

Conferencia General

GC(55)/INF/5

26 de julio de 2011

Distribución general

Español

Original: Inglés

Quincuagésima quinta reunión ordinaria

Punto 17 del orden del día provisional
(GC(55)/1)

Examen de la tecnología nuclear — 2011

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 2010.
- En el *Examen de la tecnología nuclear – 2011* se abordan los siguientes temas: aplicaciones eléctricas, fisión avanzada y fusión, datos atómicos y nucleares, aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación, tecnologías nucleares en la alimentación y la agricultura, salud humana, medio ambiente, recursos hídricos, y producción de radioisótopos y tecnología de las radiaciones. En el sitio web del Organismo¹ se pueden consultar otros documentos en inglés relacionados con el *Examen de la tecnología nuclear 2011* sobre los últimos adelantos en la tecnología de la radiooncología, la mejora de la inocuidad y calidad de los alimentos mediante técnicas isotópicas para la trazabilidad de los alimentos y el uso eficaz de los isótopos en apoyo de la gestión integral de las aguas subterráneas.
- En el Informe Anual para 2010 (GC(55)/2), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el Informe de Cooperación Técnica para 2010 (GC(55)/INF/2) también figura información sobre las actividades del OIEA relacionadas con la ciencia y la tecnología nucleares.
- El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, las observaciones específicas de la Junta de Gobernadores y otras observaciones recibidas de los Estados Miembros.

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/Agenda/index.html>

Índice

Examen de la tecnología nuclear — 2011	1
Resumen	1
A. Aplicaciones eléctricas	5
A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad	5
A.2. Proyecciones sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrónica	7
A.3. Ciclo del combustible	9
A.3.1. Recursos y producción de uranio	9
A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible	10
A.3.3. Parte final del ciclo del combustible	12
A.3.4. Gestión de desechos radiactivos y clausura	12
A.4. Seguridad	15
B. Fisión avanzada y fusión	17
B.1. Fisión avanzada	17
B.1.1. Reactores refrigerados por agua	17
B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos	18
B.1.3. Reactores refrigerados por gas	19
B.1.4. El INPRO y el GIF	20
B.2. Fusión	20
C. Datos atómicos y nucleares	21
D. Aplicaciones de los aceleradores y de los reactores de investigación	23
D.1. Aceleradores	23
D.2. Reactores de investigación	25
E. Tecnologías nucleares en la agricultura y la alimentación	28
E.1. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias	28
E.2. Lucha contra plagas de insectos	29
E.3. Mejora de los cultivos	31
E.4. Gestión de suelos y aguas	32
E.4.1. Nuevos horizontes en la evaluación del secuestro de carbono del suelo de tierras de cultivo	32
E.4.2. Uso de isótopos de oxígeno en fosfatos para rastrear las fuentes y el ciclo del fósforo en los suelos	33
F. Salud humana	34
F.1. Nutrición	34
F.2. Avances en las aplicaciones radiooncológicas	34
F.3. Novedades en la tecnología de la medicina nuclear aplicada a estudios cardíacos	35
G. Medio ambiente	37
G.1. Tecnología nuclear para la alerta temprana sobre floraciones de algas marinas nocivas	37
G.2. Uso de radionucleidos de período largo para estudiar los procesos ambientales	38
H. Recursos hídricos	39
I. Producción de radioisótopos y tecnología de la radiación	39
I.1. Radioisótopos y radiofármacos	39
I.1.1. Utilización de agentes de fijación de blancos moleculares con fines de obtención de imágenes y terapéuticos	39
I.1.2. Seguridad de los suministros de molibdeno 99 y tecnecio 99m	40
I.2. Aplicaciones de las tecnologías de la radiación	41
I.2.1. Métodos integrados de utilización de radiotrazadores y simulación por computadora para la gestión de los sedimentos	41
I.2.2. Aceleradores de haces de electrones de baja energía	42

Examen de la tecnología nuclear — 2011

Informe del Director General

Resumen

1. El accidente en la central nuclear Fukushima Daiichi, causado por los extraordinarios desastres naturales del terremoto y los tsunamis que golpearon al Japón el 11 de marzo de 2011, sigue siendo evaluado. Puesto que el presente informe se centra en los hechos que tuvieron lugar en 2010, en él no se abordan el accidente ni sus consecuencias, que serán analizados en futuros informes del Organismo.
2. En 2010 se inició la construcción de 16 nuevos reactores nucleares de potencia, el mayor número desde 1985. Como resultado de la conexión de cinco nuevos reactores a la red y solo una retirada de servicio durante el año, la capacidad nucleoelectrica total en el mundo entero aumentó a 375 GW(e). Las proyecciones revisadas en 2010 del crecimiento futuro de la energía nucleoelectrica seguían indicando que eran grandes sus posibilidades de expansión.
3. La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia. Dos terceras partes de los reactores actualmente en construcción se encuentran en Asia, al igual que 13 de los 16 que se han comenzado a construir. De ellos, solo en China se inició la construcción de diez. Las tendencias a aumentar la potencia y a renovar o prorrogar las licencias de los reactores en funcionamiento se mantuvieron en 2010, particularmente en algunos países de Europa, donde se siguieron reconsiderando las políticas que restringían el uso futuro de la energía nucleoelectrica. Siguió existiendo gran interés en iniciar nuevos programas nucleoelectricos, y más de 60 Estados Miembros indicaron al Organismo que estaban interesados en considerar la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica.
4. En la edición de 2010 del “Libro Rojo” de la AEN/OCDE y el OIEA, las estimaciones de los recursos de uranio convencionales identificados, recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, disminuyeron ligeramente en comparación con la edición anterior, pero la producción mundial de uranio aumentó considerablemente como resultado en gran medida del incremento de la producción en Kazajstán. Los precios al contado del uranio, que disminuyeron en 2009, alcanzaron a fines de 2010 sus niveles más elevados en más de dos años, ascendiendo hasta 160 dólares/kg de U, pese a que los precios de principios y mediados del año fluctuaron entre 105 dólares/kg de U y 115 dólares/kg de U.
5. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores aprobó la creación de un banco de uranio poco enriquecido (UPE) del OIEA, que será propiedad del OIEA y estará administrado por éste, como provisión a la que recurrir en última instancia para la generación de energía eléctrica. También en diciembre se inauguró en Angarsk (Federación de Rusia) una reserva de UPE bajo los auspicios del Organismo que contiene 120 toneladas de UPE, suficiente para llenar de combustible dos núcleos de un reactor de potencia de 1000 MW(e).
6. Más de 50 Estados Miembros están examinando alternativas o han comenzado a establecer opciones de disposición final apropiadas para sus inventarios de desechos. En enero de 2010 entró en

vigor en Eslovenia un decreto que confirmaba el emplazamiento para la construcción de un repositorio de desechos de actividad baja e intermedia en el país.

7. En noviembre de 2010 la Comisión Europea expidió una propuesta de Directiva del Consejo sobre la gestión del combustible gastado y los desechos radiactivos, que incluía la solicitud a los Estados Miembros de la Unión Europea de que presentaran programas nacionales en los que indicaran cuándo, dónde y cómo construirán y administrarán repositorios finales destinados a garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad más estrictas. Finlandia y Suecia están preparando la documentación correspondiente a las licencias de construcción de instalaciones geológicas profundas para el combustible gastado. La Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) de Francia presentó una nueva edición del plan nacional para la gestión de materiales radiactivos.

8. En enero de 2010 se estableció en los Estados Unidos la Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América, después de que el Gobierno estadounidense decidiera en 2009 no proceder con la construcción del repositorio geológico profundo de Yucca Mountain. Se prevé que el primer informe provisional de la comisión se publique en julio de 2011.

9. Se siguió prestando apoyo del OIEA a los Estados Miembros y a los programas internacionales para la devolución del combustible de reactores de investigación a su país de origen. En el marco del programa de devolución de combustible de reactores de investigación de origen ruso (RRRFR), se repatriaron a la Federación de Rusia aproximadamente 109 kg de combustible de UME sin irradiar y 376 kg de combustible de UME gastado. Al final de 2010 se transportaron de Vinča (Serbia) a la Federación de Rusia 2 500 kg de combustible de reactores de investigación degradado y gastado. Las actividades de repatriación de Vinča también señalaron el éxito de la ejecución del proyecto de cooperación técnica más costoso de la historia del Organismo.

10. El Reactor Experimental Rápido de China (CEFR) tipo piscina de 65 MW(t) (20 MW(e)) alcanzó la criticidad por primera vez el 21 de julio de 2010. En el Japón, el prototipo de reactor reproductor rápido de 280 MW(e) se puso nuevamente en marcha el 6 de mayo de 2010 y han comenzado los ensayos de confirmación.

11. En lo que respecta a la fusión nuclear, el Reactor termonuclear experimental internacional pasó oficialmente a su fase de construcción en julio de 2010. Se prevé que el primer plasma se obtendrá en noviembre de 2019. También se han realizado considerables progresos en la Instalación nacional de ignición de los Estados Unidos, donde en enero de 2010 se obtuvo una energía de ignición de 1 MJ.

12. El desarrollo, el ensayo, la validación y la aplicación de técnicas nucleares y del ámbito nuclear rápidas y precisas para el diagnóstico temprano de enfermedades han desempeñado un papel importante en la mejora de la seguridad alimentaria en 2010. Por ejemplo, se están desarrollando vacunas contra la brucelosis (una extendida enfermedad zoonótica) en la Argentina y Georgia; contra las infecciones producidas por gusanos parasitarios en Etiopía, el Sudán y Sri Lanka; contra la teileriosis en China y Turquía; contra la tripanosomiasis en la India y Kenya; contra la anaplasmosis en Tailandia, y contra los parásitos transmitidos por la ingestión de pescado en la República Islámica del Irán.

13. Un componente estratégico importante de los esfuerzos por incrementar la productividad y garantizar la seguridad alimentaria a escala mundial será aumentar las inversiones en la gestión de plagas. En 2010 se publicaron los resultados de un proyecto coordinado de investigación (PCI) de la FAO/OIEA, que reunió a 18 grupos de investigación de 15 países. Esos resultados apuntan a una serie de formas innovadoras en que la radiación ionizante puede añadir valor a la aplicación de controles biológicos mediante el uso de depredadores y parasitoides como complementos de la técnica de los insectos estériles para la gestión de plagas de insectos de forma inocua para el medio ambiente.

14. En 2010, las mutaciones o modificaciones hereditarias naturales del material genético de las plantas se siguieron aprovechando eficazmente para determinar y seleccionar los rasgos que son importantes para la mejora de los cultivos. Las técnicas nucleares utilizadas para la inducción de mutaciones pueden incrementar el ritmo de cambios genéticos y, por ende, la adaptabilidad de los cultivos al cambio y la variabilidad climáticos. Los conjuntos de tecnologías nucleares basados en las mutaciones inducidas y en las biotecnologías y tecnologías moleculares que mejoran la eficiencia, entre ellas las tecnologías moleculares de cultivo de tejidos y de alto rendimiento, han sido desarrollados con miras a ayudar a determinar y aprovechar los rasgos fundamentales para la adaptación al cambio y la variabilidad climáticos.

15. En la esfera de la salud humana, los adelantos que siguieron dándose en 2010 en radiooncología están redundando en tratamientos mejorados que hacen posible hoy en día ajustar con mayor precisión el volumen irradiado a la forma del tumor y preservar así mejor el tejido sano circundante. La radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) se está utilizando para concebir campos de tratamiento centrados en el tumor al que se dirige el tratamiento.

16. La radioterapia adaptada a la respiración tiene en cuenta el movimiento de los órganos y del tumor durante la respiración del paciente. Esto es de particular importancia en el caso de tumores localizados en el pecho, la laringe, el abdomen, la próstata y la vejiga, así como en la pelvis en general. En este tipo de radioterapia dirigida por computadora, el programa analiza los movimientos y acciona el haz de tratamiento en el momento adecuado.

17. Los adelantos en medicina nuclear durante los tres últimos años han permitido reducir tanto el tiempo de los exámenes como la dosis de radiación administrada a los pacientes, mejorando al mismo tiempo la calidad de las imágenes en general, lo que permite realizar diagnósticos más seguros y eficientes de enfermedades cardiovasculares. Actualmente, en la imaginología SPECT tradicional se utilizan nuevos materiales detectores, como el telururo de cadmio-zinc, en combinación con la colimación estenopecica localizada y la reconstrucción tridimensional para reducir el tiempo de examen.

18. La aparición de floraciones de algas nocivas (FAN) en las zonas costeras puede ocasionar pérdidas económicas significativas debidas a los daños que causan a los alimentos marinos recolectados tanto para el consumo doméstico como para fines de exportación. Las técnicas nucleares permiten evaluar de manera exacta y rápida esas FAN como medio de apoyo a los esfuerzos que realizan los órganos reguladores nacionales por garantizar la inocuidad de los alimentos marinos. En la reunión anual de 2010 de la AOAC (Asociación científica dedicada a la excelencia analítica) se distinguió el método del ensayo de unión receptor-ligando (RBA), tecnología nuclear basada en el uso de toxinas radiomarcadas, como uno de los dos métodos alternativos desarrollados que han sido ensayados con éxito en los estudios de prevalidación.

19. Los radionucleidos de período largo se están utilizando para investigar los recursos marinos, los procesos oceanográficos y para evaluar la contaminación marina en apoyo de la gestión de las zonas costeras. Debido a su desintegración con el tiempo, los radionucleidos permiten a los investigadores datar y estudiar procesos ambientales de gran escala, así como obtener información que de otro modo no sería accesible.

20. Se están utilizando isótopos estables y radiactivos en estudios que requieren poco tiempo y que son rentables de recursos de aguas subterráneas en, por ejemplo, el sistema acuífero guaraní en Sudamérica, la cuenca de Tadla en Marruecos y el sistema acuífero de arenisca de Nubia en el norte de África. Los datos isotópicos obtenidos se utilizaron en 2010 para confirmar estudios hidrológicos tradicionales y comprender mejor el flujo de las aguas subterráneas y la dinámica de los acuíferos, todo lo cual contribuye a la gestión integral de las aguas subterráneas.

21. La importancia de los radioisótopos y radiofármacos siguió aumentando en 2010. Los radiofármacos muy específicos se utilizan cada vez más como biomarcadores de los procesos moleculares de una enfermedad, método que se conoce como "imagenología molecular", ya que sirven como indicador temprano de la enfermedad o como parámetro objetivo para medir la eficacia del tratamiento, particularmente en el caso de los pacientes con cáncer.

22. Como resultado de problemas técnicos, hubo paradas de reactores de investigación reiteradas, prolongadas y a menudo coincidentes, que contribuyeron a prolongar aún más la crisis de suministro de molibdeno 99 que comenzó a finales de 2007. Las medidas coordinadas de ámbito mundial encaminadas a aumentar la eficiencia por el lado de la demanda, reducir los problemas de transporte y aprobar reactores con capacidad de irradiación de blancos ayudaron considerablemente a mitigar los efectos de la crisis a lo largo de 2010. Sudáfrica se convirtió en el primer productor importante que entregó cantidades a escala industrial de molibdeno 99 basado en UPE para su exportación en 2010, y en diciembre de 2010 también se inició la producción de molibdeno 99 en gran escala en el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos de Dimitrovgrad (Federación de Rusia). Además, las escaseces experimentadas en el suministro de molibdeno 99 producido por fisión y, en consecuencia, de generadores de tecnecio 99m, han dado lugar también a un aumento del interés por investigar y desarrollar tecnologías alternativas para su producción, en particular los que no utilizan uranio muy enriquecido. Asimismo, la aplicación de enfoques basados en aceleradores ayudaría a que la industria del molibdeno 99 producido por fisión dependiera en menor medida exclusivamente de los reactores antiguos con que trabaja. Investigadores canadienses están investigando la producción directa de tecnecio 99m basada en ciclotrones, que puede ser una alternativa a corto plazo, para los centros médicos que se encuentran cerca de ciclotrones de baja o media energía.

23. Entre los adelantos recientes de las aplicaciones industriales de la tecnología de la radiación figuran los métodos integrados de radiotrazadores y simulación por computadora para la gestión de los sedimentos. En 2009 y 2010 se realizaron investigaciones con radiotrazadores utilizando polvo de vidrio marcado con escandio 46 como trazador en una zona de vertedero existente y en dos emplazamientos de vertederos propuestos en la India. Los resultados indicaron que la zona existente y uno de los emplazamientos propuestos eran idóneos para verter sedimentos dragados, mientras que el otro emplazamiento propuesto no lo era.

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

24. Por séptimo año consecutivo, aumentó el número de inicios de construcciones de reactores nuevos. Aunque lejos de alcanzar el pico de cuarenta y cuatro de 1976, las dieciséis construcciones iniciadas en 2010, el número más elevado desde 1985, indica un marcado aumento respecto a las cifras del decenio de 1990 y comienzos del de 2000.

25. A 31 de diciembre de 2010, había en funcionamiento 441 reactores nucleares de potencia en todo el mundo, con una capacidad total de 375 GW(e) (véase el cuadro A-1). Esto representa unos 4 GW(e) más de capacidad total que a finales de 2009, debido mayormente a cinco nuevas conexiones a la red (Lingao-3 (1 000 MW(e)) y Qinshan 2-3 (610 MW(e)) en China, Rajasthan-6 (202 MW(e)) en la India, Rostov-2 (950 MW(e)) en la Federación de Rusia y Shin Kori-1 (960 MW(e)) en la República de Corea) y una sola retirada (Phenix (130 MW(e)) en Francia).

