

Conferencia General

GC(57)/INF/2

30 de julio de 2013

Distribución general

Español

Original: Inglés

Quincuagésima séptima reunión ordinaria

Punto 18 del orden del día provisional
(GC(57)/1 y Add.1)

Examen de la tecnología nuclear – 2013

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 2012.
- En el *Examen de la tecnología nuclear – 2013* se abordan los siguientes temas: aplicaciones eléctricas, datos atómicos y nucleares, aceleradores y reactores de investigación y ciencias y aplicaciones nucleares. En el sitio web del Organismo¹ se pueden consultar otros documentos en inglés relacionados con el Examen de la tecnología nuclear 2013 sobre la tecnología nuclear para la producción de hidrógeno y las enseñanzas preliminares extraídas del accidente de Fukushima Daiichi en relación con el desarrollo de tecnologías de centrales nucleares avanzadas.
- En el Informe Anual para 2012 (GC(57/3), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el Informe de Cooperación Técnica para 2012 (GC(57)/INF/4) 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/GC57/Agenda/index.html>

Examen de la tecnología nuclear – 2013

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. La capacidad mundial de generación de energía nucleoelectrica aumentó a 372,1 GW(e) en 2012 y al final del año había 437 reactores en funcionamiento. Tres nuevos reactores se conectaron a la red, y dos reactores que se encontraban “en régimen de parada duradero” se pusieron nuevamente en funcionamiento. En 2012 se colocaron en régimen de parada permanente solo tres reactores, frente a 13 en 2011. Al final del año se encontraban en construcción 67 reactores nuevos, cifra que sigue siendo bastante elevada. Se prevé una importante expansión del uso de la energía nuclear a nivel mundial, del 23 % al 100 % hasta 2030, aunque las proyecciones del Organismo para 2030 son del 1 al 9 % inferiores a las proyecciones hechas en 2011. Se espera que la mayor parte del crecimiento se dé en países que ya disponen de centrales nucleares en funcionamiento, particularmente en el Lejano Oriente donde, según las proyecciones, se producirá la mayor expansión.
2. Aunque algunos países retrasaron las decisiones de iniciar programas nucleoelectricos, otros siguieron adelante con sus planes de implantación de la energía nuclear. En Julio de 2012, los Emiratos Árabes Unidos se convirtieron en el primer país en 27 años en comenzar la construcción de una primera central nuclear. Además de los Emiratos Árabes Unidos, varios otros países, entre ellos Belarús y Turquía, han realizado progresos en 2012 hacia la construcción de sus primeras centrales nucleares.
3. En la edición de 2011 del “Libro Rojo”, titulado *Uranio 2011: Recursos, Producción y Demanda*, publicado conjuntamente por la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (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 las de la edición anterior, ya que la producción mundial de uranio aumentó considerablemente como resultado en gran medida del incremento de la producción en Kazajstán. Durante 2011 se informó de la existencia de nuevos recursos en muchos yacimientos de uranio de África. Los precios al contado del uranio, que al final de 2011 eran de 135 dólares/kg de U, disminuyeron en el segundo semestre de 2012 a cerca de 110 dólares/kg de U. A fines de 2012, los precios al contado del uranio aumentaron a cerca de 115 dólares/kg de U. Ahora bien, los precios del uranio a largo plazo se mantuvieron constantes, en cerca de 158 dólares/kg de U.
4. La planta de enriquecimiento por difusión Georges Besse en Francia, cerrada en junio de 2012, ha sido sustituida por la Georges Besse II. En septiembre de 2012, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos expidió la primera licencia de construcción y explotación de una instalación de enriquecimiento por láser en gran escala a Global Laser Enrichment, empresa subsidiaria de GE-Hitachi Nuclear Energy.
5. En julio de 2012, el Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea finalizó la construcción de la instalación integrada de demostración inactiva de piroprocesamiento para el piroprocesamiento de combustible gastado de mezcla de óxidos. Los ensayos de puesta en marcha comenzaron en agosto.

