópicas de compuestos específicos mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas de relación isotópica (GC-IRMS). La aplicación de esta tecnología nuclear desarrollada recientemente podría contribuir a mejorar el conocimiento de las interacciones de las redes tróficas y del ciclo del carbono en el medio marino.

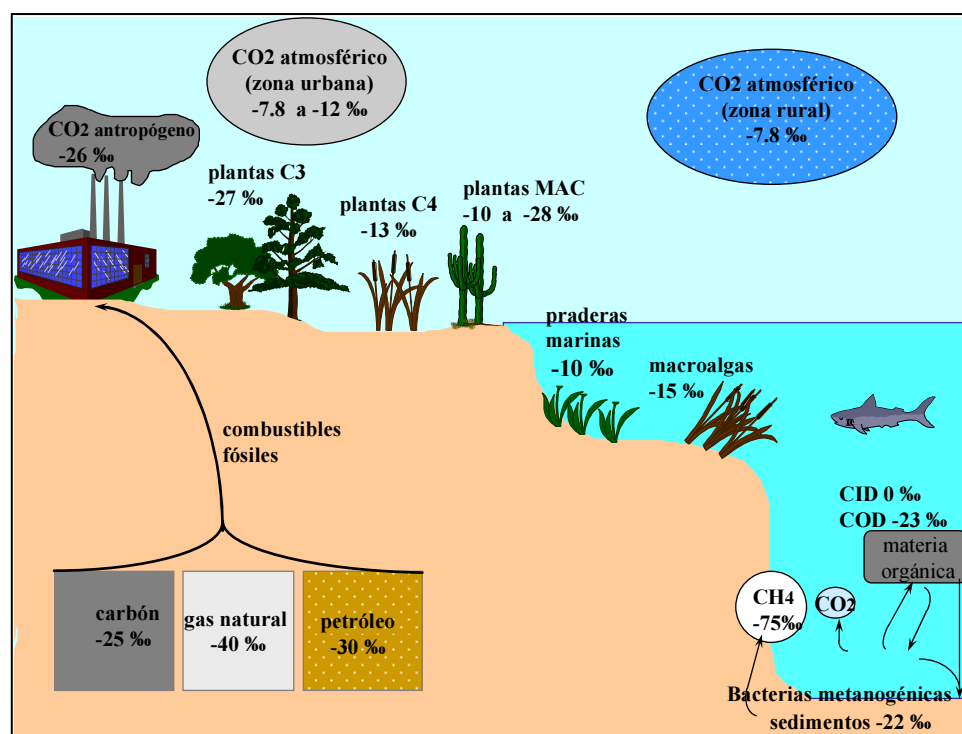


Fig. G-3 Esquema de la distribución de  $\delta^{13}\text{C}$  en el medio ambiente (figura modificada basada en Tolosa, *Oceanis*, vol. 30 n.2, 2004, págs. 239 a 259 (MAC = metabolismo del ácido crasuláceo; CID = carbono inorgánico disuelto; COD = carbono orgánico disuelto).

#### G.4. Uso de radiotrazadores para medir el impacto de la acidificación de los océanos en la biodiversidad marina del Ártico y el Mediterráneo

146. Mediante estudios basados en modelos se ha determinado con clara certeza que las regiones polares son particularmente vulnerables a los efectos combinados del aumento de las temperaturas y la acidificación de los océanos. Para predecir mejor el impacto de esos factores en la biodiversidad marina, el Organismo ha desarrollado instalaciones

experimentales portátiles que permiten estudiar la acidificación de los océanos. Se utiliza el isótopo calcio 45 para medir las tasas de calcificación en las mariposas marinas y los berberechos del Ártico, con que se alimentan fundamentalmente las ballenas, morsas y aves marinas residentes. Mediante datos procedentes de exposiciones experimentales que reproducen las condiciones de acidificación predichas para las aguas del Ártico, el Organismo ha ayudado a diversos Estados Miembros a determinar reducciones importantes en las tasas de calcificación en las mariposas marinas por factores similares a los ya medidos en el caso de los corales formadores de arrecifes.