26. En 2010 se iniciaron dieciséis construcciones: Angra-3 en el Brasil; Changjiang-1 y -2, Fangchenggang-1 y -2, Fuqing -3, Haiyang-2, Ningde-3 y -4, Taishan-2 y Yangjiang-3, en China; Kakrapar-3 y -4 en la India; Ohma en el Japón; y Leningrad 2-2 y Rostov-4 en la Federación de Rusia. Esto se contrapone al inicio de doce construcciones más el reinicio de la construcción activa de dos reactores en 2009, y al inicio de diez construcciones en 2008.

27. A 31 de diciembre de 2010, había en total 67 reactores en construcción, el mayor número desde 1990.

28. La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia. De las 16 construcciones iniciadas en 2010, 13 estaban en Asia. Como se muestra en el cuadro A-1, 45 de los 67 reactores en construcción están en Asia, así como 34 de los últimos 43 reactores nuevos que se han conectado a la red.

29. La tendencia a aumentar la potencia y a renovar o prorrogar las licencias de numerosos reactores en funcionamiento se mantuvo en 2010. En los EE.UU., la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) renovó la licencia de explotación de la central nuclear Cooper en Nebraska y la Duane Arnold en Iowa por 20 años más, lo que eleva a 61 el número total de renovaciones de licencias aprobadas desde 2000. Además, en 2010 la NRC aprobó seis solicitudes de aumento de potencia y doce, que comprendían en total alrededor de 1 355 MW(e), estaban en curso de examen. En el Reino Unido, la Inspección de Instalaciones Nucleares concedió una prórroga de la licencia de explotación para la central nuclear de doble unidad de Wylfa por un máximo de dos años más. Además, concedió prórrogas de licencia de 30 a 35 años para cuatro reactores en Hartlepool y Heysham-1. En la Federación de Rusia, Rostechndzoz, el regulador ruso, expidió una prórroga de licencia de explotación de 15 años para la Unidad 4 de la central nuclear Leningrad.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2010)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2010		Experiencia operacional total hasta 2010	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	17	20 490			133.01	28.38	768	5
ARGENTINA	2	935	1	692	6.69	5.91	64	7
ARMENIA	1	375			2.29	39.42	36	8
BÉLGICA	7	5 926			45.73	51.16	240	7
BRASIL	2	1 884	1	1 245	13.90	3.06	39	3
BULGARIA	2	1 906	2	1 906	14.24	33.13	149	3
CANADÁ	18	12 569			85.50	15.07	600	2
CHINA	13	10 058	28	28 230	70.96	1.82	111	2
COREA, REPÚBLICA DE	21	18 698	5	5 560	141.89	32.18	360	1
ESLOVAQUIA	4	1 816	2	782	13.54	51.80	136	7
ESLOVENIA	1	666			5.38	37.30	29	3
ESPAÑA	8	7 514			59.26	20.09	277	6
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	104	101 240	1	1 165	807.08	19.59	3 603	11
FEDERACIÓN DE RUSIA	32	22 693	11	9 153	159.41	17.09	1026	5
FINLANDIA	4	2 716	1	1 600	21.89	28.43	127	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 600	410.09	74.12	1 758	4
HUNGRÍA	4	1 889			14.66	42.10	102	2
INDIA	19	4 189	6	3766	20.48	2.85	337	3
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL			1	915				
JAPÓN	54	46 821	2	2 650	280.25	29.21	1 494	8
MÉXICO	2	1 300			5.59	3.59	37	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3.75	3.38	66	0
PAKISTÁN	2	425	1	300	2.56	2.60	49	10
REINO UNIDO	19	10 137			56.85	15.66	1 476	8
REPÚBLICA CHECA	6	3 678			26.44	33.27	116	10
RUMANIA	2	1 300			10.70	19.48	17	11
SUDÁFRICA	2	1 800			12.90	5.18	52	3
SUECIA	10	9 303			55.73	38.13	382	6
SUIZA	5	3 238			25.34	38.01	179	11
UCRANIA	15	13 107	2	1900	83.95	48.11	383	6
Total ^{b, c}	441	375 267	67	64 064	2629.95	NA	14 353	4

a. Datos del Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del Organismo (<http://www.iaea.org/pris>)

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

Taiwán (China): 6 unidades, 4 982 MW en funcionamiento; 2 unidades, 2 600 MW en construcción; 39,89 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 19,3% del total de electricidad generada.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (81 años) y Kazajstán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (176 años y 1 mes).

30. En algunos países europeos, en los que anteriormente se habían puesto restricciones a la utilización de la energía nucleoelectrica en el futuro, la tendencia a reconsiderar estas políticas, iniciada en 2009, se mantuvo en 2010. En España, el Gobierno concedió una prórroga de licencia de 10 años para la central nuclear de Almaraz, que tiene dos unidades, y para la unidad 2 de la central nuclear de Vandellós. En noviembre de 2010, la CE inició oficialmente la Iniciativa Industrial Sostenible Nuclear Europea (ESNII) en apoyo del Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética (Plan EETE). Mediante la ESNII se aborda la necesidad de demostrar las tecnologías de los reactores de neutrones rápidos de la generación IV, junto con las infraestructuras de investigación de apoyo, la instalaciones del combustible y las actividades de I+D. La ESNII se concentra en el diseño y la construcción de prototipos de sistemas nucleares de la próxima generación, en la determinación de formas de prolongar la vida útil de las centrales nucleares existentes y en la elaboración de soluciones de gestión de desechos radiactivos a largo plazo.

31. Siguió habiendo gran interés en estudiar la energía nucleoelectrica como una opción, y más de 60 Estados Miembros indicaron al Organismo que estaban interesados en considerar la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica. El OIEA ofrece a esos Estados Miembros amplia ayuda en forma de normas y directrices, mayor asistencia técnica, servicios de examen, creación de capacidad y redes de conocimientos, entre otras cosas. En diciembre de 2010 el Organismo llevó a cabo una misión de Examen integrado de la infraestructura nuclear (INIR) en Tailandia.

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

32. El Organismo actualiza anualmente sus proyecciones bajas y altas relativas al crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica. En 2010, pese a la continua atonía de la economía mundial, predominaron las expectativas altas en relación con el futuro de la tecnología. Esto puede apreciarse en la revisión de 2010 de la proyección baja del Organismo relativa a la capacidad mundial, que aumentó hasta 546 GW(e) en 2030 frente a la proyección de 2009 de 511 GW(e). En la proyección alta actualizada, la capacidad mundial alcanzaba 803 GW(e), lo que constituía una ligera reducción frente a la de 2009, de 807 GW(e). El margen entre las proyecciones alta y baja para 2030 siguió siendo alto, pese a haber disminuido a 257 GW(e).

33. La variación al alza de las dos proyecciones de 2010 es mayor en el caso de Asia, región que no solo incluye países que actualmente poseen programas nucleoelectricos comerciales, como China, la India, el Japón, la República de Corea y el Pakistán, sino también varios países que se incorporan al ámbito nuclear de los que es razonable esperar que tengan centrales nucleares en funcionamiento para 2030 (véase la figura A-1). En la proyección baja, esta región por sí sola representa el 85% del aumento neto de la capacidad nuclear entre 2009 y 2030. La elevada demanda energética, especialmente de electricidad, se debe al aumento constante de la población, las aspiraciones a un desarrollo económico acelerado y preocupaciones relativas a la seguridad energética. Esta elevada demanda de energía, unida a un futuro que muy probablemente estará caracterizado por unos precios altos e inestables de los combustibles fósiles y consideraciones medioambientales, ha alentado a buscar suministros energéticos con baja emisión de carbono, de los que forma parte la energía nucleoelectrica.

34. Según las proyecciones de 2010, en el resto del mundo, salvo en los países de la Comunidad de Estados Independientes (CEI), donde el aumento proyectado es más importante, se prevé solo un modesto incremento de la capacidad de generación nuclear. Las incertidumbres en la demanda de electricidad – debidas a la lenta recuperación económica, la falta de certeza en relación con un nuevo acuerdo internacional ambiental sobre el cambio climático y el futuro en general, así como el continuo conservadurismo financiero tras la crisis financiera – dieron lugar a una actitud de espera en Europa y América del Norte. En esta última, el reciente auge de los suministros de gas procedente de

formaciones de esquistos arcillosos baratos también puede haber contribuido a la ralentización de las expectativas.

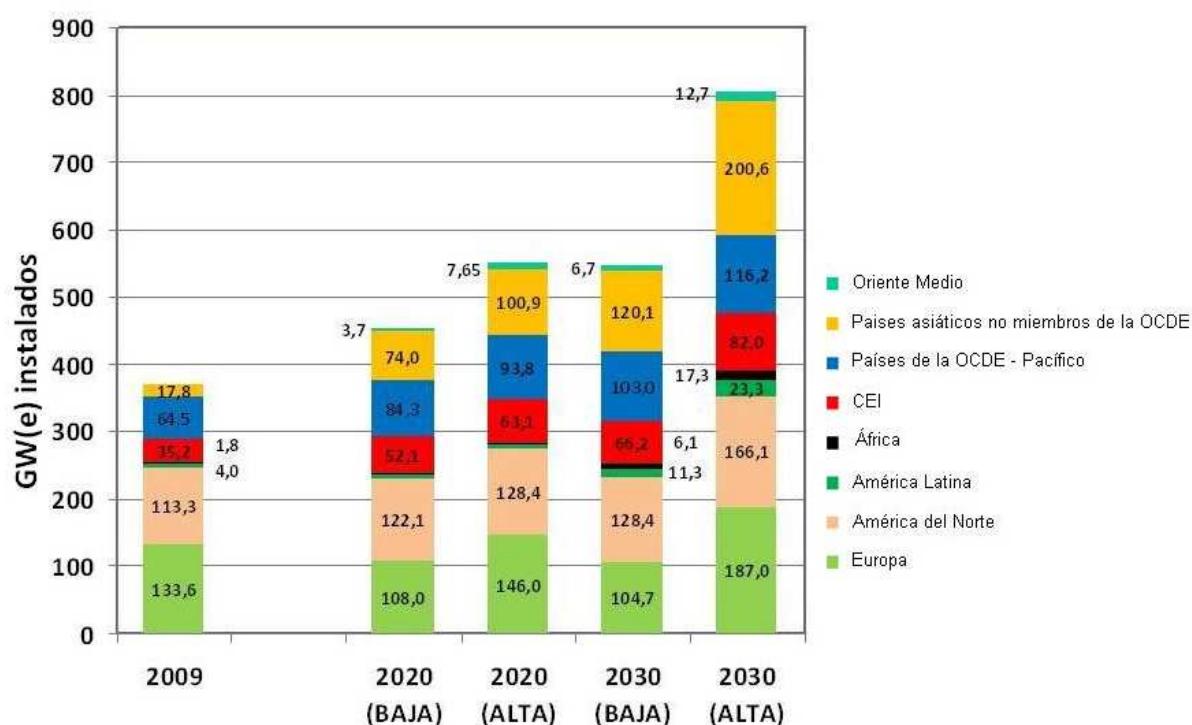


FIG. A-1. FIG. A-1. Desarrollo de las capacidades regionales de generación de energía nucleoelectrónica, 2009 a 2030, proyecciones bajas y altas de 2010.

35. La proyección alta da a entender que los factores a mediano y largo plazo que generan expectativas crecientes se estaban convirtiendo de nuevo en 2010 en una fuerza dominante, concretamente los buenos resultados constantes de las centrales nucleares, así como su seguridad, las continuas preocupaciones sobre el calentamiento de la Tierra, la seguridad del suministro de energía y los precios elevados e inestables de los combustibles fósiles, y el aumento constante previsto de la demanda de energía a mediano y largo plazo. Una recuperación económica más rápida en las proyecciones de 2010 se traduce en un aumento de la demanda de electricidad, lo que da lugar a la expansión de la generación de energía nucleoelectrónica en todas las regiones. Con todo, Asia representa casi el 60% del aumento de la capacidad global y, una vez más, domina la proyección alta. El resto de la expansión se da en los países nucleoelectrónicos tradicionales de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y la CEI, mientras que los países que se incorporan a este ámbito muestran claros indicios de fuerte participación en el mercado alrededor de 2025-2030.

36. Las proyecciones de la publicación *2010 World Energy Outlook* de la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la OCDE (figura A-2) siguen una trayectoria en buena parte similar a la de las proyecciones de 2010 del OIEA, y en su “Escenario de Políticas Actuales” se predice una potencia instalada global total de 535 GW(e) para 2030 (frente a 546 GW(e) de la proyección baja del OIEA), mientras que en el escenario de las 450 ppm², la potencia nucleoelectrónica asciende a 760 GW(e) para 2030 (cerca de los 803 GW(e) de la proyección alta del OIEA).

² El escenario de las 450 ppm limita la concentración máxima de gas atmosférico de efecto invernadero a 450 partes por millón (ppm) e implica una transformación sustancial del sistema energético global.

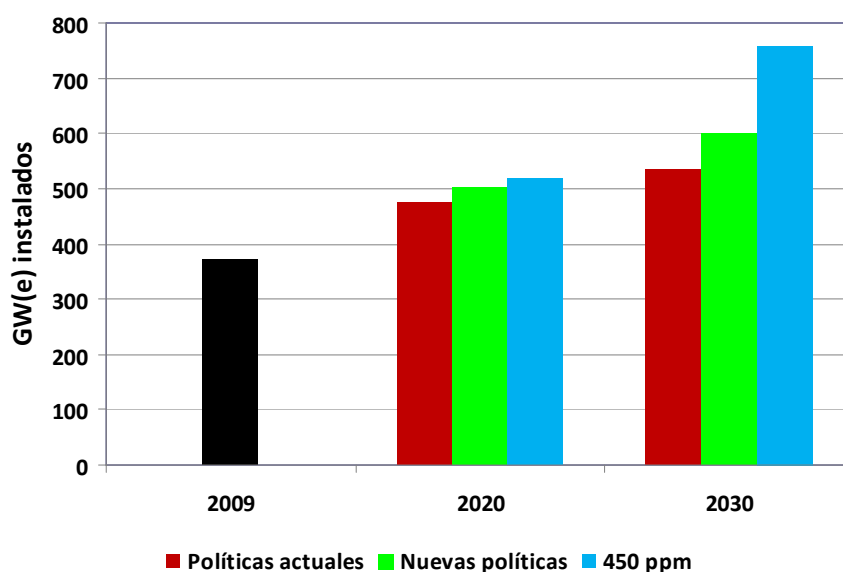


FIG. A-2. Incidencia de las distintas políticas en la expansión mundial de la energía nucleoelectrica entre 2009 y 2030 (Fuente: 2010 World Energy Outlook).

A.3. Ciclo del combustible³

A.3.1. Recursos y producción de uranio

37. En 2010, la AEN/OCDE y el OIEA publicaron la edición más reciente del "Libro Rojo", Uranio 2009: Recursos, Producción y Demanda. En él se estimaban los recursos de uranio convencionales identificados, recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg U, en 5,4 millones de toneladas métricas. Esto representa un 1,2% menos de lo estimado en la edición anterior. Además, se estimaban 0,9 toneladas métricas de recursos de uranio convencionales identificados recuperables a un costo situado entre 130 dólares/kg U y 260 dólares/kg U, por lo que el total de recursos identificados recuperables a un costo inferior a 260 dólares/kg U asciende a 6,3 toneladas métricas de uranio. A modo de referencia, el precio al contado del uranio en 2010 fluctuó entre 105 y 115 dólares/kg U hasta mediados del año antes de registrar un fuerte aumento y alcanzar los 160 dólares/kg U a finales del año, lo que representa un récord en los dos últimos años.

38. Los recursos totales no descubiertos (recursos pronosticados y especulativos) indicados en el Libro Rojo ascendían a más de 10,4 toneladas métricas de uranio, lo que supone una ligera disminución respecto de las 10,5 toneladas métricas notificadas en la edición anterior (publicada en 2008). Los recursos convencionales no descubiertos se estimaron en más 6,5 toneladas métricas de uranio a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, más otras 0,37 toneladas métricas de uranio a costos que oscilaban entre 130 y 260 dólares/kg de U. Ello incluía tanto los recursos que se prevé que se encuentren en yacimientos conocidos o cerca de ellos, como los recursos más especulativos que se cree que existen en zonas geológicamente favorables, pero aún inexploradas. También se incluían otras 3,6 toneladas métricas de uranio estimadas de recursos especulativos para las cuales no se especificaron los costos de producción.

³ 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/Anrep2010>) y en la dirección <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.

39. Los recursos de uranio no convencionales y el torio amplían aún más la base de recursos. Los recursos no convencionales comprenden el uranio presente en el agua de mar y los recursos de los que el uranio solo se puede recuperar como producto secundario de poca importancia. Muy pocos países notifican en la actualidad sus recursos no convencionales. Las estimaciones realizadas en el pasado del uranio potencialmente recuperable asociado a los fosfatos, los minerales no ferrosos, la carbonatita, el esquisto negro y el lignito son del orden de 10 toneladas métricas de uranio. Los recursos mundiales de torio se han estimado en unas seis toneladas métricas. Aunque el torio se ha utilizado como combustible a escala de demostración, aún se requieren trabajos más exhaustivos para poderlo considerar en pie de igualdad con el uranio.