6. En la esfera de la gestión de desechos radiactivos, actualmente se examina en el Canadá la posibilidad de ampliar tres instalaciones de disposición final geológica: la instalación en el emplazamiento de Bruce para LLW e (ILW) de Ontario Power Generation, el emplazamiento de los laboratorios de Chalk River actualmente en estudio para LLW e ILW, y un tercer emplazamiento, aún no definido, para el Repositorio de Combustible Nuclear gastado y Centro de Competencia del Canadá. En España, Villar de Cañas fue seleccionado oficialmente en diciembre como emplazamiento del almacén central del combustible nuclear gastado de España. Asimismo, en diciembre la empresa Posiva, de Finlandia, presentó al Gobierno finlandés una solicitud de licencia para la construcción de un repositorio para su instalación de disposición final de combustible gastado en Olkiluoto, y está previsto que las actividades de disposición final comiencen en 2020.

7. En 2012 se iniciaron los trabajos de construcción de un nuevo reactor de investigación multipropósito de 5 MW en Jordania. El OIEA siguió apoyando los esfuerzos mundiales encaminados a reducir al mínimo el uso de combustible de uranio muy enriquecido (UME) en los reactores de investigación. En el marco de la Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM), en septiembre de 2012 se procedió a la conversión del núcleo del reactor de investigación Maria en Polonia para que, en lugar de combustible de uranio muy enriquecido (UME), utilice combustible de uranio poco enriquecido (UPE). Se procedió a la conversión del reactor de investigación TRIGA MARK III de México para que, en lugar de combustible de UME, utilice combustible de UPE y, tras su retirada definitiva, el combustible de UME se devolvió en marzo de 2012 a los Estados Unidos de América. En diciembre de 2012, se llevó a cabo la retirada definitiva de todo el UME de Austria tras la conversión total del reactor TRIGA de Viena para que utilice combustible de UPE. Las actividades en Austria y México marcaron la retirada de todo el combustible de UME para TRIGA de las aplicaciones nucleares internacionales civiles en todo el mundo. En el marco del programa de devolución de combustible de origen ruso para reactores de investigación, en 2012 el OIEA prestó asistencia en la repatriación de cerca de 110 kg de combustible de UME sin irradiar del Instituto de Física y Tecnología de Jarkov, Ucrania, de unos 20 kg de combustible gastado de UME del Instituto de Investigaciones Nucleares de Kiev, de cerca de 100 kg de combustible gastado de UME de Uzbekistán y Polonia y de 27 kg de combustible de UME sin irradiar de Polonia.

8. Las aplicaciones nucleares abordadas en este Examen de la tecnología nuclear reflejan tres esferas temáticas de gran interés: el empleo de tecnologías nucleares para mejorar la inocuidad de los alimentos y la seguridad alimentaria, los nuevos adelantos en la lucha contra el cáncer, y el uso de tecnologías nucleares para hacer frente a los efectos del cambio climático.

9. La inocuidad de los alimentos y la seguridad alimentaria se mejoran mediante la irradiación de los alimentos, lo que supone exponerlos a la radiación ionizante en condiciones controladas. Las instalaciones de irradiación utilizan comúnmente los isótopos radiactivos cobalto 60 o cesio 137 para producir rayos gamma. Ahora bien, debido a las dificultades para adquirir, enviar y recibir fuentes de radioisótopos resulta difícil recurrir en mayor medida a las técnicas de irradiación de alimentos que emplean estos isótopos radiactivos. Por consiguiente, cada vez hay más interés en la tecnología basada en haces de electrones y rayos X, que utiliza electricidad para producir radiación ionizante. Estas tecnologías ofrecen la posibilidad de recurrir en mayor medida a la irradiación de alimentos para mejorar la inocuidad de los alimentos y ayudar a aumentar la oferta mundial de alimentos mediante la reducción de las pérdidas y los residuos de alimentos.

10. La inocuidad de los alimentos se convierte en motivo de gran preocupación tras una emisión de radiactividad a raíz de un accidente nuclear. Las técnicas nucleares se emplean en las actividades sobre el terreno y de laboratorio armonizadas que se están diseñando con el fin de que las autoridades agrícolas puedan evaluar eficaz y coherentemente la situación respecto de la inocuidad de los alimentos lo antes posible tras un suceso nuclear. Las enseñanzas extraídas de los accidentes ocurridos han mostrado que se requieren mejoras en la notificación y gestión de los datos relacionados con los alimentos y la agricultura, especialmente cuando varios países se ven afectados y es necesario adoptar un enfoque coordinado.