147. El Organismo presta asistencia a los Estados Miembros en la realización de estudios con radiotrazadores sobre peces, sepias y pulpos en el mar Mediterráneo para determinar el impacto de la acidificación de los océanos en sus primeras etapas de vida. Esto contribuirá también a mejorar la comprensión y predicción del alcance de las modificaciones de los recursos marinos debidas a la acidificación de los océanos, así como sus repercusiones socioeconómicas.

## **H. Recursos hídricos**

148. Además del crecimiento demográfico y económico, la variabilidad y el cambio del clima son factores que ejercen considerable presión sobre los recursos de agua dulce. Casi uno de cada tres habitantes del planeta depende del agua de ríos alimentados por glaciares y nieve fundida. El mayor grado de variabilidad y vulnerabilidad de los flujos fluviales en el contexto del aumento de las temperaturas (debido al incremento de los flujos de fusión y a la modificación de los regímenes de precipitaciones) impulsará la introducción de cambios en las prácticas de uso y ordenación del agua. En la medida en que el desarrollo fomenta la necesidad de aumentar la producción de energía basada en fuentes tanto renovables como no renovables, la importancia del uso del agua como recurso energético también deberá tenerse en cuenta en la planificación de los recursos hídricos. Es probable que las medidas de ordenación que se adopten para responder a la mayor demanda de recursos de agua dulce supongan un aumento de la dependencia de los recursos de aguas subterráneas, que ya soportan una presión considerable.

149. Sin embargo, nuestro conocimiento de la distribución y las posibilidades de renovación de los recursos de aguas subterráneas dista mucho de ser adecuado. Una iniciativa notable para mejorar la evaluación de esos recursos es el Programa Mundial de Evaluación y Cartografía Hidrogeológica (WHYMAP) (<http://www.whymap.org>). Esta actividad de colaboración entre el programa de recursos hídricos del Organismo, el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO, el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) de Alemania, la Asociación Internacional de Hidrogeólogos y otros asociados se puso en marcha en 1999 con objeto de reunir, cotejar y visualizar información relacionada con la hidrogeología y con las aguas subterráneas a escala mundial. En el mapa de recursos de aguas subterráneas (Fig. H-1), presentado en 2008 con ocasión del 33º Congreso Internacional de Geología, celebrado en Oslo, se indican tres modalidades principales de presencia de aguas subterráneas: en grandes cuencas con acuíferos regionales (señaladas en azul), en zonas con estructuras hidrogeológicas complejas (señaladas en verde) y en zonas con acuíferos locales y poco profundos (señaladas en marrón). La gradación de matices de cada color corresponde a las tasas de renovación o recarga de las aguas subterráneas. En la Fig. H-2 se presenta un mapa de los recursos subregionales de aguas subterráneas en Asia meridional.

150. Los métodos isotópicos facilitan la identificación de acuíferos que contienen aguas viejas (con niveles de recarga nulos o desdeñables) y de acuíferos que contienen aguas nuevas (con niveles de recarga considerables)<sup>24</sup>. La utilización de aguas subterráneas viejas para riego o para abastecimiento doméstico o industrial se considera una actividad ‘minera’, ya que, en las condiciones climáticas actuales, las aguas subterráneas extraídas no serán reemplazadas naturalmente. Esos acuíferos deben ser objeto de una ordenación mucho más cuidadosa que los que se recargan con aguas nuevas. La ‘minería’ de los acuíferos se practica en muchos países del mundo.