40. En el Libro Rojo se incluyen datos sobre gastos en prospección y explotación de minas a escala mundial únicamente hasta 2008. Ascendieron a un total de 1 641 millones de dólares en 2008, lo que supuso un incremento del 133% con respecto a las cifras de 2006 consignadas en la edición anterior del Libro Rojo.

41. La producción mundial de uranio en 2009 fue superior a 50 770 toneladas, lo que representa un aumento del 16% respecto de la cifra de 43 800 toneladas en 2008. Se estima que la producción aumentará en 2010 a 55 000 toneladas de uranio. Australia, el Canadá y Kazajstán representaron el 63% de la producción mundial en 2009, y esos tres países junto con los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Namibia, el Níger y Uzbekistán representaron el 93%. En Kazajstán, la producción de uranio en 2009 aumentó más del 70% desde 2008, lo que hizo del país, con mucho, el principal productor de uranio del mundo en 2009 (en 2003 ocupaba el quinto lugar y en 2008 el segundo). Además, se prevé que la producción total de uranio de Kazajstán en 2010 aumente un 30% en comparación en 2009. En Malawi, la producción de uranio comenzó en 2009 con 100 toneladas. En 2010 llegó a 660 toneladas.

42. La producción de uranio en 2009 solo fue suficiente para satisfacer a un 82% de las necesidades estimadas de los reactores del mundo, que ascienden a 61 730 toneladas de uranio. Para el resto se utilizaron cinco fuentes secundarias: las reservas de uranio natural, las reservas de uranio enriquecido, el uranio reprocesado a partir de combustible gastado, el combustible de mezcla de óxidos (MOX) con uranio 235 parcialmente sustituido por plutonio 239 procedente de combustible gastado reprocesado, y el nuevo enriquecimiento de colas de uranio empobrecido (el uranio empobrecido contiene menos del 0,7% de uranio 235). Al ritmo de consumo estimado para 2009, la duración prevista de las 5,4 toneladas métricas de recursos de uranio convencionales identificados recuperables a menos de 130 dólares/kg U es de unos 90 años, lo cual es positivo si se compara con las reservas de 30 a 50 años correspondientes a otros productos básicos (por ejemplo, el cobre, el zinc, el petróleo y el gas natural).

43. Sobre la base de las proyecciones disponibles en 2010, se proyectó un aumento de las necesidades mundiales anuales de uranio en relación con los reactores situada entre 87 370 toneladas y 138 165 toneladas para 2035. Actualmente la capacidad proyectada de producción de uranio de fuentes primarias, comprendidos los centros de producción existentes, comprometidos, planificados y posibles, podría satisfacer la demanda mundial de uranio proyectada hasta 2028, si nos basamos en la cifra superior de estos límites, o hasta 2035, si nos basamos en la cifra inferior. Tras esas fechas, para que la producción pueda suministrar combustible para todos los reactores durante la totalidad de sus vidas útiles operacionales, incluidos los reactores nuevos que se conecten a la red hasta 2035, se deberá disponer de nuevos recursos, se deberán explotar nuevas minas y las existentes deberán ampliarse de forma oportuna.

A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible

44. La capacidad de conversión mundial total se mantuvo estable en 2010 en unas 76 000 toneladas de uranio natural (t U) anuales en el caso del hexafluoruro de uranio (UF₆) y de 4 500 t U anuales en

el del dióxido de uranio (UO₂). La demanda de conversión de UF₆ también se mantuvo estable en unas 62 000 t U anuales.

45. La capacidad de enriquecimiento mundial total es actualmente de unos 60 millones de unidades de trabajo de separación (UTS) anuales, frente a una demanda total de aproximadamente 45 millones de UTS anuales. Para sustituir las instalaciones antiguas de difusión gaseosa y en previsión de una expansión mundial de la energía nucleoelectrónica, se están desarrollando o construyendo cuatro nuevas instalaciones de enriquecimiento a escala comercial, todas ellas de enriquecimiento por centrifugación: Georges Besse II en Francia y la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América (ACP), la instalación Eagle Rock de Areva y la instalación URENCO USA (anteriormente denominada Instalación nacional de enriquecimiento (NEF)) en los Estados Unidos. La explotación comercial en Georges Besse II comenzó en diciembre de 2010 con la entrega del primer contenedor de uranio. En cuanto a la instalación URENCO USA, las actividades comerciales comenzaron en junio de 2010. Asimismo, la NRC ha publicado un informe de evaluación de la seguridad favorable en relación con la instalación de enriquecimiento por láser de 3 a 6 millones de UTS propuesta por Global Laser Enrichment (GLE) para Carolina del Norte. GLE ha completado con éxito la fase inicial del programa de circuito de ensayo para la tecnología de enriquecimiento mediante separación de isótopos por excitación por láser (SILEX).

46. Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) prevé comenzar la explotación comercial de las cascadas de centrifugadoras mejoradas de Rokkasho-mura en 2011 y aumentar la capacidad actual de 150 000 UTS hasta 1,5 millones de UTS antes de 2020. En 2010, Armenia y Ucrania se unieron a Kazajistán y la Federación de Rusia como miembros del Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio (IUEC), creado en 2007 en Angarsk (Federación de Rusia). La Argentina reactivó su planta de enriquecimiento por difusión gaseosa de Pilcaniyeu, en la que la producción llevaba más de dos decenios interrumpida. La planta está siendo puesta nuevamente en servicio y se prevé que entre en funcionamiento en septiembre de 2011.

47. En 2010 se pusieron en servicio tres instalaciones de reconversión, dos en los Estados Unidos de América (en Paducah (Kentucky) y Portsmouth (Ohio)) y una (W-ECP en Krasnoyarsk) en la Federación de Rusia. Actualmente, la capacidad total mundial de reconversión es de unas 60 000 t anuales.

48. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores aprobó la creación de un banco de uranio poco enriquecido (UPE) del OIEA que será propiedad del Organismo y estará administrado por éste, como provisión a la que recurrir en última instancia para la generación de energía nucleoelectrónica. En caso de que el suministro de UPE de un Estado Miembro se vea interrumpido y no pueda reestablecerse en el mercado comercial, mediante acuerdos entre Estados o por cualquier otro medio similar, el Estado Miembro podrá pedir al banco de UPE del OIEA que garantice el suministro de UPE. El establecimiento del banco de UPE es un instrumento adicional cuyo objetivo es garantizar el suministro de material nuclear para combustible y resulta del acuerdo aprobado por la Junta en noviembre de 2009, que el Organismo concertó con la Federación de Rusia en marzo de 2010, para crear una reserva de UPE para el suministro a los Estados Miembros del OIEA. En diciembre de 2010, la Corporación Estatal de Energía Atómica de Rusia (Rosatom) abasteció hasta su capacidad prevista de 120 t de UPE la reserva de combustible, que fue sometida a las salvaguardias del OIEA en la instalación nuclear de Angarsk en Siberia.

49. La capacidad mundial total de fabricación de combustible se mantuvo en unas 13 000 t U anuales (uranio enriquecido) en el caso del combustible para reactores de agua ligera (LWR) y en unas 4 000 t U anuales (uranio natural) en el caso del combustible para reactores de agua pesada a presión (PHWR). La demanda total también se mantuvo estable en unas 10 400 t U anuales. Se están realizando actividades de ampliación de las instalaciones existentes en China, los Estados Unidos de

América y la República de Corea, y está prevista la construcción de nuevas instalaciones de fabricación en Kazajstán y Ucrania. La instalación de fabricación proyectada en Kazajstán, con una capacidad prevista de 400 t U anuales, es una empresa conjunta de AREVA y Kazatomprom y se prevé que esté concluida en 2014.

50. La capacidad de fabricación actual de combustible de mezcla de óxidos de uranio y plutonio (MOX) es de unas 250 toneladas de metal pesado (t HM); las principales instalaciones se encuentran en Francia, la India y el Reino Unido, con algunas más pequeñas en la Federación de Rusia y el Japón. En octubre de 2010, la JNFL inició la construcción de una nueva instalación de fabricación de combustible de MOX (130 t HM de MOX) en Rokkasho, prefectura de Aomori, que está previsto que concluya en marzo de 2016. Una instalación similar está proyectada para Seversk (Tomsk-7) en la Federación de Rusia, que también ha previsto la construcción de una instalación comercial de 60 t anuales para fabricar combustible de MOX y una instalación de 14 t anuales de fabricación de combustible denso de mezcla de nitruros para reactores de neutrones rápidos. En el Reino Unido, una nueva instalación de fabricación de MOX se añadirá a la planta de MOX de Sellafield para permitir el cumplimiento de nuevos contratos a largo plazo de suministro de MOX. Se está construyendo capacidad adicional de fabricación de combustible de MOX en los Estados Unidos de América a efectos de utilizar excedentes de plutonio apto para fabricar armas. Ikata-3 y Fukushima Daiichi-3 en el Japón comenzaron a utilizar combustible de MOX en 2010. En todo el mundo, 33 reactores térmicos utilizan actualmente combustible de MOX.

A.3.3. Parte final del ciclo del combustible

51. La cantidad total de combustible gastado descargada mundialmente es de unas 320 000 t HM, de las cuales unas 95 000 t HM ya han sido reprocesadas y unas 225 000 t HM se encuentran almacenadas en piscinas de almacenamiento de combustible gastado de los reactores o en instalaciones de almacenamiento fuera del emplazamiento del reactor. Las instalaciones de almacenamiento fuera del emplazamiento del reactor se amplían periódicamente. La capacidad total mundial de reprocesamiento es de unas 5 000 t HM anuales. Las pruebas de puesta en servicio finales han comenzado en la nueva planta de reprocesamiento de Rokkasho en el Japón, que actualmente se prevé que esté concluida en 2012. China está construyendo una planta de reprocesamiento piloto y los ensayos en caliente acabaron a finales de 2010. También proyecta construir una instalación comercial de reprocesamiento y aún se está llevando a cabo el proceso de selección del emplazamiento.

52. Ha comenzado una demostración del uso directo de uranio reciclado como combustible en un reactor CANDU en la central nuclear de Qinshan en China.

53. En la India está en curso la construcción de la primera instalación del ciclo del combustible para reactores rápidos (FRFCF), que comprende una planta de fabricación y reprocesamiento de combustible, una planta de subensamblaje del núcleo del reactor, una planta de óxido de uranio reprocesado y una planta de gestión de los desechos para dar servicio al próximo prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW.

A.3.4. Gestión de desechos radiactivos y clausura

54. El inventario mundial de desechos radiactivos declarados como desechos almacenados en 2008 (el año más reciente disponible) fue de aproximadamente 17,6 millones de metros cúbicos⁴ (cuadro A-2). La cantidad de desechos radiactivos sometidos a disposición final fue de unos 640 000 metros cúbicos anuales, principalmente desechos de actividad baja y muy baja (LLW y VLLW, indicados a

⁴ Estimación elaborada utilizando la Base de datos sobre gestión de desechos en Internet (NEWMDB) del OIEA y otras fuentes de libre acceso en el caso de países que no envían notificaciones a la NEWMDB.

continuación como LILW-SL⁵). El volumen total sometido a disposición final hasta 2008 fue de unos 24,6 millones de metros cúbicos. La acumulación anual de desechos de actividad alta (HLW) procesados mantiene cierta constancia, con una tasa de acumulación media de unos 850 metros cúbicos anuales en todo el mundo.

Cuadro A-2. Estimación global del inventario de desechos radiactivos para 2008

Clase de desechos	Almacenamiento [metros cúbicos]	Disposición final acumulada [metros cúbicos]
<i>Desechos de actividad baja e intermedia de período corto (LILW-SL)</i>	3 618 000	24 349 000
<i>Desechos de actividad baja e intermedia de período largo (LILW-LL)</i>	13 609 000	208 000
<i>Desechos de actividad alta (HLW)</i>	384 000	4 000

Fuente: NEWMDB, 2010.

55. Se sigue vitrificando los desechos de actividad alta en varios países utilizando hornos de inducción de crisol caliente u hornos eléctricos de resistencia. El uso de un horno de inducción de crisol frío en la planta R7 en La Hague (Francia) sigue siendo un ejemplo del progreso en esta esfera. En el Reino Unido, la planta de vitrificación de Sellafield logró un importante hito en 2009 al concluir la fabricación del cincmilésimo contenedor de desechos sólidos de actividad alta. La JNFL siguió teniendo dificultades en 2010 con su unidad de vitrificación y tuvo que posponer la explotación comercial de su planta de reprocesamiento de Rokkasho por dos años más. En Hanford (Estados Unidos de América) la construcción de la planta de tratamiento de desechos (WTP) más grande del mundo está terminada en un 50% aproximadamente. La WTP, cuyo costo asciende a 12 mil millones de dólares, que está previsto que comience a funcionar en 2019, procesará y estabilizará unos 200 000 m³ de diversas clases de desechos históricos complejos mediante tratamiento previo seguido de vitrificación.

56. Más de 50 Estados Miembros están examinando alternativas o han comenzado a establecer opciones de disposición final apropiadas para sus inventarios de desechos. Las opciones examinadas incluyen: la disposición final en trincheras de VLLW (España, Francia), de desechos de materiales radiactivos naturales (NORM) (Malasia, República Árabe Siria) o de LLW en zonas áridas (Estados Unidos de América, República Islámica del Irán, Sudáfrica); las estructuras construidas cerca de la superficie para LLW (Bélgica, Bulgaria, Eslovenia, Lituania y Rumania); la disposición final a profundidades intermedias de LILW (Hungría, Japón, República de Corea) y desechos NORM (Noruega); así como la disposición final en pozos barrenados de LLW (Estados Unidos de América) y fuentes selladas en desuso (Filipinas, Ghana, República Islámica del Irán). Finlandia y Suecia están preparando la documentación correspondiente a las licencias de construcción de instalaciones geológicas profundas para combustible gastado.

⁵ El inventario de la NEWMDB se notifica actualmente conforme a las recomendaciones sustituidas del Organismo para la clasificación de desechos que figuran en el documento *Classification of Radioactive Waste*, Colección de Seguridad N° 111-G-1.1 (1994). Éstas han sido sustituidas recientemente por el nuevo sistema de clasificación que se presenta en el documento *Classification of Radioactive Waste*, Colección de Guías de Seguridad General N° GSG-1 (2009). Los datos que figuran en la NEWMDB se están convirtiendo actualmente al nuevo sistema de clasificación.

57. En enero de 2010 entró en vigor en Eslovenia un decreto que confirmaba el emplazamiento de su repositorio de LILW, ubicado cerca de la única central nuclear que existe en Eslovenia. Está previsto que la construcción comience dentro de dos o tres años. En el Canadá, la Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares (NWMO) inició en mayo de 2010 un proceso encaminado a seleccionar un emplazamiento de almacenamiento permanente para un repositorio geológico profundo a fin de almacenar combustible nuclear gastado mediante la publicación de una invitación a las comunidades interesadas a presentar sus candidaturas. En Alemania, se ha iniciado la construcción de un repositorio subterráneo para LILW en la antigua mina de hierro de Konrad, en la Baja Sajonia. En Suecia, la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB) presentó en marzo de 2011 su solicitud para un repositorio geológico final de combustible gastado que se ubicará en Östhammar. La construcción del repositorio de combustible nuclear debería comenzar en 2015, y se prevé que las actividades de disposición final se inicien en 2025. En el emplazamiento de Olkiluoto en Finlandia, el túnel de acceso de Onkalo se excavó hasta alcanzar a finales de 2010 una longitud de 4 570 m y una profundidad de disposición final definitiva de 434 m. Inicialmente, Onkalo funcionará como instalación subterránea de caracterización de rocas para asegurar la idoneidad del emplazamiento. Posteriormente, el túnel de acceso y otras estructuras subterráneas se utilizarán para la disposición final. La solicitud de la licencia de construcción está prevista para 2012 y el proceso de licencia de explotación en torno a 2020.

58. En los Estados Unidos, se estableció en enero de 2010 la Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América, después de que el Gobierno estadounidense decidiera en 2009 no proceder a la construcción del repositorio geológico profundo de Yucca Mountain. La Comisión, creada para formular recomendaciones a fin de hallar una solución a largo plazo en relación con la gestión del combustible nuclear gastado y los desechos nucleares de los Estados Unidos, tiene previsto abordar la cuestión del almacenamiento temporal del combustible gastado durante períodos que vayan desde 120 años hasta un máximo de 300 años. Está previsto que un primer informe, de carácter provisional, esté disponible en julio de 2011, y que el informe final de la Comisión lo esté en 2012. Asimismo, el presidente de la NRC ordenó al personal de la NRC suspender el examen de la solicitud de licencia para Yucca Mountain en octubre de 2010.

59. La Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) de Francia presentó una nueva edición del plan nacional para la gestión de materiales radiactivos. En ella se incluye un proyecto para la disposición final geológica reversible a largo plazo de desechos de actividad alta y media y un proyecto para la disposición final a poca profundidad a largo plazo de desechos radiactivos de actividad baja. Francia está avanzando en sus preparativos para la construcción de su repositorio geológico de HLW; la instalación también acogerá desechos de actividad intermedia (ILW) nacionales.

60. Se han puesto en marcha numerosas iniciativas bilaterales y multilaterales conjuntamente con el Organismo para mejorar el control de las fuentes radiactivas selladas y retirarlas de ubicaciones que no son ni tecnológica ni físicamente seguras. Las fuentes de actividad alta plantean problemas específicos debido a las importantes restricciones que impiden su traslado sin dificultades. La celda caliente móvil, tecnología desarrollada por la Nuclear Energy Corporation of South Africa (Necsa) en el marco de un contrato con el Organismo, se utilizó en 2010 en el Uruguay para extraer 14 componentes que contenían fuentes de actividad alta de los dispositivos donde estaban alojados y colocarlos en contenedores de transporte para su repatriación al país de origen.