11. La radioterapia, que tiene por objeto administrar una dosis exacta de radiación a un tumor causando daños mínimos a los tejidos normales que lo rodean, es un tratamiento eficaz contra el cáncer. Los adelantos recientes en la radioterapia por fotones ofrecen ventajas potencialmente más importantes que la radioterapia convencional, entre ellas, mejor distribución de la dosis, menor toxicidad, rápida administración del tratamiento y control local más preciso, factores que redundan en el aumento de las probabilidades de supervivencia. En los dos últimos decenios se ha observado un mayor interés por la radioterapia con partículas cargadas, así como un avance en esta esfera, particularmente en la radioterapia con protones y la radioterapia con iones de carbono. También se han registrado progresos en el uso de la braquiterapia tridimensional, que consiste en administrar radioterapia colocando fuentes radiactivas en los tumores o en su proximidad, o bien en las cavidades corporales. El empleo de estas tecnologías avanzadas entraña considerables costos adicionales, que deberían compensarse con los beneficios potenciales de estas tecnologías frente a los métodos tradicionales.

12. La manipulación de la materia a los niveles atómico y molecular para concebir nuevos materiales, dispositivos y estructuras se denomina nanotecnología. En la esfera de la medicina se observa un adelanto interesante. Determinadas propiedades de ciertas nanoestructuras podrían ayudar a luchar contra el cáncer utilizando enfoques novedosos. Ello ha llevado a la creación de la nueva esfera de la nanomedicina, definida como la aplicación médica de la nanotecnología. Al atacar las células cancerosas, los sistemas nanométricos adaptados pueden actuar como vehículos de liberación de medicamentos que permiten administrar grandes dosis de radionucleidos en las células malignas sin afectar a los tejidos normales, reduciendo así considerablemente los efectos secundarios que generalmente producen muchas de las actuales terapias contra el cáncer.

13. Las técnicas nucleares desempeñan un papel importante en la comprensión del cambio climático, la previsión de sus tendencias futuras y la adaptación a sus efectos. En el medio marino, los efectos del cambio climático, como la acidificación de los océanos, están afectando la pesca, la acuicultura costera, los arrecifes coralinos y otros recursos costeros. Las tecnologías nucleares responden a algunas de las preguntas científicas fundamentales relacionadas con la interacción entre las condiciones ambientales de los ecosistemas y organismos oceánicos y marinos. El uso tanto de los radionucleidos como de los isótopos estables ha contribuido a una mejor comprensión del fenómeno de la Oscilación Austral, “El Niño” a lo largo de un período que se remonte a varios milenios. Las técnicas nucleares también se utilizan para estudiar los efectos de la acidificación de los océanos en los ecosistemas y la biodiversidad marinos.

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. A 31 de diciembre de 2012 había en funcionamiento 437 reactores nucleares de potencia en todo el mundo, con una capacidad total de 372,1 GW(e)² (véase el cuadro A-1). Esta cifra representa un ligero aumento, de unos 3,3 GW(e) de la capacidad total, en comparación con las cifras de 2011. Se realizaron tres nuevas conexiones a la red: Ningde-1 (1 000 MW(e)) en China, y Shin-Wolsong-1 (960 MW(e)) y Shin-Kori-2 (960 MW(e)) en la República de Corea. Además, en el Canadá se volvieron a conectar dos unidades abandonadas, Bruce 1 y 2 (de 772 MW(e) cada una).

² Un GW(e) equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.

2. Durante 2012 se siguieron sintiendo los efectos del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi en el número total relativamente bajo de inicios de construcción de nuevos reactores. Se iniciaron siete construcciones en 2012: Fuqing-4, Shidaowan-1, Tianwan-3 y Yangjiang-4 en China, Shin-Ulchin-1 en la República de Corea, Baltiisk-1 en la Federación de Rusia, y Barakah-1 en los Emiratos Árabes Unidos (Fig. A-1). Si bien esta cifra supera a la de 2011, es considerablemente inferior a la de 2010, cuando se alcanzó el punto álgido del aumento constate experimentado desde 2003, con 16 inicios de construcción.



Fig. A-1. Construcción en Barakah-1 en los Emiratos Árabes Unidos (Fotografía: ENEC).

3. Por otro lado, en 2012 solo se declararon oficialmente en régimen de parada permanente tres reactores: Gentilly-2 en el Canadá y Oldbury-A1 y Wylfa-2 en el Reino Unido. Estuvieron en funcionamiento durante 30 años, 45 años y 41 años, respectivamente. Este número de paradas es considerablemente inferior a las 13 de 2011.