151. La evaluación adecuada de los recursos hídricos, incluidas las aguas subterráneas, ayudará a lograr un incremento sustancial en la disponibilidad de agua. Mediante las evaluaciones nacionales mejorará la capacidad de los países para aumentar la eficacia en la utilización de sus recursos regionales compartidos en el marco de programas de acción estratégicos. El Organismo prevé lanzar una asociación para aprovechar las ventajas de sus recursos técnicos y complementar los mandatos y las actividades de otras organizaciones, como el Banco Mundial, el PNUD y la OMM, con miras a elaborar un enfoque científico modelo de evaluación de los recursos hídricos que pueda aplicarse en muchos Estados Miembros. En el marco de esta iniciativa de asociación – I-WAVE (IAEA-Water Availability Enhancement [OIEA-Aumento de la Disponibilidad de Agua]) – se establecerá un enfoque integral para la evaluación de los recursos hídricos, incluidas las aguas superficiales y subterráneas, y se ayudará a elaborar mejores estrategias de adaptación al cambio climático.

---

<sup>24</sup> Se puede consultar información adicional en las secciones pertinentes del último Informe Anual del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2008/index.html>).

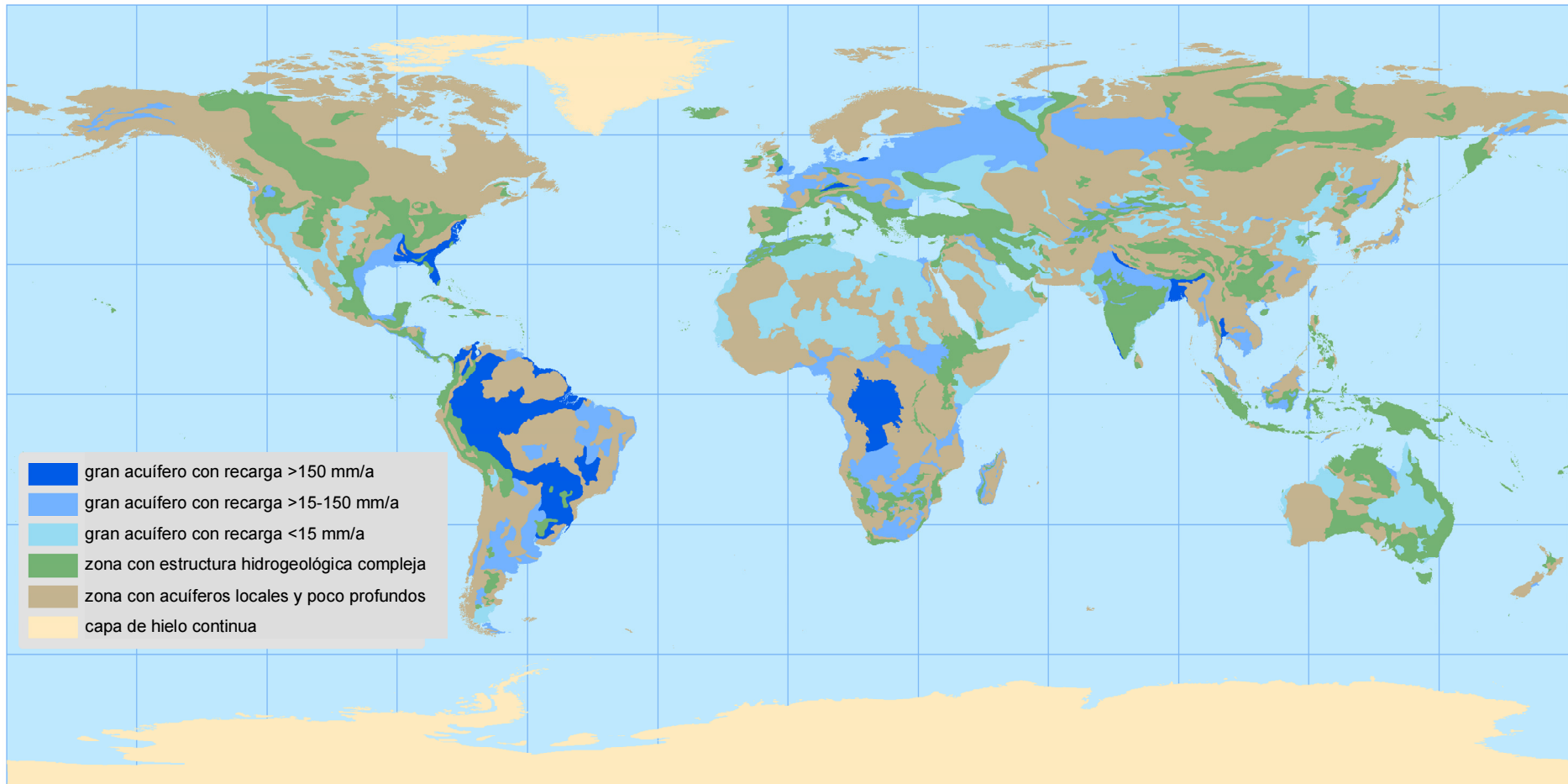
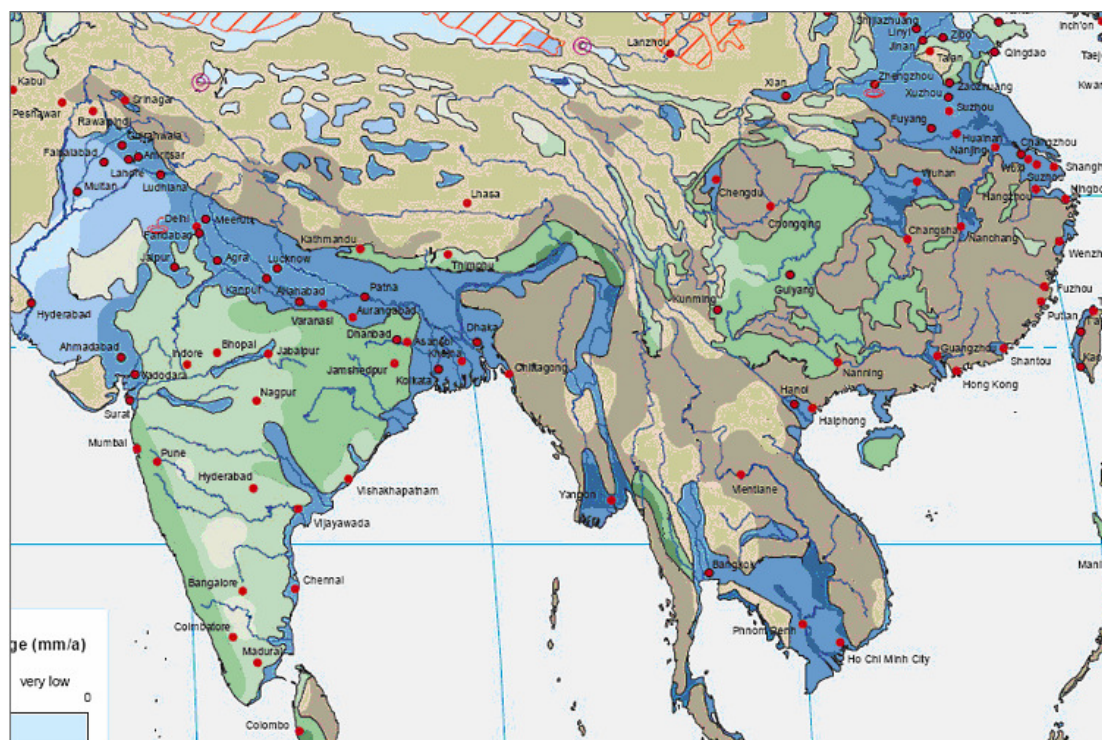


Fig. H-1. Recursos mundiales de aguas subterráneas, WHYMAP (escala 1:50 000 000). Las zonas azules indican sistemas de aguas subterráneas en las grandes cuencas, las zonas verdes representan sistemas de aguas subterráneas con estructuras hidrogeológicas complejas; y las zonas marrones corresponden a sistemas de acuíferos locales y poco profundos. La gradación de matices de cada color corresponde a las tasas de renovación (recarga) de las aguas subterráneas