61. En noviembre de 2010, la Comisión Europea publicó una propuesta de Directiva del Consejo sobre la gestión del combustible gastado y los desechos radiactivos, que incluía la solicitud a los Estados Miembros de la Unión Europea de que presentaran programas nacionales en los que indicaran cuándo, dónde y cómo construirán y administrarán repositorios finales encaminados a garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad más estrictas.

Clausura

62. Las estadísticas mundiales sobre la clausura de reactores de potencia no variaron significativamente en 2010. Al final del año, 124 reactores de potencia se encontraban en régimen de parada. De ellos, 15 se habían desmantelado completamente, 52 estaban en proceso de desmantelamiento o estaba previsto su desmantelamiento a corto plazo, 48 estaban sometidos a confinamiento seguro, tres estaban sepultados y, en el caso de otros seis, aún no se habían especificado estrategias de clausura.

63. El proceso de desmantelamiento del reactor de investigación Moata de la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear, el primer reactor que se clausurará en Australia, comenzó en julio de 2009 con el desmantelamiento preliminar y la retirada de todos los componentes internos. El desmantelamiento del blindaje biológico comenzó en marzo de 2010 y finalizó en septiembre de 2010. La clausura del reactor tipo Argonauta de 100 kW(t) finalizó con éxito en el marco del presupuesto acordado (4,2 millones de dólares australianos) y con una duración total del proyecto de dos años desde que se recibió la licencia de clausura hasta que el emplazamiento se declaró apto para otros usos.

64. En Europa Central y Oriental, la clausura de reactores en régimen de parada ha comenzado a acelerarse con los proyectos en curso en Bulgaria, Eslovaquia, Lituania y Ucrania. Todas las centrales nucleares de Europa Central y Oriental han elaborado, o están ultimando, planes preliminares de clausura en conformidad con las recomendaciones del Organismo.

65. Existen iniciativas en curso destinadas a abordar la cuestión de los desechos radiactivos históricos, acumulados en las primeras etapas del desarrollo de la ciencia, la industria y las tecnologías de defensa nucleares. El Grupo de Contacto de Expertos del Organismo, creado en 1996, ha demostrado ser un foro eficaz para el intercambio de información y la coordinación de los programas sobre el legado nuclear en la Federación de Rusia. Al final de 2010, la Federación de Rusia, con la importante ayuda de asociados internacionales que aportaron aproximadamente un tercio de la financiación del programa, había descargado el combustible de 191 submarinos nucleares que estaban fuera de servicio y los había desmantelado. Actualmente se están desmantelando cuatro submarinos y está previsto el desmantelamiento de otros cinco antes del final de 2012. Las unidades de reactor submarino, que generalmente contienen dos reactores descargados de combustible, están siendo selladas y colocadas en una instalación de almacenamiento a largo plazo. Está en curso la creación de dos centros regionales de acondicionamiento de desechos radiactivos y almacenamiento a largo plazo. También se está ejecutando un programa conjunto de recuperación de los potentes generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG) que se utilizaron para navegar por la costa de la Federación de Rusia: la mayoría de los 870 RTG rusos ya se ha recuperado y solo faltan 248.

A.4. Seguridad⁶

66. Los indicadores de la seguridad, como los publicados por la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN) y reproducidos en las figuras A-3 y A-4, mejoraron extraordinariamente en el decenio de 1990. En los últimos años, la situación se ha estabilizado en la mayoría de las esferas y en 2009 se registró una mejora. 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. En el Examen de la seguridad nuclear correspondiente al año 2010 se presenta

⁶ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del Organismo relativas a la seguridad nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010/>), y en la dirección <http://www-ns.iaea.org/>.

información más detallada sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares.

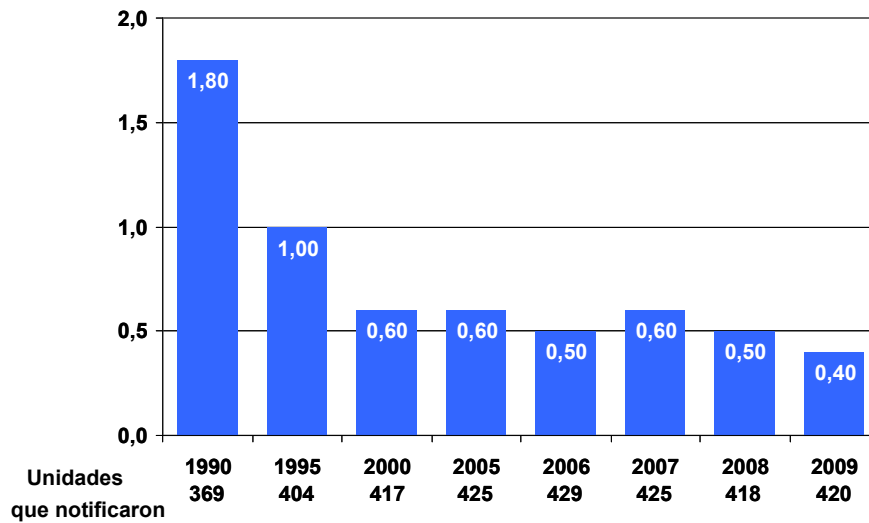


FIG. A-3. Paradas de emergencia automáticas no previstas por 7 000 horas de criticidad (fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2009).

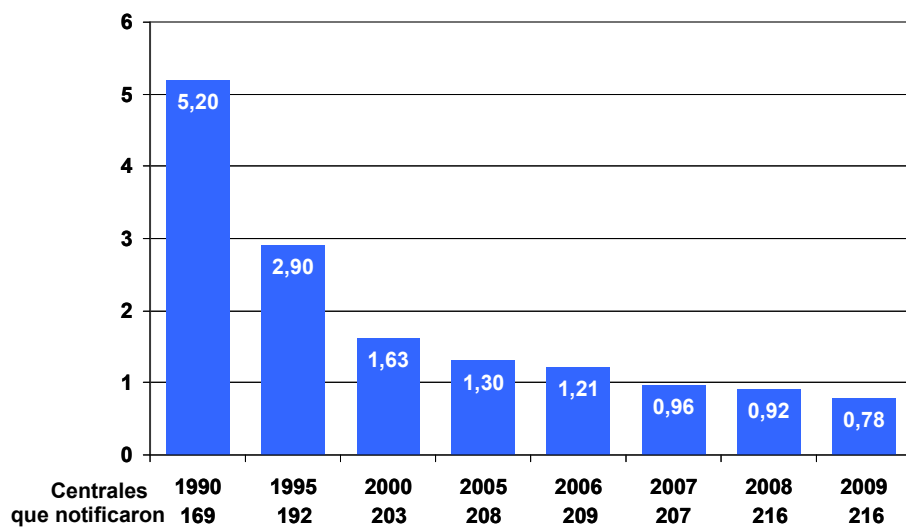


Fig. A-4. Tasa de accidentes relacionados con la seguridad industrial en centrales nucleares por 1 000 000 de horas-persona trabajadas (fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2009). Nota: Estos incidentes no son necesariamente de carácter radiológico.

B. Fisión avanzada y fusión

B.1. Fisión avanzada⁷

B.1.1. Reactores refrigerados por agua⁸

67. En el ámbito de los reactores de pequeña y mediana potencia, la Argentina ha comenzado a preparar la construcción de un prototipo de reactor de potencia de 25 MW(e) sobre la base del “concepto CAREM”. Se prevé que el reactor sea operativo a mediados del decenio. Se están realizando estudios preliminares de viabilidad para la construcción de una unidad de 150 MW(e).

68. En 2010, China inició la construcción de ocho nuevos reactores, entre ellos los reactores de agua a presión (PWR) evolutivos de 610 MW(e) y 1 000 MW(e), que se basan en la tecnología existente de las centrales en explotación, así como en diseños más nuevos del AP-1000 y los diseños del reactor europeo de agua a presión (EPR). Actualmente China está desarrollando los diseños CAP-1400 y CAP-1700, que son versiones más potentes del AP-1000. Al mismo tiempo, China está invirtiendo en investigación para el diseño de un reactor refrigerado por agua supercrítica (SCWR).

69. En Francia AREVA sigue comercializando el EPR de 1600+ MW(e) para aplicaciones nacionales e internacionales. AREVA también está desarrollando el PWR ATMEA de 1100+ MW(e), junto con Mitsubishi Heavy Industries del Japón, y el reactor de agua en ebullición (BWR) KERENA de 1250+ MW(e), en asociación con E.ON de Alemania.

70. En 2010, el Japón inició la construcción de un nuevo reactor avanzado de agua en ebullición (ABWR). Hitachi sigue desarrollando versiones del ABWR de 600, 900 y 1700 MW(e), así como el ABWR-II de 1700 MW(e). 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, que está siguiendo el proceso de la NRC de certificación del diseño. También se está desarrollando una versión europea del APWR, el EU-APWR, y se evaluará si cumple los requisitos para compañías eléctricas europeas. Además, el Japón también sigue desarrollando un diseño innovador de un reactor refrigerado por agua supercrítica.

71. En 2010 se conectó a la red en la República de Corea un nuevo OPR-1000 autóctono. La construcción del primer reactor de potencia avanzado, el APR-1400, avanza según lo previsto y a finales de 2009 se adjudicaron contratos para la construcción de otros cuatro APR-1400 en los Emiratos Árabes Unidos. La República de Corea está desarrollando una versión europea del APR-1400, el EU-APR-1400, que se evaluará para determinar si cumple los requisitos para compañías eléctricas europeas. También está desarrollando una versión estadounidense, el US-APR-1400, que se presentará a la NRC para la certificación del diseño. Paralelamente, en 2010 continuó el desarrollo del APR+ de 1500 MW(e) y se anunció el inicio del diseño del APR-1000. En lo que respecta a los reactores de pequeña y mediana potencia, la República de Corea redobló sus esfuerzos para desarrollar el PWR integral SMART de 330 MW(t).

72. En la Federación de Rusia comenzó en 2010 la construcción de otros dos reactores, entre ellos un WWER-1200. También se anunciaron planes para desarrollar el WWER-1200A, así como el WWER-600 y el WWER-1800, basados en el diseño actual del WWER-1200. Además, la Federación de Rusia

⁷ More detailed information on Agency activities concerning advanced fission reactors is available in relevant sections of the latest Annual Report (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2010/>)

⁸ Detailed technical information about all the advanced reactor designs mentioned in this section is available in the Agency’s Advanced Reactors Information System (ARIS) at <http://aris.iaea.org>.

está trabajando en un reactor innovador refrigerado por agua supercrítica WWER-SC, y prosigue la construcción del KLT 40S, un pequeño reactor flotante para aplicaciones especializadas.

73. En los Estados Unidos de América, la NRC avanza en el proceso de certificación de cinco diseños de reactores avanzados refrigerados por agua, a saber: el AP-1000, el US-APWR, el US-EPR, el Westinghouse SMR y el reactor económico simplificado de agua en ebullición (ESBWR). La NRC está examinando una certificación del diseño modificado para el AP-1000, que recibió la certificación del diseño en 2006. El ESBWR fue el primero de esta serie en recibir la aprobación (octubre de 2010). Además, se prevé que en el futuro próximo también se presentarán a la NRC para su certificación los diseños del US-APR1400, el PWR integral mPower de 125 MW(e) de Babcock & Wilcox y el PWR integral de 45 MW(e) de NuScale Power.

74. En el Canadá, la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN) finalizó la fase I de un examen preliminar del diseño del proyecto del CANDU-6 mejorado de 700 MW(e), un diseño de la generación III que incorpora varias innovaciones a partir del diseño del CANDU-9 y de la experiencia reciente con unidades de CANDU-6 construidas en China y la República de Corea. La fase II del examen preliminar del diseño del proyecto del CANDU-6 mejorado, que se está ejecutando actualmente, finalizará a principios de 2012. La Atomic Energy of Canada Limited (AECL) también ha seguido desarrollando el reactor CANDU avanzado (ACR-1000), un diseño de la generación III+ 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 enero de 2011, la CCSN finalizó la fase 3 del examen preliminar del diseño del proyecto del reactor CANDU avanzado (ACR-1000), con lo que éste pasó a ser el primer reactor nuclear de potencia avanzado que había completado tres fases de este examen del diseño por la CCSN. La AECL también está desarrollando activamente un reactor CANDU de agua supercrítica, un diseño de la generación IV que favorecerá el liderazgo del Canadá en el programa del reactor refrigerado por agua supercrítica (SCWR) del Foro Internacional de la Generación IV.

75. En la India, un nuevo reactor de agua pesada a presión (PHWR) de 220 MW(e) se conectó a la red en 2010. La India está comercializando este reactor para construirlo en países con redes pequeñas. Otros seis reactores están en construcción, entre ellos un PHWR de 220 MW(e), dos PHWR evolutivos de 700 MW(e), dos WWER-1000 y el prototipo de reactor reproductor rápido de 500 MW(e). La Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL) ha desarrollado un PHWR evolutivo de 700 MW(e). En 2010 se iniciaron cuatro proyectos relacionados con ocho unidades de estos PHWR de 700 MW(e). El Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (BARC) está finalizando el diseño de un reactor avanzado de agua pesada (AHWR) de 300 MW(e), que utilizará torio con agua pesada como moderador, agua ligera en ebullición como refrigerante en tubos de presión verticales, y sistemas de seguridad pasivos.

B.1.2. Sistemas de neutrones rápidos

76. En China, el Reactor Experimental Rápido de China (CEFR) tipo piscina de 65 MW(t) (20 MW(e)) alcanzó la criticidad por primera vez el 21 de julio de 2010. Actualmente se está ejecutando el programa inicial de física del CEFR.

77. Las obras de construcción del prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR) de 500 MW(e) de la India en Kalpakkam se encuentran en una etapa muy avanzada: las vasijas de seguridad, primaria e interior están instaladas. El edificio del reactor está cerrado. La puesta en servicio está prevista para finales de 2012- principios de 2013.

78. En mayo de 2010 el Japón volvió a poner en marcha el prototipo de reactor reproductor rápido de 280 MW(e). Los ensayos de confirmación han empezado.

79. En la Federación de Rusia avanza la construcción del reactor rápido BN-800 en Beloyarsk. Ya se han encargado casi todos los componentes y la fabricación está muy avanzada. La puesta en servicio está prevista para 2013.

80. Bélgica ha creado, en el marco de la Euratom, un grupo para que realice los trabajos de diseño del MYRRHA (*multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications*), un reactor rápido experimental subcrítico. En 2010, el Gobierno de Bélgica asignó, para el período que va hasta 2014, 60 millones de euros para financiar la primera fase del proyecto MYRRHA. El costo total del proyecto, que goza del apoyo de la Euratom, la Comisión Europea, el Foro Europeo de la Estrategia sobre Infraestructuras de Investigación y la Iniciativa Industrial Sostenible Nuclear Europea, se estima en 960 millones de euros. Con el fin de ensayar la vigilancia de la subcriticidad se ha construido una instalación experimental, GUINEVERE, que combina un acelerador de deuterones en continuo con un blanco de titanio-tritio instalado en un sistema multiplicador subcrítico rápido refrigerado por plomo. Está previsto que GUINEVERE sea operacional en 2011.

B.1.3. Reactores refrigerados por gas

81. En China, el Gobierno ha aprobado el plan de aplicación correspondiente al reactor de demostración de alta temperatura refrigerado por gas. La licencia del proyecto se está examinando y el hormigonado de los cimientos está previsto para 2011.

82. En Sudáfrica, considerado el principal país en la construcción de reactores de alta temperatura refrigerados por gas, se interrumpieron en 2010 los planes para el reactor modular de lecho de bolas (PBMR) como resultado, entre otras cosas, de limitaciones financieras tras la crisis económica y financiera mundial. El proyecto se ha sometido a un “plan de cuidado y mantenimiento” para proteger la propiedad y los bienes intelectuales hasta que el Gobierno tome una decisión sobre nuevos planes.

83. En el Japón concluyeron ensayos más estrictos – 90 días en total con 50 días a 950°C – del reactor experimental de alta temperatura (HTTR). El Gobierno del Japón está investigando la viabilidad de conectar el HTTR a un sistema de producción de hidrógeno para producir hidrógeno en pequeña escala.

84. En el reactor experimental avanzado (ATR) del Laboratorio Nacional de Idaho, en los Estados Unidos de América, siguieron los ensayos sobre la seguridad del combustible tri-isotrópico (TRISO), medida por los fallos del combustible durante prolongados períodos de irradiación. Se iniciaron actividades de examen posterior a la irradiación relativas al primer experimento sobre combustible (AGR-1), y el circuito de ensayo del segundo experimento sobre combustible (AGR-2) se insertó en el ATR a mediados de 2010. El proyecto de la central nuclear de la próxima generación se ha retrasado ligeramente, y los estudios del diseño conceptual se finalizaron a principios de 2011. En general, la central nuclear de la próxima generación se centra en la producción de aplicaciones del calor industrial a alta temperatura con temperaturas a la salida del reactor superiores a 750°C. En 2011, las actividades se centrarán en la creación de una asociación pública-privada para iniciar el diseño, la obtención de licencias y la construcción de un reactor de demostración.