4. A 31 de diciembre de 2012 había 67 reactores en construcción, cifra que sigue siendo bastante elevada (Fig. A-2). Como en años anteriores, la expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, siguen centradas en Asia (véase el cuadro A-1), en particular en China. Del número total de reactores en construcción, no menos de 47 están en Asia, así como 38 de los últimos 48 reactores nuevos que se han conectado a la red.



Fig. A-2. Construcciones en Shin Kori-3 en la República de Corea.

5. En 2012 se expidieron en los Estados Unidos de América, por primera vez en los últimos 30 años, licencias para la construcción y explotación de cuatro unidades AP1000 en las centrales nucleares Vogtle y V.C. Summer.

6. Sigue habiendo interés en todo el mundo en la explotación a largo plazo de las centrales existentes. En mayo de 2012, con el patrocinio del Departamento de Energía de los Estados Unidos y la Comisión Reguladora Nuclear, el Organismo organizó la tercera Conferencia Internacional sobre la gestión de la vida útil de las centrales nucleares en Salt Lake City, Utah (EE.UU.). Más de 350 participantes, que representaban a 38 Estados Miembros y tres organizaciones internacionales, asistieron a la conferencia y debatieron las repercusiones del accidente de Fukushima Daiichi en la gestión de la vida útil de las centrales nucleares y la explotación a largo plazo.

7. En 2012 se mantuvo en muchos países la tendencia a aumentar la potencia y a renovar o prorrogar las licencias de reactores en funcionamiento. En Francia, la Autoridad de Seguridad Nuclear concedió una renovación de diez años de la licencia de explotación para la unidad 2 de la central nuclear de Bugey, más allá del plazo de 30 años, con lo que se convirtió en la tercera unidad francesa en obtener esa autorización. En el Reino Unido, la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares obtuvo permiso para seguir explotando Wylfa-1 hasta septiembre de 2014 mediante la transferencia de combustible parcialmente usado de la unidad 2. En los Estados Unidos de América, la NRC renovó las licencias de explotación de las unidades de las centrales nucleares de Pilgrim y Columbia por 20 años más, lo que eleva a 73 el total de renovaciones de licencias aprobadas desde 2000. Además, se estaban examinando 13 solicitudes de renovación de la licencia. Asimismo, la NRC aprobó en 2012 seis solicitudes de aumento de potencia, y también había 16 solicitudes en curso de examen.

8. Dos reactores fueron puestos en régimen de parada, al menos temporalmente, debido a los efectos de su envejecimiento. Durante una interrupción del servicio programada en Doel-3 en Bélgica, las inspecciones en servicio por medios ultrasónicos se centraron en comprobar que no hubiera fisuras bajo el plaquero de la vasija de presión del reactor. Aunque las inspecciones no hallaron defectos bajo el plaquero, se observó un elevado número de indicaciones cuasilaminares, principalmente en las capas inferior y superior del núcleo. En una inspección similar realizada en septiembre en Tihange-2 se observaron indicaciones similares, aunque en menor medida. Como consecuencia de ello, Doel-3 y Tihange-2 se mantuvieron en régimen de parada fría al final del año mientras la compañía eléctrica realizaba una evaluación técnica para determinar si alguna de ellas se podía poner en servicio nuevamente en condiciones de seguridad.

9. En Bélgica, habida cuenta del número excepcionalmente elevado de indicaciones halladas en Doel-3 y Tihange-2, el Organismo Federal de Control Nuclear ha establecido a un grupo de expertos internacionales en las esferas de la tecnología de las vasijas de reactores, los ensayos no destructivos, la mecánica de fracturas, la evaluación mediante el código ASME XI, la evaluación determinista de la seguridad, y el análisis probabilista de la seguridad.

10. En el Japón se pusieron nuevamente en marcha, en julio de 2012, Ohi 3 y 4, las dos primeras unidades puestas en servicio de nuevo tras el accidente de Fukushima Daiichi en marzo de 2011. Durante todo el año se debatió el futuro de la energía nucleoelectrica en el Japón. Tras la victoria del Partido Liberal Democrático en las elecciones nacionales de diciembre, el nuevo primer ministro, Shinzo Abe, anunció que el Gobierno estudiaría la mezcla energética nacional en los próximos años y revisaría la política sobre energía nuclear que el gobierno anterior había anunciado.