*Fig. H-2. Detalle del mapa de recursos de aguas subterráneas de escala 1:25 000 000 correspondiente a Asia meridional. Las zonas azules son sistemas de aguas subterráneas en las grandes cuencas, las zonas verdes representan sistemas de aguas subterráneas con estructuras hidrogeológicas complejas, y las zonas marrones corresponden a sistemas de acuíferos locales y poco profundos. La gradación de matices de cada color corresponde a las tasas de renovación (recarga) de las aguas subterráneas.*

## I. Producción y disponibilidad de radioisótopos

152. La demanda mundial de radioisótopos está aumentando debido a sus usos médicos e industriales. En la sexta Conferencia internacional sobre isótopos, celebrada en Seúl (República de Corea) en mayo de 2008, se destacó la creciente necesidad de potenciar las innovaciones y la cooperación internacional. Se está estableciendo un Consejo Mundial sobre isótopos que será un foro apropiado donde todas las partes interesadas podrán intervenir para facilitar la producción y aplicación de radioisótopos en condiciones sostenibles y seguras.

153. Ha aumentado la capacidad de producción de radioisótopos mediante ciclotrones. También está creciendo el número de centros regionales dedicados a la producción de radiotrazadores de uso clínico para la formación de imágenes por PET. En respuesta a la creciente demanda de fluorodesoxiglucosa (FDG), se están desarrollando ciclotrones de sobremesa (~7.5 MeV) junto con módulos de síntesis de radiotrazadores avanzados basados en la microfluídica, los cuales, según las previsiones, se adoptarán en los principales hospitales del mundo. Además, puesto que algunos trazadores por PET son más específicos para la formación de imágenes relacionadas con el cáncer, se prefiere cada vez más su uso en detrimento de la FDG, que también se acumula en los sitios de la infección.



154. Al aumentar el número de centros de PET y de PET-TC se ha incrementado el uso de los trazadores para PET basados en generadores para la formación de imágenes de mejor calidad. Por ejemplo, el galio 68 – obtenido a partir del germanio 68 – y el rubidio 82 – obtenido a partir del estroncio 82 – se utilizan en la formación de imágenes para diagnóstico del cáncer y para perfusión miocárdica, respectivamente.

155. La terapia con radionucleidos está cobrando más importancia debido a la aplicación de los principios de la medicina nuclear molecular para mejorar la determinación del blanco. En consecuencia, se prevé un aumento significativo en la demanda de radionucleidos terapéuticos. La aplicación de una metodología de generación electroquímica desarrollada para obtener itrio 90 de gran pureza (facilitada mediante un proyecto de investigación coordinado por el Organismo) permitirá aumentar la disponibilidad de ese radioisótopo sobre la base de un proceso que se puede realizar en condiciones de seguridad utilizando un módulo de ejecución a distancia. Se prevé que la utilización del lutecio 177 llegará a ser tan importante como la del yodo 131, y varios países han iniciado o planean iniciar su producción en media a gran escala.

### **I.1. Seguridad de los suministros de molibdeno 99**

156. Durante el año pasado, a raíz de las interrupciones en el suministro del radioisótopo molibdeno 99 – fuente del tecnecio 99, ampliamente utilizado para la obtención de imágenes de diagnóstico – se retrasó la prestación de servicios a pacientes en centros de medicina nuclear de todo el mundo. Las cantidades necesarias de este radioisótopo (unos 450 000 GBq por semana) se obtienen normalmente mediante irradiaciones en cinco reactores de Bélgica, el Canadá, Francia, los Países Bajos y Sudáfrica, que posteriormente se elaboran en cuatro instalaciones industriales. Más del 95% de todo el molibdeno 99 producido se obtiene utilizando blancos de uranio muy enriquecido (UME). En enero de 2009, la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, en cumplimiento de un mandato del Congreso de ese país, publicó el estudio de viabilidad sobre el uso de blancos de uranio poco enriquecido (UPE).<sup>25</sup>