85. Desde hace seis años, la República de Corea viene invirtiendo en varias instalaciones de ensayo para realizar ensayos técnicos de sistemas y componentes de un reactor de alta temperatura acoplado a una instalación de producción de hidrógeno. También se prevén aplicaciones de calor industrial, así como la colaboración de varios usuarios de calor industrial con investigadores nucleares a fin de encontrar métodos óptimos para producir calor e hidrógeno por medio de un reactor de alta temperatura. La selección de un concepto de reactor está prevista para 2015, cuando ya habrá concluido la mayoría de los demás ensayos de sistemas. El proyecto de Desarrollo y demostración de la producción nuclear de hidrógeno (NHDD) está recibiendo un firme apoyo tanto de la industria como del Gobierno.

B.1.4. El INPRO y el GIF

86. El Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO), que da apoyo a los Estados Miembros en el desarrollo y la utilización de sistemas de energía nuclear sostenibles, celebró su 10º aniversario en 2010 y dio la bienvenida a un nuevo miembro, Polonia, con lo que el número total de miembros ascendió a 32. En el marco del Foro de diálogo del INPRO, celebrado dos veces en 2010, se mantuvo un debate continuo sobre diversos temas entre los interesados directos de todas las fases del desarrollo nuclear. Belarús y Kazajstán realizaron respectivamente dos evaluaciones de los sistemas de energía nuclear (NESA), y se publicó un documento del OIEA titulado *Introduction to the Use of the INPRO Methodology in a Nuclear Energy System Assessment*, como parte de un conjunto informativo de apoyo de las NESA para los Estados Miembros. En 2010 se finalizaron dos proyectos de colaboración, titulados *Resistencia a la proliferación: análisis de las vías de adquisición/desviación (PRADA)* y *Nuevas investigaciones del ciclo del combustible Th/²³³U (ThFC)*. En respuesta al mayor interés de los Estados Miembros por la elaboración conjunta de modelos de las tendencias mundiales y regionales relativas a la utilización de la energía nucleoelectrónica, el proyecto de colaboración titulado *Arquitectura global de los sistemas nucleares innovadores basados en reactores térmicos y rápidos, incluidos los ciclos del combustible cerrados (GAINS)* siguió realizando sus estudios metodológicos de simulación en relación con estrategias de transición de los sistemas de energía nuclear actuales a los futuros.

87. Mediante un sistema de contratos y acuerdos, el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) coordina las actividades de investigación sobre 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). Los seis sistemas seleccionados emplean una diversidad de tecnologías de reactor, conversión de energía y ciclo del combustible. En sus diseños se utilizan espectros de neutrones térmicos y rápidos, ciclos del combustible cerrados y abiertos, y una amplia gama de tamaños de reactores, desde muy pequeños hasta muy grandes. En función de sus respectivos grados de madurez técnica, se prevé que los sistemas de la generación IV estén disponibles para introducirlos comercialmente en el período comprendido entre 2015 y 2030 o más tarde. En la actualidad, el GIF tiene 13 miembros⁹.

88. El OIEA y el GIF cooperan en las esferas del riesgo y la seguridad, la resistencia a la proliferación y la protección física, la elaboración de modelos y las metodologías de evaluación económica, así como otros temas como los reactores de pequeña y mediana potencia, el torio y las implicaciones del ciclo del combustible. En 2010, un taller del OIEA/GIF se centró en aspectos de la seguridad operacional de los SFR, mejorando así el conocimiento de las cuestiones de seguridad relativas a esos reactores.

B.2. Fusión

89. Los elementos de referencia del diseño del dispositivo y la instalación del Reactor termonuclear experimental internacional (ITER) fueron acordados por todas las partes en la reunión extraordinaria del Consejo del ITER de julio de 2010. Desde entonces el ITER ha pasado oficialmente de la fase de examen del diseño a la fase de construcción. Según lo previsto en un calendario actualizado, el primer

⁹ Argentina, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos de América, Euratom, Federación de Rusia, Francia, Japón, República de Corea, Reino Unido, Sudáfrica y Suiza.

plasma se logrará en noviembre de 2019, y la explotación con deuterio-tritio comenzará a más tardar en marzo de 2027, lo que permitirá que el ITER alcance una potencia de salida de 500 MW.

90. Desde su inauguración en mayo de 2009, se han hecho importantes avances en la Instalación nacional de ignición del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (EE.UU.). En enero de 2010 se obtuvo un pulso de 1 MJ, y los experimentos de ignición integrada con un conjunto completo de detectores plenamente operativos comenzaron en septiembre de 2010. Estos experimentos incluyen investigaciones científicas básicas sobre alta densidad de energía en campos como la astrofísica, la física nuclear, el transporte de radiación, la dinámica de materiales y la hidrodinámica.

91. Dos nuevos tokamaks superconductores medianos están actualmente en pleno funcionamiento: el tokamak superconductor avanzado de investigación de Corea (KSTAR), en la República de Corea (figura B-1), y el tokamak superconductor experimental avanzado (EAST), en China. Estos experimentos relacionados con el ITER de pulso largo están destinados a investigar cuestiones pertinentes del ITER relacionadas con el funcionamiento en régimen estable. Ambos experimentos han iniciado el funcionamiento a alta potencia con la utilización de calentamiento de plasma adicional. En el Instituto Nacional de Investigación sobre la Fusión (NFRI) de Corea, que alberga el KSTAR, se celebró en octubre de 2010 la 23ª Conferencia del OIEA sobre energía de fusión (FEC 2010), en la que se presentaron informes sobre los últimos adelantos habidos en todos los experimentos importantes sobre plasma de fusión.



FIG. B-1. Dispositivo KSTAR en el NFRI, Daejeon (República de Corea).

C. Datos atómicos y nucleares

92. Las principales bases de datos nucleares elaboradas por la Red internacional de centros de datos sobre reacciones nucleares y la Red internacional de evaluadores de datos de estructuras y desintegración nucleares, que coordina el Organismo, son objeto de mejora constante. En 2010 cabe mencionar, en

particular, la mejora efectuada en el sistema de recuperación en la web para suministrar datos sobre reacciones nucleares y sus covarianzas en diversos formatos, entre ellos la visualización gráfica.

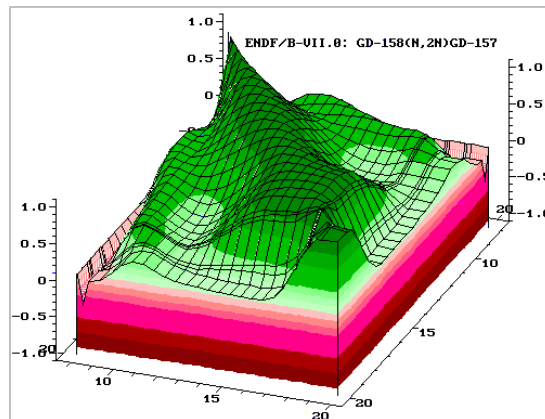


FIG. C-1. Gráfico tridimensional de correlaciones energía-energía para secciones eficaces de reacciones nucleares.

93. La Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión (IFMIF) es un proyecto internacional que se está desarrollando actualmente con el fin de probar materiales para su utilización en el reactor de demostración DEMO o reactor comercial de energía de fusión. Recientemente, España inició un proyecto nacional, TechnoFusión, para prestar apoyo técnico a la IFMIF y el DEMO en relación con la simulación de daño extremo en materiales por medio de iones ligeros y pesados. A fin de suministrar datos nucleares para estas y otras instalaciones de fusión, se necesita ampliar sustancialmente la Biblioteca de datos nucleares evaluados sobre fusión 2.1 (FENDL-2.1) de modo que incluya energías más altas, así como partículas cargadas incidentes y la evaluación de las incertidumbres conexas.

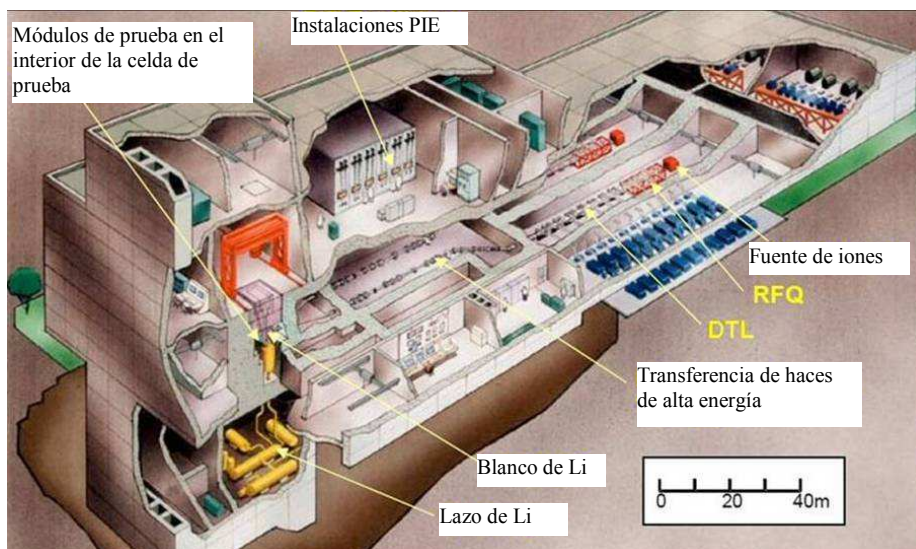


FIG. C-2. Diseño conceptual de la IFMIF (PIE = examen post-irradiación; RFQ =cuadropolo de radiofrecuencia; DTL = acelerador lineal de tubos de deriva).

94. La Conferencia Internacional sobre datos nucleares para la ciencia y la tecnología, de carácter trienal, se celebró en 2010 en la República de Corea y reunió a varios centenares de científicos e ingenieros que producen o utilizan datos nucleares sobre energía de fisión y fusión, tecnología de

aceleradores, dosimetría y blindaje, astrofísica y otras esferas pertinentes. La conferencia, que trató sobre las novedades en los modelos teóricos, así como sobre las actividades de medición, evaluación, procesamiento, validación y diseminación de datos, hizo importantes contribuciones para mejorar los datos nucleares.

95. El Centro Virtual de Datos Atómicos y Moleculares (VAMDC) es un proyecto de tres años y medio financiado por el Séptimo Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico, de la Unión Europea, cuya finalidad es proporcionar una interfaz unificada para alrededor de dos docenas de bases de datos atómicos y moleculares. El proyecto celebró su primera reunión anual en 2010. El Esquema XML para átomos, moléculas y sólidos (XSAMS), cuyo desarrollo está coordinado por el Organismo, es un factor clave para asegurar la interoperatividad.

96. El año 2010 fue muy positivo para el láser de electrones libres de rayos X (XFEL) con fuente de luz coherente de acelerador lineal (LCLS), que comenzó a funcionar en abril de 2009 y está produciendo datos atómicos experimentales en regímenes que anteriormente eran inaccesibles. En su nivel más alto, el brillo de la LCLS supera en 2 o 3 órdenes de magnitud el de los láser de electrones libres anteriores, lo que permite estudiar la materia en condiciones como las que se producen en las explosiones de supernovas, los interiores estelares y el plasma producido por láser.



FIG. C-3. Láser de electrones libres de rayos X con LCLS.

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

D.1. Aceleradores

97. Los avances en la tecnología de aceleradores han ofrecido la oportunidad de desarrollar métodos analíticos adecuados para estudiar la tecnología de fabricación de nuevos materiales resistentes a la radiación.

98. Un sistema accionado por acelerador cuya finalidad es suministrar protones y neutrones para distintas aplicaciones de I+D recibió apoyo financiero en Bélgica en 2010 en el marco del proyecto MYRRHA. Se utilizará un acelerador de protones acoplado a un núcleo subcrítico rápido, entre otras

cosas, para prestar apoyo a nuevas actividades de I+D en la esfera de transmutación de desechos. A partir de 2022, el MYRRHA contribuirá al desarrollo de soluciones innovadoras en el campo de las tecnologías nucleares, las aplicaciones médicas, la industria nuclear y las fuentes de energía renovable.

99. Las técnicas basadas en rayos X se han convertido en instrumentos clave de espectroscopia e imagenología en muchos campos, que van de la medicina a la ingeniería. En los dos últimos años, los avances habidos en el enfoque de los haces de rayos X, la manipulación de especímenes la automatización de las mediciones en fuentes sincrotrónicas de rayos X han hecho que se amplíen sus aplicaciones en apoyo de las investigaciones relacionadas con la infección por el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), las causas del cáncer, la función del sistema nervioso y la señalización celular, la fotosíntesis, etc. Por ejemplo, los investigadores de la instalación SPring-8, en el Japón, han desarrollado una técnica de recolección de luz que permite la generación de haces de rayos X de alto brillo de 7 nm de diámetro. Esto podría dar lugar al desarrollo de un microscopio de rayos X con resolución a escala nanométrica que podría utilizarse para la observación directa de la estructura de moléculas y átomos. La tecnología de las fuentes de rayos X de la próxima generación, como el acelerador lineal con recuperación de energía (ERL, Universidad de Cornell (EE.UU.)), y la finalización de varias instalaciones de láser de electrones libres de rayos X (XFEL) en todo el mundo, abren nuevas oportunidades para estudiar el comportamiento de los átomos y las moléculas en condiciones extremas.

100. La microtomografía por radiación sincrotrónica de rayos X duros de alta resolución, que se aplicó con éxito en 2010 en la Instalación Europea de Radiación Sincrotrónica (ESRF), es actualmente el único método capaz de proporcionar información tridimensional en apoyo del estudio de nuevos materiales para reactores nucleares de fusión.

101. En la esfera de los estudios sobre monitorización ambiental, científicos de la Universidad de Leicester y el Servicio Geológico Británico han utilizado el sincrotrón de Diamond Light Source para estudiar la especiación química, bioaccesibilidad y movilidad de las partículas de muestras de polvo y suelo tomadas en los alrededores de plantas de procesamiento de uranio.

102. En 2010, científicos del laboratorio del Centro de Investigación y de Restauración de los Museos de Francia y la ESRF utilizaron por primera vez una técnica cuantitativa química de fluorescencia X para la caracterización no invasiva in situ de siete pinturas (La Gioconda, entre ellas) directamente en las salas del Museo del Louvre. Los resultados, publicados en julio de 2010, han ayudado a determinar y estudiar las técnicas que aplicaban los antiguos maestros, como la famosa técnica del esfumado empleada por Leonardo Da Vinci.

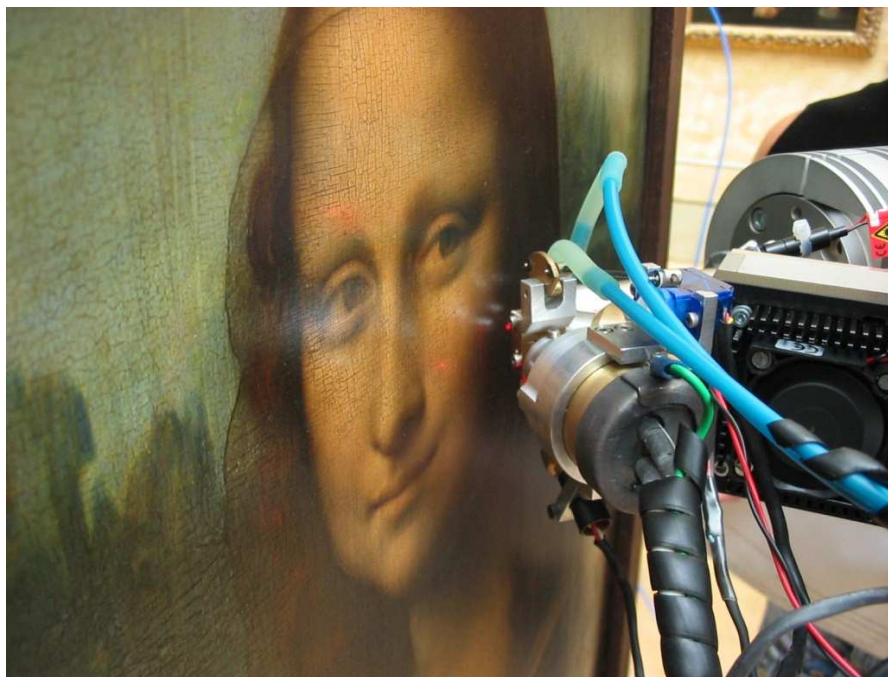


FIG. D-1. Técnica de fluorescencia X aplicada a la caracterización no invasiva in situ de La Gioconda, en el Museo del Louvre (Francia)(cortesía del laboratorio del Centro de Investigación y de Restauración de los Museos de Francia).

D.2. Reactores de investigación

103. En la actualidad, más de 20 Estados Miembros están estudiando la posibilidad de construir nuevos reactores de investigación, en muchos casos, como primera medida de un programa nacional para implantar la energía nucleoelectrónica a la vez que otras aplicaciones pacíficas de las tecnologías nucleares. En Jordania, el desarrollo del primer reactor de investigación multipropósito de 5 MW está en avanzada fase de diseño y la construcción está a punto de comenzar. La Argentina y el Brasil, en el marco de su programa de cooperación bilateral, han concertado un acuerdo relativo al desarrollo y la construcción, en cada uno de esos países, de reactores de investigación de diseño avanzado y con una capacidad importante de producción de radioisótopos.

104. Según la base de datos de reactores de investigación¹⁰ del Organismo, al final de 2010 había en todo el mundo 249 reactores de investigación; 237 de ellos estaban en funcionamiento y 12 habían sido sometidos temporalmente a régimen de parada. Hay otros cinco en construcción o previstos. En 2010 sólo se pusieron en servicio dos reactores de investigación: el reactor de investigación avanzado de China (CARR) y el reactor experimental rápido de China (CEFR), ambos en el Instituto de Energía Atómica de China, cerca de Beijing. El CARR alcanzó la criticidad por primera vez el 13 de mayo de 2010 y el CEFR, el 21 de julio de 2010.