11. La energía nucleoelectrica sigue siendo una opción importante para aumentar la producción de electricidad para países con necesidades energéticas cada vez mayores, y en 2012 los países que tienen previsto implantar la energía nucleoelectrica adoptaron medidas importantes. El 18 de julio de 2012, los Emiratos Árabes Unidos se convirtieron en el primer país en 27 años en iniciar la construcción de una primera central nuclear, al verter la Corporación de Energía Nuclear de los Emiratos (ENEC) el primer hormigón tras recibir una licencia de construcción de la Autoridad Federal de Reglamentación Nuclear. Está previsto que la unidad Barakah-1 esté en funcionamiento en 2017 y existen planes para disponer de otras tres unidades en 2020.

12. Varios otros países adoptaron en 2012 medidas prácticas para construir su primera central nuclear. En junio de 2012, Belarús acogió un misión de Examen integrado de la infraestructura nuclear (INIR), que llegó a la conclusión de que el país se está preparando adecuadamente para ejecutar un programa nucleoelectrico. El país firmó un contrato en julio de 2012 con Atomstroyexport de la Federación de Rusia para realizar trabajos en el emplazamiento y construir dos unidades de reactor de potencia refrigerado y moderado por agua (WWER). Turquía también está avanzando en su programa y firmó un contrato en 2010 para construir cuatro unidades de WWER 1200 en el emplazamiento de Akkuyu. Asimismo, en la Conferencia General de 2012, anunció que tiene previsto construir una segunda central nuclear en el emplazamiento de Sinop, y que está manteniendo negociaciones con los proveedores. Otros países también han confirmado su intención de seguir adelante con la elaboración de un programa nucleoelectrico nacional; han seguido construyendo infraestructura y están estudiando la posibilidad de establecer disposiciones contractuales. Algunos otros Estados Miembros se están preparando activamente para aplicar un programa nucleoelectrico, pero no han tomado una decisión definitiva sobre si siguen adelante con su ejecución.

13. Además de en Belarús, en 2012 se realizaron otras dos misiones del INIR, una en Jordania y otra en Viet Nam. La misión del INIR en Jordania, que se llevó a cabo en enero, era una misión de seguimiento para examinar el plan de acción del país, elaborado en respuesta a las recomendaciones de la primera misión del INIR, realizada en agosto de 2009. Se indicó que se habían realizado progresos en Jordania desde 2009, especialmente en las actividades relacionadas con el proyecto de central nuclear. En diciembre se llevó a cabo con éxito la misión del INIR en Viet Nam.

14. Las misiones del INIR del Organismo son una parte de un conjunto holístico que da apoyo al desarrollo energético sostenible. Además de las misiones del INIR, el Organismo ayuda a los Estados Miembros interesados a aumentar sus capacidades de análisis y planificación de sus sistemas energéticos nacionales y, en el caso de los que ejecutan o tienen previsto ejecutar programas nucleoelectricos, sus capacidades de planificación estratégica a largo plazo de sus sistemas de energía nuclear. En 2012 se emplearon los instrumentos del Organismo de análisis y planificación de los sistemas energéticos nacionales en más de 125 Estados Miembros. Se dio capacitación en el uso de estos instrumentos a más de 650 analistas y planificadores especializados en energía de 69 países. En relación con la planificación estratégica a largo plazo de los sistemas de energía nuclear, el Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) facilita una metodología, otros instrumentos, capacitación y asistencia en la realización de evaluaciones de los sistemas de energía nuclear (NESA). En 2011–2012, había en curso o se habían iniciado NESA en Belarús, Indonesia, Kazajstán y Ucrania.

15. El Organismo incrementa su asistencia en materia de capacitación mediante la cooperación con centros nacionales de todo el mundo. En julio firmó un acuerdo práctico con la Escuela superior nuclear internacional de la Corporación de Energía Eléctrica de Corea (KINGS). La misión de esta escuela es facilitar el acceso al sistema de enseñanza y capacitación coreano sobre los usos pacíficos de la energía nuclear para estudiantes extranjeros y empleados. El acuerdo práctico sienta las bases para la cooperación en lo relativo a la contratación de estudiantes internacionales, los programas de estudio y los seminarios, y los programas de divulgación. En octubre de 2011, el Organismo y la Autoridad de Energía Atómica de China suscribieron un acuerdo práctico de cooperación en materia de construcción segura de centrales nucleares. En él se prevé una colaboración más sólida entre el Organismo y el Centro internacional de capacitación en construcción de China para garantizar la construcción segura de nuevas centrales nucleares.