157. Los pocos reactores que producen molibdeno 99 son antiguos y deben pararse para efectuar operaciones de mantenimiento, lo cual ha creado problemas en más de un sitio de producción. En agosto de 2008 un problema técnico imprevisto obligó a aplazar en Petten (Países Bajos) la nueva puesta en funcionamiento de un reactor que se había parado con fines de mantenimiento. Esto coincidió con la parada programada para el mantenimiento de otros dos reactores en Europa y con un incidente radiológico en una instalación de elaboración, lo cual provocó una importante escasez de molibdeno 99 en Europa y en otras regiones. La preocupación por la seguridad de los suministros de éste y de otros radioisótopos producidos mediante reactores se agravó cuando en mayo de 2008 se canceló el proyecto del reactor MAPLE en el Canadá y quedó claro que, probablemente, habría que esperar al menos hasta 2015 para que empezara la producción con nuevos reactores.

158. Es probable que el primer incremento adicional importante de la capacidad de producción de molibdeno 99 se deba a la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO). En los Estados Unidos de América se han hecho progresos considerables en la planificación preparatoria y el estudio de los recursos necesarios para que el reactor de investigación de la Universidad de Missouri (MURR) pueda alcanzar una meta de producción capaz de satisfacer del 30% al 50% de la demanda interna, aun cuando una vez obtenidas las

---

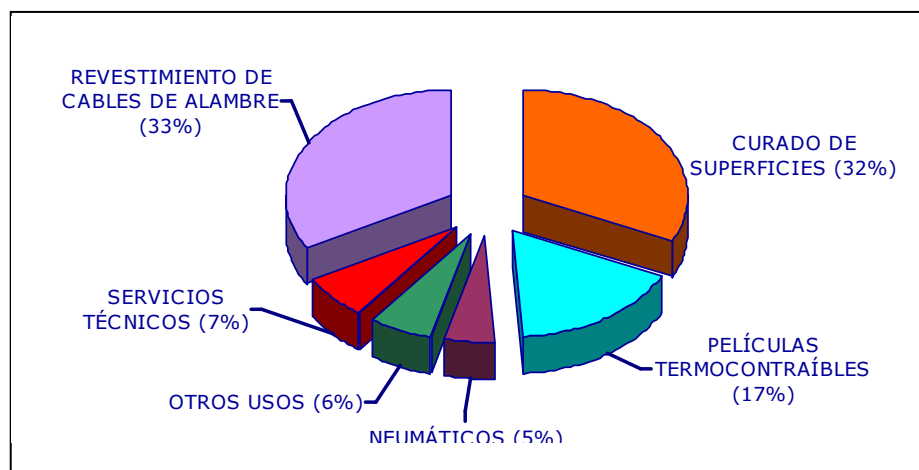
<sup>25</sup> [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=12569](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12569)

debidas autorizaciones será preciso esperar entre tres y cuatro años para su establecimiento. Se están construyendo otras dos instalaciones para producir molibdeno 99 en Egipto (suministrada por la empresa INVAP, de la Argentina) y en el Pakistán (suministrada por la empresa Isotope Technologies, de Alemania), pero todavía no se ha difundido información precisa acerca de los correspondientes planes de producción

159. Es necesario ampliar con urgencia el número de reactores con capacidad de irradiación para producir molibdeno 99 asegurando al mismo tiempo su correcta distribución geográfica. La utilización de reactores idóneos para producir este radioisótopo por irradiación de blancos de UPE dependerá tanto del apoyo de los gobiernos como de la mayor cooperación entre los fabricantes de isótopos, incluso en el marco de asociaciones entre los sectores público y privado.