¹⁰ <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.



FIG. D-2. Reactor de investigación avanzado de China.

105. Puesto que los reactores de investigación más antiguos son retirados y sustituidos por un número menor de reactores multipropósito, se prevé que el número de reactores de investigación e instalaciones críticas operacionales disminuya hasta situarse entre 100 y 150 en 2020. Será precisa una mayor cooperación internacional para garantizar un acceso amplio a esas instalaciones y su uso eficiente. Las redes cooperativas también están resultando útiles para mejorar las instalaciones existentes y crear otras nuevas. Así, además de las cinco coaliciones de reactores de investigación existentes en las regiones de Europa oriental, el Caribe, Asia central, el Báltico y el Mediterráneo, se están gestando nuevas coaliciones y redes para aumentar las operaciones de los reactores de investigación y su utilización, y para hacer que los reactores sean realmente viables.

106. La Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM) de los Estados Unidos siguió desplegando sus esfuerzos para convertir, de UME a UPE, el combustible de reactores de investigación y blancos utilizados en instalaciones de producción de isótopos. En 2009, el alcance de la IRAM se amplió de 129 reactores de investigación a 200 y, a finales de 2010, 72 reactores de investigación de todo el mundo que funcionaban con combustible de UME habían sido convertidos a combustible de UPE o sometidos a régimen de parada con anterioridad a la conversión durante los más de 30 años de cooperación internacional en estas actividades de conversión. De éstos, 33 reactores de investigación han sido convertidos desde que se intensificó el programa en 2004.

107. Se siguió prestando apoyo del OIEA a los Estados Miembros y a los programas internacionales para la devolución del combustible de reactores de investigación a su país de origen. Como parte del programa de devolución del combustible de reactores de investigación de Rusia (RRRFR), se repatriaron cinco envíos que contenían aproximadamente 109 kg de combustible de UME sin irradiar de Belarús, la República Checa y Ucrania en virtud de contratos tramitados por el Organismo. El Organismo también ayudó a repatriar unos 376 kg de combustible de UME gastado procedente de Belarús, Polonia, Serbia (13,2 kg de Vinča) y Ucrania.

108. Al final de 2010 se transportaron desde Vinča (Serbia) a la Federación de Rusia 2 500 kg de combustible de reactores de investigación gastado y degradado, la mayor parte del cual era combustible de UME. La ejecución con éxito de este proyecto de cooperación técnica (CT), el de mayor valor de la historia del Organismo, marcó el resultado acumulativo del trabajo en colaboración

del Organismo, así como de un número importante de organizaciones de apoyo técnico y donantes financieros externos. Se seguirá trabajando en apoyo de los esfuerzos encaminados a la clausura completa de la instalación.

109. Sudáfrica sigue en cabeza en lo que respecta a la conversión (de UME a UPE) de los blancos y el equipo de procesamiento químico utilizados en la producción de molibdeno 99 para productores en gran escala, convirtiéndose en 2010 en el primer productor importante que entregó cantidades a escala industrial de molibdeno 99 basado en UPE para su exportación. El Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos de Dimitrovgrad (Federación de Rusia) también comenzó a producir molibdeno 99 en gran escala en 2010, y entregó el primer lote (que cumplía todos los requisitos) a los socios del extranjero en diciembre de 2010. Se preveía que los niveles de producción alcanzaran 800 curios por semana a finales de mayo de 2011 y 2500 curios por semana una vez finalizada la segunda fase del proyecto en 2012. Anteriormente, en 2002, la Argentina había convertido con éxito la tecnología de producción de molibdeno 99 en pequeña escala y posteriormente desarrolló y exportó esta tecnología a Australia y Egipto. También durante 2010, Australia notificó constantes avances en las actividades encaminadas a aumentar la producción de molibdeno 99 basado en la fisión de UPE.

110. Como resultado de problemas técnicos, hubo paradas de reactores de investigación reiteradas, prolongadas y a menudo coincidentes, que contribuyeron a prolongar aún más la crisis de suministro de molibdeno 99 que comenzó a finales de 2007¹¹. Las medidas coordinadas de ámbito mundial encaminadas a aumentar la eficiencia por el lado de la demanda, reducir los problemas de transporte y aprobar reactores con capacidad de irradiación de blancos ayudaron significativamente a mitigar los efectos de la crisis a lo largo de 2010, hasta que volvieron a ponerse en servicio reactores que estaban sometidos a régimen de parada programada y no programada a largo plazo. La Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina duplicó su producción de molibdeno 99, garantizando así que la Argentina fuera autosuficiente y ayudando a cubrir las necesidades de otros países de la región. En Bélgica, el Centro de Investigaciones Nucleares de Mol aumentó la capacidad de irradiación de blancos de UME de su reactor BR-2 y llevó a cabo un ciclo operacional adicional mientras que el Instituto Nacional de Radioelementos de Fleurus aumentó su capacidad de tratamiento de blancos. No obstante, las conclusiones de un informe¹² de la AEN de la OCDE, publicado en septiembre de 2010 con aportaciones del OIEA, indicaban que las amenazas para la seguridad del suministro de molibdeno 99 persistirán mientras no se aborden todas las cuestiones relacionadas con los aspectos técnicos, los mercados y las políticas.

111. Para la conversión de reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se necesitan los combustibles de uranio-molibdeno avanzados y de muy alta densidad que se están desarrollando actualmente. A este respecto, se han alcanzado progresos considerables en los últimos años. El Grupo Internacional de Trabajo sobre desarrollo de combustibles tiene en curso investigaciones en colaboración sobre el comportamiento y el rendimiento del combustible de uranio-molibdeno. En los Estados Unidos, los esfuerzos se centran en el desarrollo de combustible de uranio-molibdeno monolítico para su uso en reactores de investigación de alto flujo. Se están produciendo importantes adelantos a medida que avanza la tecnología de fabricación. En 2009 se consolidó una nueva iniciativa europea para lograr la cualificación del combustible de uranio-molibdeno disperso de muy alta densidad, a base de UPE, para los reactores europeos de alto flujo convertidos para utilizar combustible de UPE. Aunque en 2010 se lograron avances sustanciales en el desarrollo y la cualificación del combustible de uranio-molibdeno, se necesitan nuevos progresos y ensayos

¹¹ Véase también la sección I.1 sobre radioisótopos y radiofármacos.

¹² <http://www.nea.fr/med-radio/reports/MO-99.pdf>

importantes para lograr la disponibilidad comercial oportuna de combustibles de UPE cualificados de muy alta densidad.

E. Tecnologías nucleares en la agricultura y la alimentación¹³

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

112. El desarrollo, el ensayo, la validación y la aplicación de técnicas nucleares y del ámbito nuclear rápidas y precisas para el diagnóstico temprano de enfermedades han desempeñado un papel importante en la mejora de la seguridad alimentaria. Cabe citar como ejemplo la erradicación a escala mundial de la peste bovina, que se espera será oficialmente declarada en 2011 por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE). Ahora bien, el mundo continúa enfrentando los desafíos que plantean otras enfermedades transfronterizas de los animales, algunas de las cuales pueden afectar a los seres humanos. Es fundamental que estas enfermedades se diagnostiquen de manera rápida y precisa y, preferiblemente, sobre el terreno, y que posteriormente se apliquen las medidas de control adecuadas. Actualmente se desarrollan nuevas tecnologías de irradiación para la producción de vacunas seguras y eficaces, el marcado de isótopos radiactivos y estables, plataformas de rastreo para la identificación de patógenos delicados y específicos, así como el empleo de isótopos estables para la vigilancia de los animales migratorios.

113. Cuando los componentes patógenos de la vacuna están atenuados o no son infecciosos, las vacunas irradiadas mantienen su capacidad para estimular una firme respuesta inmunitaria. Algunos Estados Miembros están recibiendo actualmente asistencia en el desarrollo de ese tipo de vacunas respecto de varias de las enfermedades transfronterizas de los animales contra las que actualmente no hay ninguna vacuna eficaz. Por ejemplo, se están desarrollando vacunas contra la brucelosis (una extendida enfermedad zoonótica) en la Argentina y Georgia, contra las infecciones producidas por gusanos parasitarios en Etiopía, el Sudán y Sri Lanka, contra la teileriosis en China y Turquía, contra la tripanosomiasis en la India y Kenya, contra la anaplasmosis en Tailandia y contra los parásitos transmitidos por la ingestión de pescado en la República Islámica del Irán.

114. Con miras a descubrir las causas de los efectos secundarios nocivos o fallos de la vacuna contra la viruela ovina y caprina¹⁴, se ha iniciado la secuenciación genómica completa de varias cepas de campo y de las vacunas para determinar la presencia o ausencia de los genes que podrían ser los causantes de esos efectos o fallos. Los estudios relativos a los genomas del ganado ovino y caprino en los que se emplean tecnologías de micromatrices de ADN y se aplica el marcado con fósforo 32 y azufre 35 permitirán entender mejor la resistencia a las enfermedades y el papel que desempeñan los diferentes genes que intervienen en la respuesta inmunitaria a las enfermedades del ganado. Esos estudios constituyen un paso importante hacia la comprensión de la variación fenotípica y genotípica de los animales de granja.

115. En 2009 y 2010 se realizaron importantes progresos en la elaboración de un mapa híbrido de radiación respecto de las cabras, mediante el empleo de la irradiación con cobalto 60. Esta labor se ha realizado en colaboración con varias instituciones de todo el mundo (Instituto Nacional de Investigación Agronómica (INRA), Francia/Universidad de Texas A&M, Estados Unidos de América/Universidad Agrícola de Huazhong, China central/DNALANDMARK Canada). El mapa

¹³ Additional information is available in the related documents of the *Nuclear Technology Review 2011* on GovAtom.

¹⁴ Los virus de la viruela ovina y caprina causan, además, la dermatosis nodular contagiosa.

permitirá determinar los marcadores genéticos con rasgos económicamente productivos que pueden utilizarse en la reproducción.

E.2. Lucha contra plagas de insectos

116. La inversión en tierras, semillas, agua, fertilizantes, mano de obra y otros insumos, cuando los productos agrícolas resultantes corren el riesgo de verse destruidos parcial o totalmente por plagas de insectos, no es la manera más eficiente de utilizar los limitados recursos disponibles para alimentar a una población en aumento. Por lo tanto, un componente estratégico importante de los esfuerzos por aumentar la productividad y garantizar la seguridad alimentaria a escala mundial será una inversión en la gestión de plagas. Sin embargo, la actual dependencia de los insecticidas menoscaba el equilibrio natural, deja residuos en los alimentos y generalmente propicia la resistencia a los insecticidas por las plagas de insectos. En consecuencia, existe una creciente demanda de enfoques más eficientes y ambientalmente inocuos y sostenibles de lucha contra las plagas.

117. En la esfera de la lucha contra las plagas de insectos, la demanda de técnicas nucleares se ha limitado en gran medida en el pasado a la esterilización de insectos para la aplicación integrada en toda una zona de la técnica de los insectos estériles (TIE) y los métodos de control genético conexos. No obstante, la aplicación de la radiación a los efectos de aumentar la eficacia en relación con los costos y la seguridad de la introducción y suelta de enemigos naturales (parasitoides y depredadores), así como de facilitar el comercio de éstos, ofrece gran potencial para el control biológico de las plagas de insectos.



FIG. E-1. Hembras parasitoides inyectan sus huevos en la fruta con sus largos ovipositores.

118. En el marco de un proyecto coordinado de investigación (PCI) FAO/OIEA, que culminó en 2010, 18 grupos de investigación de 15 países abordaron diferentes limitaciones relacionadas con diversos sistemas de producción y manipulación de agentes de control biológico, comprendida la posibilidad de que estos agentes estén acompañados de plagas durante su transporte. De los resultados se desprende que existen numerosos medios innovadores que utilizan radiación ionizante, como los rayos gamma o X, que pueden aportar un valor añadido a la aplicación del control biológico al incrementar, por ejemplo, la duración de los enemigos naturales o huéspedes y reducir el costo y la logística que

suponen el mantenimiento y la separación de parasitoides y adultos de plagas no parasitados antes de su envío a los clientes.

119. Además, la radiación puede aplicarse a huéspedes o presas parcial o totalmente esterilizados para su uso sobre el terreno con el fin de incrementar la supervivencia inicial y el desarrollo temprano de agentes de control biológico naturales o liberados antes de que se formen las poblaciones de plagas estacionales, así como de utilizar huéspedes inactivados reproductivamente como centinelas sobre el terreno. El empleo de la radiación también puede ayudar a reducir los riesgos relacionados con la introducción de agentes de control biológico exóticos, que pueden convertirse en plagas de organismos no utilizados como blancos si no se seleccionan cuidadosamente en condiciones seminaturales o naturales. Los agentes de control biológico esterilizados pueden someterse a prueba para determinar su especificidad respecto del huésped en condiciones de campo sin que exista ningún riesgo de que esos agentes se establezcan.

120. La radiación también es un instrumento muy útil para estudiar las interacciones fisiológicas huésped-parasitoide, tales como las respuestas inmunitarias del huésped, suprimiendo las reacciones defensivas de los huéspedes naturales o artificiales. Por último, la viabilidad de integrar las sueltas de enemigos naturales e insectos estériles en los programas de lucha integrada zonal contra las plagas ha quedado demostrada.



FIG. E-2. Hembras parasitoides ovipositan en una dieta artificial que contiene larvas huésped como parte del proceso de cría en masa.

121. Algunas de estas aplicaciones nucleares ya se están utilizando en gran escala, por ejemplo en el Pakistán, donde se están empleando agentes de control biológico para luchar contra las principales plagas que afectan a los cultivos de algodón y caña de azúcar.¹⁵

¹⁵ All these applications have been published in a 362-page special edition of the peer reviewed journal *Biocontrol Science and Technology*. Please see: http://www-naweb.iaea.org/nafa/ipc/crp/Biocontrol_final.pdf.

E.3. Mejora de los cultivos

122. El Banco Mundial estimó en 2009 que los países en desarrollo sufragarán entre el 70 y el 80% del costo de los daños causados por el cambio climático y que la agricultura será el sector más afectado. Los principales efectos del cambio climático en la agricultura se deberán probablemente a una mayor variabilidad de las temperaturas, un cambio del régimen de precipitaciones, comprendida una mayor intensidad y frecuencia de los sucesos extremos (inundaciones y sequías), así como una elevación del nivel del mar que afectará a las zonas costeras en las que hay grandes extensiones de tierras cultivadas (estas tierras pueden verse afectadas considerablemente por la intrusión de agua salada).

123. Una respuesta posible es la mejora genética de los cultivos. Las mutaciones o modificaciones hereditarias naturales del material genético de las plantas siempre han sido aprovechadas eficazmente para determinar y seleccionar los rasgos que son importantes para la mejora de los cultivos. Las técnicas nucleares utilizadas para la inducción de mutaciones pueden incrementar el ritmo de cambios genéticos y, por ende, la adaptabilidad de los cultivos al cambio y la variabilidad climáticos mediante:

- el aprovechamiento de la diversidad genética de las poblaciones mutadas existentes para evaluar la tolerancia a las tensiones relacionadas con el cambio climático en función del rendimiento y los componentes de éste;
- la aplicación de los instrumentos existentes para caracterizar las respuestas fisiológicas y bioquímicas a esas tensiones aplicando técnicas de isótopos estables;
- el análisis y aprovechamiento de las mutaciones utilizando diversos instrumentos moleculares, así como mediante el empleo de los instrumentos bioinformáticos conexos para evaluar amplios conjuntos de datos y visualizar las vías metabólicas afectadas por las tensiones y/o los genotipos.



FIG. E-3. Aprovechamiento de las mutaciones radioinducidas para mejorar los cultivos y comprender mejor la función de los genes. Los diferentes colores corresponden a las distintas mutaciones. Se trata de mutantes avanzados que se encuentran almacenados y que se estudiarán más adelante a la luz de una tensión determinada a fin de seleccionar los mutantes positivos (cortesía del Sr. D. Shu, China).

124. Varios Estados Miembros tienen poblaciones mutadas de importantes cultivos alimentarios listas para su fenotipado y caracterización molecular. A fin de aumentar la eficiencia de las técnicas nucleares utilizadas para la inducción de mutaciones, los esfuerzos futuros entrañarán la adaptación de las tecnologías más avanzadas y la caracterización de las poblaciones mutadas existentes, ampliando así la adaptación de los cultivos al cambio y la variabilidad climáticos. Entre estas nuevas tecnologías encaminadas al aumento de la eficiencia figuran: la pirosecuenciación de alto rendimiento o secuenciación profunda directa de los genomas respecto de los cuales ya existe la secuencia de un

pariente cercano, y el análisis de curvas de fusión de alta resolución (HRM), en el que se utilizan la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y tintes fluorescentes intercalados para detectar mutaciones poco comunes de los genes con grandes intrones. Los malos emparejamientos de una sola base pueden detectarse mediante el empleo de sistemas de vigilancia por fluorescencia, lo que podría considerarse un complemento del método utilizado para determinar polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) en las plantas. El empleo de estos métodos se ve además propiciado por la marcada disminución de los costos de la secuenciación de ADN, lo que permite el muestreo muy repetido de las regiones genómicas para evitar errores y acelerar el descubrimiento de mutaciones en las especies poliploides, como el trigo, que tienen poblaciones mutagenizadas con ADN combinado. Es posible que como resultado del cambio climático se produzcan pérdidas significativas de la diversidad genética en las especies cultivadas. Ya existen modelos sofisticados para prever y simular los efectos del cambio climático, que podrían adaptarse a los cultivos seleccionados de las regiones seleccionadas, lo que se conoce como bioinformática. El acceso a bases de datos sobre genomas y el germoplasma de los cultivos de los bancos de genes de todo el mundo mediante instrumentos multilaterales representa un instrumento valioso para hacer frente a esos desafíos clave que se plantean en la agricultura y alimentación.