16. De los reactores comerciales en funcionamiento, alrededor del 82 % son reactores moderados y refrigerados por agua ligera, un 11 % son reactores moderados por agua pesada y refrigerados por agua pesada, un 3 % son reactores refrigerados por gas, y otro 3 % son reactores refrigerados por agua y moderados por grafito (Fig. A-3). Dos reactores están moderados y refrigerados por metal líquido.

Número de reactores

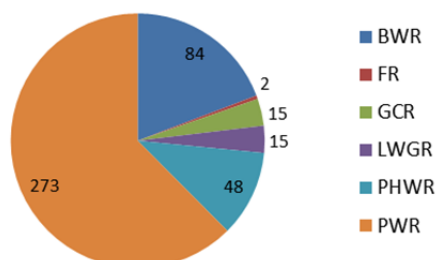


Fig. A-3. Distribución actual de los tipos de reactores. (BWR: reactor de agua en ebullición; FR: reactor rápido; GCR: reactor refrigerado por gas; LWGR: reactor refrigerado por agua ligera y moderado por grafito; PHWR: reactor de agua pesada a presión; PWR: reactor de agua a presión).

17. Aunque, tradicionalmente, la industria nuclear ha tratado de aprovechar las economías de escala, existe un creciente interés en los reactores de pequeña y mediana potencia (RPMP), en parte porque propician, con el tiempo, inversiones menores, más flexibles e incrementales. “Pequeña potencia” significa menos de 300 MW(e). “De mediana potencia” significa entre 300 MW(e) y 700 MW(e). Aproximadamente 45 conceptos de RPMP innovadores se encuentran en alguna etapa de investigación y desarrollo. En los siguientes párrafos se describen algunos de ellos.

18. La Argentina está desarrollando el reactor CAREM-25, un diseño de LWR a presión de tipo integrada y pequeña potencia, 150-300 MW(e), en el que todos los componentes primarios están en la vasija del reactor. En septiembre de 2011 se inició la excavación del emplazamiento para el prototipo de CAREM de 27 MW(e). En Francia, la empresa DCNS está desarrollando Flexblue, un pequeño diseño modular subacuático de 50–250 MW(e) basado en el reactor francés de propulsión marina refrigerado por agua.

19. En China, la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) está desarrollando el ACP100, un pequeño reactor avanzado de agua a presión modular integrado de 100 MW(e) que también puede utilizarse para la producción de calor y la desalación de agua de mar. Asimismo, está desarrollando el ACP600, un reactor avanzado de agua a presión de dos circuitos, adecuado para las redes eléctricas de menor capacidad.

20. En Francia, la empresa DCNS está desarrollando Flexblue, un diseño modular pequeño y transportable de 160 MW(e). Este reactor refrigerado por agua, que funciona en el fondo marino, utiliza tecnologías nucleares pasivas, navales y de alta mar para sacar provecho del mar, que es un sumidero de calor infinito y permanentemente disponible.

21. En el Japón, se ha desarrollado un LWR de 350 MW(e) con un sistema primario integrado llamado “reactor modular integrado” (IMR). Los ensayos de validación, las actividades de investigación y desarrollo en relación con componentes y métodos de diseño, y el desarrollo del diseño básico son necesarios antes de que se conceda la licencia. El Japón también ha estado desarrollando el 4S, un reactor rápido refrigerado por sodio líquido sin recarga de combustible in situ. El diseño ofrece dos niveles alternativos de potencia de 30MW(t) y 135 MW(t).

22. El diseño del reactor modular avanzado integrado en el sistema (SMART) de la República de Corea tiene una capacidad térmica de 330 MW(t) y está concebido para la desalación de agua de mar. En 2012 la Comisión de Seguridad Nuclear nacional concedió la aprobación del diseño estándar.