## I.2. Tratamiento con haces de electrones

160. En diversas industrias se utilizan aceleradores para la producción de haces de electrones de alta intensidad a fin de mejorar las propiedades físicas y químicas de los materiales (FIG. I-1) y para reducir la presencia de contaminantes indeseables. La utilización de más de 1 400 de estas máquinas para fines comerciales aporta miles de millones de euros como valor añadido a numerosos productos. A estos aceleradores se suman los casi 1 000 aceleradores de baja intensidad dedicados a actividades de investigación.



*Fig. I-1. Distribución típica del uso final de los aceleradores de haces de electrones en la industria. Los usos más frecuentes (80%) corresponden a cables, películas termocontraíbles y curado de superficies; se prevé un incremento de las aplicaciones relacionadas con dispositivos médicos y con productos alimenticios.*

161. Con los nuevos aceleradores de haces de electrones de alta energía (5–10 MeV) y de alta potencia (hasta 700 kW) la conversión de la energía de haces de electrones en radiación X se ha convertido en una alternativa comercialmente viable del uso industrial de los rayos gamma. En la figura I-2 se muestran contenedores para almacenar productos alimenticios, como envases de carne picada, o cajas de productos médicos desechables, antes de ser expuestos a irradiación X con blancos de tantalio refrigerados por agua de dos metros de altura.



*Fig. I-2. Tratamiento de contenedores de materiales (por ejemplo, productos médicos desechables, productos alimenticios) con rayos X generados por haces de electrones de 5 a 7.5 MeV.*

162. Si bien está aumentando el uso de aceleradores de haces de electrones de baja energía (menos de 500 keV) para el curado de tintas, revestimientos y adhesivos mediante la eliminación de compuestos orgánicos volátiles, es necesario disponer de instalaciones de haces de electrones móviles para aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales industriales, la desinfección de semillas y la desodorización del aire. Una aplicación reciente de estos aceleradores consiste en utilizarlos para descontaminar superficies, por ejemplo, para el rellenado aséptico de botellas y envoltorios de PET.

### **I.3. Tratamiento por irradiación en el ámbito de la nanociencia**

163. Las tecnologías de las radiaciones pueden utilizarse para desarrollar y caracterizar nuevos materiales de escala nanométrica. Estas técnicas son fundamentales en nanotecnología porque el foco del haz puede abarcar unos pocos nanómetros con un barrido de alta velocidad. En los Países Bajos se ha presentado una nueva tecnología: la litografía por haces de electrones múltiples, que emplea hasta 13 000 haces de electrones paralelos para grabar directamente circuitos electrónicos en las placas sin necesidad de utilizar máscaras. Esta técnica, que combina un alto grado de resolución y de profundidad de campo del haz de electrones con una gran capacidad de producción, es un medio eficaz en función de los costos para fabricar circuitos electrónicos de nueva generación.

164. El funcionamiento de la litografía por haces de iones de baja energía es similar al de la litografía por haces de electrones, con diversas ventajas, como una dispersión mínima y una pérdida de energía prácticamente uniforme a lo largo de toda la trayectoria. Recientemente, se

ha desarrollado un nuevo método que utiliza una apertura de tamaño variable para configurar el haz en función de la muestra. Combinando diferentes tamaños de la apertura con diferentes posiciones de la muestra se logra exponer estructuras complejas en poco tiempo. Se puede utilizar un haz de iones pesados con energía de aceleración superior a 1 MeV para fabricar membranas de trazas iónicas a partir de polímeros y utilizarlas como modelo para sintetizar microestructuras y nanoestructuras en forma de cables. De esta manera se han fabricado – por separado o en serie – nanocables y nanotubos magnéticos, conductores y superconductores. Además de su empleo en la industria electrónica, las tecnologías de haces de electrones y de iones también se utilizan para estudiar fenómenos físicos de dimensiones nanométricas a fin de prestar apoyo a investigaciones en física, nanofotónica, nanobiotecnología y nanobiomedicina.