125. Los conjuntos de tecnologías nucleares basados en las mutaciones inducidas y las biotecnologías que mejoran la eficiencia pueden ayudar a determinar y aprovechar rasgos fundamentales para la adaptación al cambio y la variabilidad climáticos. La aplicación de estas técnicas puede hacerse extensiva a los bosques, que también desempeñan una función crucial en la estabilización del clima.

E.4. Gestión de suelos y aguas

E.4.1. Nuevos horizontes en la evaluación del secuestro de carbono del suelo de tierras de cultivo

126. El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente importante de la materia orgánica del suelo que proporciona nutrientes esenciales para el crecimiento de los cultivos, aumenta la resistencia frente a la erosión del suelo y mejora la conservación del agua. El aumento del almacenamiento de COS, también conocido como secuestro de carbono, contribuye a compensar las emisiones de CO₂ procedentes de actividades agrícolas como los cultivos y la producción pecuaria, a la vez que mejora la calidad de los suelos y la retención del agua, y reduce las pérdidas de nutrientes. El secuestro de carbono del suelo es el balance entre los aportes de carbono al suelo mediante la biomasa de las plantas y la emisión de carbono del suelo en forma de CO₂ mediante la actividad microbiana y la descomposición de residuos orgánicos. La cuantificación del CO₂ emitido del suelo y la identificación de su fuente pueden ayudar a determinar los factores de gestión que afectan a los procesos del suelo que influyen en la liberación de CO₂.

127. Los isótopos estables del carbono (carbono 13 y carbono 12) en el CO₂ emitido del suelo se utilizan para evaluar la dinámica de la materia orgánica, las posibilidades de secuestro de carbono y la estabilización del carbono en los suelos. Sin embargo, estudios realizados en 2010 (Phillips y otros, 2010)¹⁶ han mostrado que las mediciones puntuales del carbono 13 se ven afectadas por las condiciones del suelo y atmosféricas en el lugar y la hora de las mediciones. Las incertidumbres en los valores del carbono 13 asociadas al lugar y a la hora pueden resolverse mediante la medición continua y en tiempo real del carbono 13. Se han desarrollado analizadores de gas, que utilizan láseres en el

¹⁶ Phillips, C.L., Nickerson, N., Risk, D., Kayler, Z.E., Andersen, C., Mix, A., Bond, B., 2010, Soil moisture effects on the carbon isotope composition of soil respiration. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 24, 1271-1280.

infrarrojo cercano con altas sensibilidades analíticas (Nickerson y Risk, 2009)¹⁷ para medir el carbono 13 y el carbono 12 del CO₂ atmosférico. Estos analizadores portátiles no requieren calibración frecuente y pueden utilizarse sobre el terreno. Gracias a su exactitud y solidez, permiten una cuantificación más precisa de los procesos del carbono del suelo de terrenos agrícolas en distintas escalas espaciales y temporales y, por consiguiente, abren nuevos horizontes en la evaluación del secuestro de carbono del suelo de tierras de cultivo.



FIG. E-4. Mejora de la calidad del suelo y aumento del secuestro de carbono en el suelo: cultivo de la soja mediante agricultura de conservación en el Brasil (por cortesía de Bruno Alves, Embrapa, Brasil).

E.4.2. Uso de isótopos de oxígeno en fosfatos para rastrear las fuentes y el ciclo del fósforo en los suelos

128. El fósforo es un elemento esencial de la nutrición vegetal, humana y animal. En vista de que muchas regiones del mundo tienen suelos con bajos niveles de fósforo y que la deficiencia de fósforo limita el crecimiento de las plantas y reduce la producción agrícola y la calidad de los alimentos, es crucial entender mejor la dinámica del fósforo. El fósforo tiene un isótopo estable (el fósforo 31) y varios radioisótopos (del fósforo 26 al fósforo 30 y del fósforo 32 al fósforo 38), pero los dos únicos isótopos adecuados para los estudios agronómicos (el fósforo 32 y el fósforo 33) tienen períodos de semidesintegración muy cortos, de 14,3 y 25,3 días, respectivamente, lo que dificulta la realización de investigaciones a largo plazo. Como el fósforo solo tiene un isótopo estable, los investigadores han comenzado a examinar las posibilidades de utilizar isótopos de oxígeno en compuestos fosfóricos inorgánicos y orgánicos para estudiar y comprender la dinámica del fósforo en los sistemas de cultivo y producción pecuaria, con el fin de mejorar la fertilidad del suelo y la productividad alimentaria. Esa información es muy importante para la futura gestión del fósforo con miras a la intensificación sostenible de la producción agrícola y a la reducción al mínimo de los efectos adversos del exceso de fósforo en el medio ambiente.

129. A fin de analizar el oxígeno 18 procedente de distintas fracciones del fósforo en el suelo, el fosfato se debe extraer del suelo, refinarlo y convertirlo en ortofosfato de plata. Un grupo de

¹⁷ Nickerson, N. y Risk, D., 2009, Physical controls on the isotopic composition of soil respired and CO₂. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 114, G01016, doi:10.1029/2008JG000844.

científicos¹⁸ ha elaborado recientemente protocolos para estimar el oxígeno 18 de suelos con distintos niveles de fósforo y vegetación de distintos países. Los suelos sometidos a distintas prácticas de gestión agrícola (por ejemplo, aplicaciones de fertilizantes o abonos) mostraron diversas firmas de oxígeno 18 en el fósforo del suelo que indicaban las posibilidades del oxígeno 18 como trazador isotópico para estudiar el ciclo del fósforo, rastrear sus fuentes y, en última instancia, posibilitar una mejor comprensión de la dinámica del fósforo del suelo en los ecosistemas agrícolas

F. Salud humana

F.1. Nutrición

130. Las técnicas de isótopos estables, basadas en la dilución de deuterio, son instrumentos importantes para evaluar la composición corporal y la ingesta de leche materna por lactantes. En los últimos años, con el apoyo del Organismo, estas técnicas han pasado de ser meramente instrumentos de investigación a disposición de solo algunos centros de excelencia, principalmente de países industrializados, a ser instrumentos de evaluación de las intervenciones de salud pública en el ámbito de la nutrición en países en desarrollo. El cambio se ha facilitado centrandó el interés en la introducción de técnicas espectroscópicas de fácil uso para analizar el enriquecimiento de deuterio en muestras que contienen agua. La espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica fácil de aprender y relativamente económica, y los instrumentos requieren poco mantenimiento. Se trata, pues, de una técnica adecuada para su uso en países en desarrollo con escasos recursos. Con el apoyo del Organismo, se ha creado capacidad considerable en los dos últimos años en África y América Latina, y las técnicas de isótopos estables que utilizan la FTIR para el análisis de deuterio en la saliva se están empleando actualmente en la evaluación de intervenciones nutricionales para aportar a los profesionales de la salud y los encargados de la elaboración de políticas una base sólida de pruebas para sus intervenciones como parte de sus actividades destinadas a garantizar el crecimiento sano de lactantes y niños.

F.2. Avances en las aplicaciones radiooncológicas¹⁹

131. La radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) se utiliza para describir el diseño y la aplicación de tratamientos de radioterapia partiendo de datos de imágenes tridimensionales con campos de tratamiento desarrollados por separado para tratar solamente el tejido afectado. Mediante la radioterapia conformada tridimensional, con o sin modulación de la intensidad, actualmente es posible ajustar la dosis de radiación prescrita a la forma del tumor y preservar así mejor el tejido sano circundante.

132. Los radiooncólogos se ven enfrentados a problemas específicos en partes del cuerpo en que los órganos y tumores se mueven durante el tratamiento. Como la administración de dosis de radiación es cada vez más precisa, los movimientos de los órganos y tumores constituyen un factor importante que afecta a la precisión con la que se administra la dosis. Esto es particularmente grave en el caso de los tumores localizados en el tórax, que se mueven con la respiración del paciente. Lo mismo ocurre con

¹⁸ Tamburini, F., Bernasconi, S.M., Angert, A., Weiner, T. and Frossard, E., 2010, A method for the analysis of the $\delta^{18}O$ of inorganic phosphate extracted from soils with HCl. *European Journal of Soil Science*, 61, 6, 1025-1032.

¹⁹ Se puede consultar información adicional en los documentos conexos del Examen de la tecnología nuclear - 2011 en GovAtom.

los tumores localizados en la laringe, el abdomen (hígado), la próstata y la vejiga, así como en la pelvis en general, que también se mueven durante y entre las aplicaciones del tratamiento.

133. Mediante el desarrollo de la radioterapia adaptada a la respiración, actualmente el movimiento del tumor se puede tener en cuenta con gran precisión. En la radioterapia computarizada adaptada a la respiración, se coloca sobre el abdomen del paciente una pequeña caja de plástico con marcadores reflectantes. Estos marcadores se mueven con la respiración del paciente, y una cámara digital conectada a una unidad central de proceso monitoriza estos movimientos en tiempo real. Un programa informático analiza los movimientos y activa el haz de tratamiento en el momento mismo del ciclo respiratorio. Con esta técnica también es posible elegir la fase respiratoria. En función del lugar en que se encuentre el tumor, éste se irradiará durante la inspiración o la espiración. Por consiguiente, el haz de radiación siempre abarcará el tumor y, al mismo tiempo, se evitará la exposición de órganos críticos.

F.3. Novedades en la tecnología de la medicina nuclear aplicada a estudios cardíacos

134. En los últimos tres años ha habido adelantos importantes en la medicina nuclear, particularmente en la esfera de la cardiología. Se ha reducido el tiempo de los exámenes y la dosis de radiación administrada a los pacientes, al mismo tiempo que se ha mejorado la calidad de las imágenes en general, lo que permite realizar diagnósticos más seguros y eficientes de enfermedades cardiovasculares, y mejorar el flujo de trabajo.

135. En los últimos cincuenta años no ha cambiado el concepto tecnológico de los sistemas convencionales de cámara gamma Anger utilizado en la imaginología SPECT. Este diseño tradicional utiliza un cristal de yoduro de sodio dopado con talio que centellea en respuesta a fotones gamma y produce un destello débil, y que está acoplado a un conjunto de tubos fotomultiplicadores que detectan el destello fluorescente. Sin embargo, la nueva tecnología combina nuevos materiales detectores como el telururo de cadmio-zinc (CZT), la utilización de colimación estenopeica localizada, la reconstrucción tridimensional y los modelos de adquisición de datos. En una cámara Anger tradicional, un rayo gamma alcanza un cristal centellador de yoduro de sodio y produce un destello; a continuación un tubo fotomultiplicador transforma el fotón de luz en una carga eléctrica, completando así un proceso de dos etapas. Con un detector de estado sólido, un rayo gamma alcanza un tipo distinto de cristal, como el CZT, que es un semiconductor que convierte el fotón directamente en una señal electrónica digital, completando así un proceso de una etapa.

136. El nuevo sistema de alta velocidad se caracteriza por un aumento de la sensibilidad del recuento, lo que permite reducir el tiempo de los exámenes y la dosis de radiación administrada, sin comprometer la calidad de los exámenes y las capacidades de diagnóstico. Con los nuevos sistemas la dosis efectiva de radiación es del orden de 1/10 en comparación con la dosis administrada mediante la tecnología convencional de medicina nuclear.

137. El tiempo de los exámenes se reduce a una adquisición en fase de estrés de cuatro minutos/de reposo de dos minutos, a la vez que la cámara de alta velocidad proporciona imágenes de mayor resolución y de tamaño similar a la anomalía de perfusión como en las imágenes convencionales SPECT de perfusión miocárdica (MPI) (figura F.1.).²⁰

²⁰ Tali Sharir, MD, Piotr J. Slomka and Daniel S. Berman, MD, Solid-State SPECT technology: fast and furious. J Nucl Cardiol 2010; 17:890-6

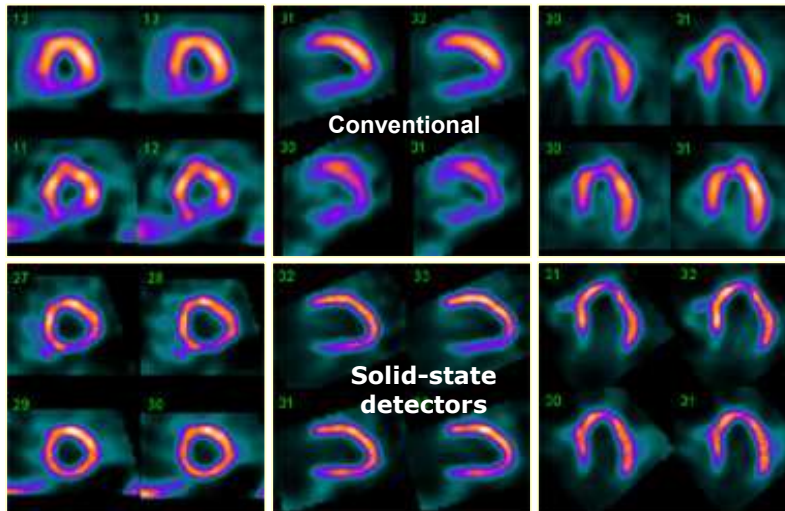


FIG. F-1. Imágenes de perfusión miocárdica obtenidas mediante la tecnología convencional SPECT (línea superior) y una nueva cámara cardíaca especial dotada de detectores de estado sólido de CZT (línea inferior). Los exámenes se realizaron consecutivamente en el mismo paciente. Las diferencias en la resolución de la imagen pueden percibirse fácilmente (cortesía de los Profesores B. Hutton y S. Ben-Haim, Hospitales UCL, Londres, Reino Unido).

138. Los nuevos sistemas posibilitan combinar las imágenes de medicina nuclear molecular y los detalles anatómicos proporcionados por las máquinas de tomografía computarizada. Los dos tipos distintos de equipo, fusionados en “sistemas híbridos”, permiten una evaluación combinada de la función y la estructura en un único procedimiento de diagnóstico para sacar el máximo provecho de cada modalidad, lo que supone una gran mejora de los servicios de atención al paciente que se prestan actualmente en cardiología nuclear, y sin duda se utilizará de manera más amplia en el futuro en otros campos clínicos, como la oncología.

G. Medio ambiente

G.1. Tecnología nuclear para la alerta temprana sobre floraciones de algas marinas nocivas

139. Las floraciones de algas marinas nocivas son causadas por el crecimiento y la acumulación de algas microscópicas, como consecuencia principalmente de las actividades humanas. El marisco filtra el fitoplancton tóxico del agua de mar para alimentarse, acumulando así las toxinas de las algas hasta niveles que pueden ser letales para los humanos u otros consumidores. Además de los casos de fallecimiento y de las intoxicaciones y los efectos tóxicos notificados por los países, en 2002 el Programa de Acción Mundial para la Protección del Medio Marino frente a las Actividades Realizadas en Tierra del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente informó de las considerables pérdidas económicas debidas a las floraciones de algas nocivas, que ascendieron a cientos de millones de dólares.

140. En los Estados Unidos y la UE, todos los contenedores y todas las remesas de marisco deben llevar una etiqueta y un certificado sanitario que indiquen la zona de origen, el recolector y la fecha de recolección. Esta información debe acompañar al marisco durante su transporte, a lo largo de todo el procesamiento y la distribución hasta su venta minorista, lo que permite el rastreo del producto si se da un problema sanitario. En 2010, la Unión Europea (UE) y los Estados Unidos de América comenzaron a estudiar la posibilidad de exigir un certificado que establezca que el marisco no contiene toxinas producidas por las FAN, propuesta que aún se está estudiando. Si se aprueba la legislación, en el futuro se prohibirán todas las importaciones de marisco de precios elevados que no tengan ese certificado. En 2009, el grupo CONTAM sobre contaminantes en la cadena alimentaria de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (AESA) señaló que “el actual método del bioensayo en ratones no se considera un instrumento apropiado para fines de control”. El método del ensayo de unión receptor-ligando (RBA), tecnología nuclear basada en el uso de toxinas radiomarcadas, se distinguió en la reunión anual de la AOAC International (Asociación científica dedicada a la excelencia analítica) de 2010 como uno de los dos métodos alternativos ensayados con éxito en los estudios de prevalidación y será importante para las autoridades reguladoras nacionales a efectos de la exportación de marisco.

141. El método del RBA es también un potente instrumento de investigación que permite mejorar la evaluación de la dinámica de las toxinas de las algas como función de los cambios fisicoquímicos en la columna de agua y que puede ayudar a identificar los factores que regulan la toxicidad y facilitar la elaboración de modelos predictivos de la toxicidad de las floraciones. En un centro colaborador del Organismo en Filipinas se están realizando investigaciones científicas utilizando la técnica del RBA para evaluar la capacidad de las toxinas producidas por la floración de algas nocivas de acumularse en especies de marisco como los mejillones y las ostras.