23. La Federación de Rusia está construyendo dos reactores KLT-40S de 35 MW(e) que serán montados en una plataforma flotante y se utilizarán para la cogeneración de electricidad y calor industrial. El KLT-40S se basa en la central de propulsión marina KLT-40 comercial y es una variante avanzada del reactor que alimenta los rompehielos nucleares. El ABV-6M de 8,6 MW(e) se encuentra en

la fase de diseño detallado. Se trata de un reactor de agua ligera a presión integrado, con circulación natural del refrigerante primario. El RITM-200 de 8,6 MW(e), que actualmente se halla en la fase de diseño detallado, es un reactor integrado de circulación forzada para rompehielos nucleares. La Federación de Rusia también tiene previsto construir varias unidades de SVBR-100 en 2013. El SVBR-100 es un reactor rápido modular innovador de pequeña potencia con una mezcla eutéctica plomo-bismuto como refrigerante y una potencia de 100 MW(e).

24. En los Estados Unidos se están desarrollando cuatro RPMP de agua a presión integrados: mPower, NuScale, el RPMP de Westinghouse y el SMR-160 de Holtec. El mPower incorpora entre 2 y 6 módulos de 180 MW(e). El NuScale Power proyecta una central nuclear que incorpora hasta doce módulos de 45 MW(e). El RPMP de Westinghouse es un diseño conceptual de 225 MW(e) en el que se incorporan sistemas de seguridad pasiva y componentes demostrados del AP-1000. También ha comenzado el desarrollo de un diseño más reciente de RPMP, el SMR-160 de Holtec, un reactor de 160 MW(e) que se basa en la convección natural, eliminando así la necesidad de bombas de refrigerante y la dependencia de fuentes de energía externas. GE-Hitachi está desarrollando PRISM, un reactor reproductor rápido refrigerado por metal líquido de 311 MW(e) con una contención subterránea en aisladores sísmicos con un sumidero final de calor pasivo refrigerado por aire.

25. En la India, el reactor avanzado de agua pesada (AHWR) de 304 MW(e) que está desarrollando el Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (BARC) se encuentra en la fase de diseño detallado. Empleará combustible de mezcla de óxidos (MOX) de UPE y torio e incorporará tubos de presión verticales y dispositivos de seguridad pasiva. El prototipo de reactor reproductor rápido (PFBR-500) de 500 MW(e) se encuentra en la fase final de construcción en Kalpakkam. La puesta en servicio está prevista para el primer trimestre de 2013. La India también está construyendo actualmente cuatro PHWR de 700 MW(e) y un FBR de 500 MW(e).

26. Aunque la producción de electricidad es, con diferencia, la función principal de los reactores actualmente en funcionamiento, varios de ellos también se utilizan con fines de desalación, de producción de calor industrial y calefacción urbana (Fig. A-4). Otros posibles usos no eléctricos futuros comprenden la producción de hidrógeno para, en primer lugar, mejorar los recursos de petróleo de baja calidad, como las arenas bituminosas, y compensar las emisiones de carbono asociadas al reformado de metano con vapor; en segundo lugar, apoyar la producción en gran escala de combustibles líquidos sintéticos basados en la biomasa, el carbón u otras fuentes de carbono; y, en tercer lugar, servir directamente como combustible para vehículos, muy probablemente para vehículos utilitarios ligeros híbridos enchufables con pilas de hidrógeno.