142. La demanda por los Estados Miembros para que se aplique esta tecnología está aumentando, como se muestra en la figura G.1. En consecuencia, se prevé que su uso siga creciendo en el próximo decenio.

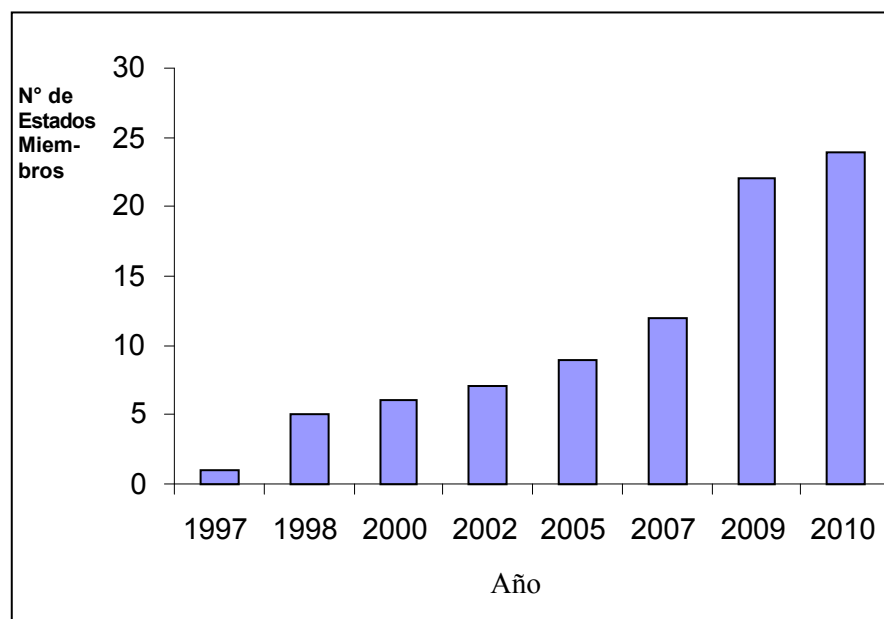


FIG. G-1. Número total de Estados Miembros que ha solicitado la transferencia del método del ensayo de unión receptor-ligando mediante proyectos de cooperación técnica.

G.2. Uso de radionucleidos de período largo para estudiar los procesos ambientales

143. Los radionucleidos de período largo, debido a su elevada variabilidad en la naturaleza y sus diferentes propiedades físicas y químicas, se han utilizado para estudiar procesos biogeoquímicos (por ejemplo, en investigaciones sobre migración, oceanográficas o sobre sedimentación). Las características radiactivas de estos nucleidos y la variación de las razones padre-descendiente como función del tiempo se utilizan en las mediciones de datación (por ejemplo, en la datación con carbono 14 o con uranio-plomo) y para la investigación de procesos naturales dependientes del tiempo, como los estudios sobre migración o sedimentación.

144. Estos radionucleidos de período largo pueden servir de trazadores naturales y artificiales y de relojes radiactivos del medio ambiente, lo que permite a los investigadores datar y estudiar procesos ambientales de gran escala, así como obtener información que de otro modo no sería accesible. Asimismo, con la incertidumbre que rodea a los futuros escenarios climáticos y las posibles respuestas ambientales, la investigación está centrándose cada vez más en los trazadores basados en radionucleidos y las metodologías de datación para mejorar la comprensión de los procesos ambientales y los cambios en los entornos marino, de agua dulce y terrestre.

145. Los radionucleidos sirven de instrumento para investigar los recursos de los océanos, los procesos oceanográficos y la contaminación marina sobre una base cuantitativa y, al mismo tiempo, pueden ayudar a abordar problemas de gestión de las zonas costeras. Dado que los radionucleidos contienen un 'reloj' debido a su decaimiento con el tiempo, pueden utilizarse para estudiar procesos biogeoquímicos temporales en el entorno marino.

146. Durante los dos últimos decenios, debido al rápido desarrollo de la instrumentación de espectrometría de masas inorgánicas, los espectrómetros de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), especialmente los espectrómetros de masas de sector magnético con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-SFMS) equipados con analizadores de sector magnético con

doble enfoque, han sido instrumentos complementarios y alternativos a los métodos radioanalíticos tradicionales (por ejemplo, la espectrometría alfa y el centelleo líquido) para el análisis de los radionucleidos de período largo. Las técnicas de espectrometría de masas dominan la esfera del análisis isotópico porque requieren menos tiempo, pueden tener un umbral de detección menor, y son muy exactas y precisas. El ICP-MS es en ocasiones la única técnica que permite determinar la ‘huella’ isotópica, especialmente en el caso de los isótopos menores de un elemento.

147. Las fuentes de contaminación ambiental pueden determinarse mediante un análisis de la abundancia isotópica y/o de la razón isotópica, que constituye una especie de ‘huella’ de la contaminación. Se prevé que las sustancias químicas producidas a partir de distintas fuentes mediante procesos esencialmente diferentes muestren composiciones isotópicas específicas que puedan usarse para determinar las fuentes.

148. Una vez determinadas las distintas fuentes (por ejemplo, antropogénicas o geogénicas naturales), las abundancias isotópicas y las razones isotópicas pueden usarse para cuantificar la distribución de fuentes. Las huellas isotópicas son la base para la investigación de los cambios históricos y ambientales de los emplazamientos de muestreo seleccionados.

H. Recursos hídricos²¹

149. Se están utilizando estudios basados en isótopos estables y radiactivos para apoyar la gestión integral de las aguas subterráneas ya que la eficacia de esas técnicas en relación con el tiempo y los costos goza de un reconocimiento más amplio. Existen varios ejemplos recientes en los que las técnicas isotópicas se han utilizado en apoyo de la gestión de las aguas subterráneas. Por ejemplo, en el sistema acuífero guaraní en Sudamérica, la cuenca de Tadla en Marruecos y el sistema acuífero de arenisca de Nubia en el norte de África, las interpretaciones de los datos isotópicos se han utilizado no solo para confirmar los estudios hidrológicos tradicionales sino también para comprender mejor el flujo de las aguas subterráneas y la dinámica de los acuíferos. En particular, los isótopos se han usado en esas zonas para definir las fuentes y los mecanismos de recarga de las aguas subterráneas, determinar la edad y la tasa de desplazamiento de las aguas subterráneas, y cuantificar la mezcla de aguas subterráneas entre acuíferos. Se prevé que la aplicación de técnicas isotópicas en las investigaciones hidrológicas en general y en la gestión integral de los recursos hídricos subterráneos en particular aumente sustancialmente en los próximos años.

I. Producción de radioisótopos y tecnología de la radiación

I.1. Radioisótopos y radiofármacos

I.1.1. Utilización de agentes de fijación de blancos moleculares con fines de obtención de imágenes y terapéuticos

150. Las modalidades de obtención de imágenes basadas en radioisótopos como la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT) y la tomografía por emisión de positrones (PET)

²¹ Additional information is available in the related documents of the *Nuclear Technology Review 2011* on GovAtom.

requieren que siempre haya disponibles nuevos radiofármacos (compuestos químicos o sustancias biológicas marcadas con un radioisótopo) para hacer frente a los problemas de diagnóstico. El uso de radiofármacos muy específicos como biomarcadores de los procesos moleculares de una enfermedad, método que se conoce como “imagenología molecular”, sirve como indicador temprano de la enfermedad o como parámetro objetivo para medir la eficacia del tratamiento, particularmente en el caso de los pacientes con cáncer. Se ha diseñado una serie de compuestos marcados destinados específicamente a procesos biológicos previamente inexplorados. Su preparación requiere procedimientos muy eficaces, lo que ha dado lugar al desarrollo de enfoques alternativos. En la esfera de la PET, se están investigando activamente nuevos sistemas generadores y ciclotrones compactos para producir galio 68, flúor 18 y carbono 11, así como nuevos módulos de síntesis automáticos basados en la microfluídica.

151. Encontrar nuevos métodos eficaces para el tratamiento terapéutico del cáncer es uno de los desafíos más urgentes de la medicina radiológica. El enfoque del diagnóstico molecular por imágenes se ha ampliado y utilizado con éxito para administrar dosis terapéuticas de radiactividad en el lugar del tumor a fin de destruir las células cancerosas (terapia con radionucleidos). Esto se logra incorporando un radionucleido terapéutico adecuado dentro de un vector molecular que, después de su administración in vivo, se acumula rápidamente en el lugar del tumor como resultado de su afinidad específica con un blanco molecular expresada selectivamente por las células cancerosas. De este modo, la radiactividad queda retenida de manera adecuada y firme en el lugar del tumor y las partículas emitidas durante el decaimiento del radionucleido interactúan estrechamente con las células cancerosas sin tener que sortear ninguna barrera biológica. Los tumores neuroendocrinos son una de las afecciones más idóneas para este tipo de terapias de radionucleidos con péptidos marcados con itrio 90 y lutecio 177 denominadas DOATATOC y DOTATAE, respectivamente. Otras ventajas de la terapia con radionucleidos es la existencia de un número considerable de nucleidos radiactivos con características idóneas para su aplicación terapéutica (por ejemplo, el itrio 90, el lutecio 177, el cobre 67, el cobre 64, el renio 188 y el bismuto 213), que pueden enlazarse químicamente a varias biomoléculas portadoras destinadas selectivamente a diferentes tipos de células cancerosas.

I.1.2. Seguridad de los suministros de molibdeno 99 y tecnecio 99m ²²

152. Las graves escaseces sufridas desde finales de 2007 hasta el tercer trimestre de 2010 en el suministro de molibdeno 99 producido por fisión y, en consecuencia, de generadores de tecnecio 99m, han dado lugar a un considerable aumento del interés por investigar y desarrollar tecnologías alternativas para su producción.²³ El uso de tecnologías que no utilizan uranio muy enriquecido y el examen de las cuestiones de desarrollo correspondientes, así como la aplicación de enfoques basados en aceleradores, contribuirían a reducir la dependencia de los reactores antiguos con que trabaja la industria del molibdeno 99 producido por fisión. Por ejemplo, se está investigando la producción de molibdeno 99 mediante reacciones fotonucleares a partir de blancos de molibdeno 100 muy enriquecidos [molibdeno 100 (gamma, neutrón) molibdeno 99] en aceleradores de electrones de 15–20 MeV.²⁴

²² Véase también la sección D.2. “Reactores de investigación”

²³ Se puede consultar información adicional en el anexo VII del Examen de la tecnología nuclear – 2010.

²⁴ Informe de la AEN de la OCDE de 2010 titulado “The Supply of Medical Radioisotopes – Review of Potential Molybdenum-99, Technetium-99m Production Technologies”

153. Investigadores canadienses proponen la producción directa de tecnecio ^{99m}Tc basada en ciclotrones como alternativa práctica para aliviar, al menos en parte, las escaseces en los países que tienen acceso a ciclotrones de baja o media energía. Es necesario seguir investigando los aspectos económicos de la producción directa diaria de tecnecio ^{99m}Tc en las cantidades requeridas. El método consistente en producir tecnecio ^{99m}Tc directamente por reacción de molibdeno 100 ($p,2n$) tecnecio ^{99m}Tc depende del aprovechamiento de los casi 40 ciclotrones con capacidad para acelerar protones en la gama de 20 a 30 MeV (Fig. I-1.). Los blancos de molibdeno 100 muy enriquecidos son necesarios en este método para asegurar la pureza del radionucleido de tecnecio ^{99m}Tc requerido para usos médicos.

154. En consecuencia, para ambos enfoques antes mencionados, la tecnología de recuperación y reciclaje de los blancos de molibdeno 100 enriquecidos sería una condición indispensable y aún deben elaborarse protocolos y métodos adecuados.

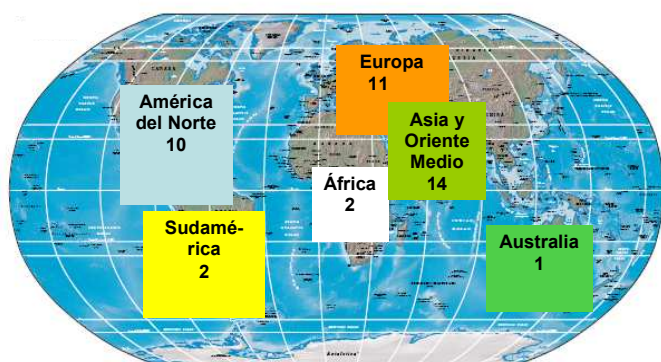


FIG. I.1. Distribución de ciclotrones con energía superior a 20 MeV para la producción de isótopos médicos (fuente: Dr. D. Schlyer, Laboratorio Nacional de Brookhaven (Estados Unidos de América) basada en cuatro importantes fabricantes de ciclotrones).

I.2. Aplicaciones de las tecnologías de la radiación

I.2.1. Métodos integrados de utilización de radiotrazadores y simulación por computadora para la gestión de los sedimentos

155. Durante los últimos años se ha utilizado crecientemente un método integrado de elaboración de modelos y utilización de trazadores para abordar el complejo problema del movimiento de sedimentos en la costa y el fondo marino. Las técnicas de radiotrazadores proporcionan información cuantitativa como la velocidad, el espesor y la tasa de transporte de los sedimentos, que puede utilizarse para la validación de modelos matemáticos. Se han desarrollado nuevos sistemas avanzados (fig. I.2.), como los sistemas compactos de adquisición de datos que utilizan el Sistema Mundial de Localización (GPS) para la monitorización de las concentraciones de radiotrazadores como función de la latitud y la longitud, los sistemas de inyección mejorados para la inyección segura y adecuada de radiotrazadores, y nuevos programas informáticos para el tratamiento y la interpretación adecuados de los datos. Por ejemplo, en 2009 y 2010 se realizaron en la India investigaciones con radiotrazadores utilizando polvo de vidrio marcado con escandio 46 como trazador en una zona de vertedero existente en el puerto de Visakhapatnam y en dos emplazamientos de vertederos propuestos en el puerto de Calcuta. Los resultados indicaron que la zona existente y uno de los emplazamientos propuestos eran idóneos para

verter sedimentos dragados, mientras que el otro emplazamiento propuesto no era adecuado ya que se observó el movimiento de una importante cantidad de sedimentos hacia un canal de navegación.

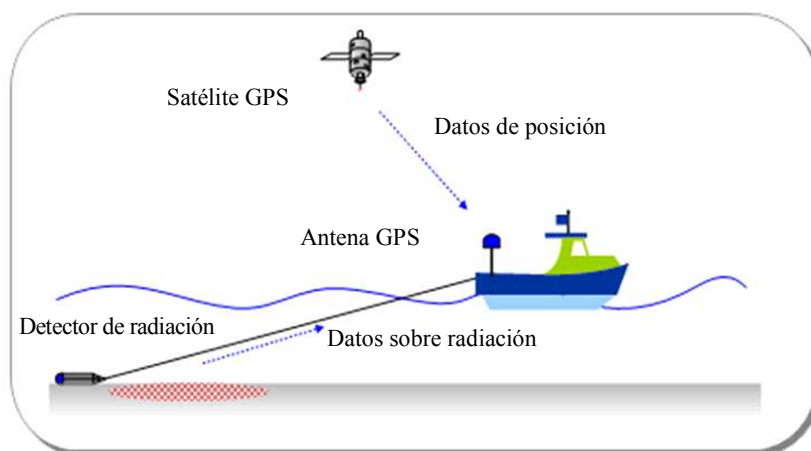


FIG. I-2. Esquema del sistema de recuento gamma con GPS integrado para estudios de rastreo de sedimentos en una zona costera.

I.2.2. Aceleradores de haces de electrones de baja energía

156. El mercado de aceleradores de electrones industriales que más rápidamente creció en 2010 (www.Radtech.org) fue el de la gama comprendida entre <100 keV y varios cientos de keV, cuya energía es suficientemente baja para que los aceleradores puedan ser blindados con un metal de alta densidad — en general el plomo, aunque más recientemente el acero. El montaje de la mayoría de los aceleradores de haces de electrones de baja energía se puede realizar en procesos industriales continuos como en el caso de las industrias de impresión y revestimiento.

157. El curado de tintas, revestimientos y adhesivos mediante tratamiento con haces de electrones elimina la necesidad de utilizar compuestos orgánicos volátiles, permitiendo a los fabricantes alcanzar elevadas velocidades de producción con un consumo de energía mínimo y un reducido impacto ambiental. En estas aplicaciones, la tecnología de haces de electrones permite una reducción de hasta un 90% en el consumo de electricidad en comparación con el secado y curado térmicos convencionales. Existen aceleradores de haces de electrones de energía baja compactos y de costo moderado de varios fabricantes para su uso en laboratorios y su integración en procesos de revestimiento, impresión y curado de superficies a alta velocidad. Un ejemplo de ese tipo de máquina de entre 80 y 120 keV se muestra en la figura I.3.



FIG. I-3. Unidad de desarrollo de aplicaciones con un haz de electrones avanzado de baja energía autoblandado (fuente: <http://www.aeb.com/>)

158. Los usos adicionales de los aceleradores de haces de electrones de baja energía incluyen la reticulación de películas termocontraíbles y nanocompuestas que se utilizan, por ejemplo, en el embalaje de alimentos. Ese tipo de películas prolongan la duración de los productos cárnicos, avícolas y lácteos y se utilizan para crear embalajes resistentes a la manipulación. El uso de los haces de electrones para el curado de materiales de embalaje y aplicaciones conexas aumentó durante los dos últimos años en respuesta a las cambiantes necesidades del mercado y las demandas de innovación.