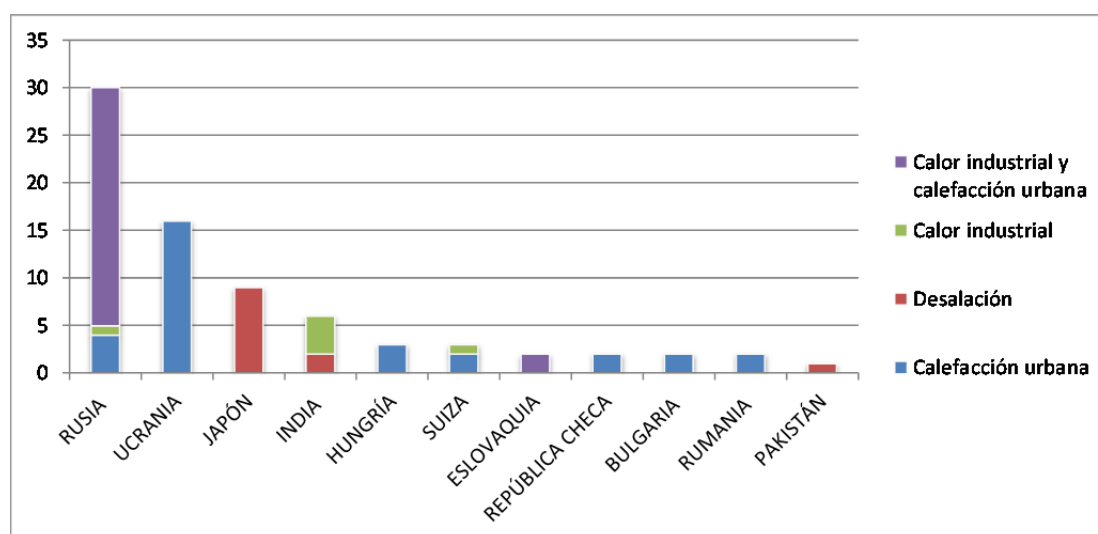


Fig. A-4. Número de reactores utilizados actualmente con fines no eléctricos y para producir electricidad.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo
(al 31 de diciembre de 2012)^a

País	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2012		Experiencia operacional total hasta 2012	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
Alemania	9	12 068			94,1	16,1	790	2
Argentina	2	935	1	692	5,9	4,7	68	7
Armenia	1	375			2,1	26,6	38	4
Bélgica	7	5 927			38,5	51,0	254	7
Brasil	2	1 884	1	1 245	15,2	3,1	43	3
Bulgaria	2	1 906			14,9	31,6	153	3
Canadá	19	13 500			89,1	15,3	634	5
China	17	12 860	29	28 844	92,7	2,0	141	7
Emiratos Árabes Unidos			1	1345				
Eslovaquia	4	1 816	2	880	14,4	53,8	144	7
Eslovenia	1	688			5,2	36,0	31	3
España	8	7 560			58,7	20,5	293	6
Estados Unidos de América	104	102 136	1	1 165	770,7	19,0	3834	8
Federación de Rusia	33	23 643	11	9 297	166,3	17,8	1091	4
Finlandia	4	2 752	1	1 600	22,1	32,6	135	4
Francia	58	63 130	1	1 600	407,4	74,8	1874	4
Hungría	4	1 889			14,8	45,9	110	2
India	20	4 391	7	4 824	29,7	3,6	377	3
Irán, República Islámica del	1	915			1,3	0,6	1	4
Japón	50	44 215	2	2 650	17,2	2,1	1596	4
México	2	1 530			8,4	4,7	41	11
Países Bajos	1	482			3,7	4,4	68	0
Pakistán	3	725	2	630	5,3	5,3	55	8
Reino Unido	16	9 231			64,0	18,1	1511	8
República Checa	6	3 804			28,6	35,3	128	10
República de Corea	23	20 739	4	4 980	143,5	30,4	404	1
Rumania	2	1 300			10,6	19,4	21	11
Sudáfrica	2	1 860			12,4	5,1	56	3
Suecia	10	9 395			61,5	38,1	402	6
Suiza	5	3 278			24,4	35,9	189	11
Ucrania	15	13 107	2	1900	84,9	46,2	413	6
Total^{b,c}	437	372 069	67	64 252	2 346,2		15 246	9

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

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

6 unidades, 5 028 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2 600 MW(e) en construcción;

40,4 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 19,0% del total de electricidad generada.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (81 años), Kazajstán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (188 años y un mes).

A.2. El futuro de la energía nucleoelectrica

27. Se prevé que el accidente de Fukushima Daiichi ralentice o retrase el crecimiento de la energía nucleoelectrica, pero no que invierta su sentido. El Organismo publica anualmente dos proyecciones actualizadas sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica a escala mundial, a saber, una baja y una alta. Las actualizaciones de las proyecciones baja y alta correspondientes a 2012 muestran un crecimiento de la capacidad nucleoelectrica en un 23 % en la proyección baja hacia 2030 y en un 100 % en la proyección alta. Con todo, la tasa de crecimiento es más lenta que la proyectada en 2011, sobre todo en la proyección baja.

28. La proyección alta parte del supuesto de que las actuales crisis financiera y económica serán superadas relativamente pronto y que las anteriores tasas de crecimiento económico y de demanda de electricidad se recuperarán, principalmente en el Lejano Oriente. Asimismo, se presuponen políticas estrictas a escala mundial para mitigar el cambio climático. La proyección baja parte del supuesto de que las tendencias actuales se mantendrán y que habrá pocos cambios en las políticas que afectan a la energía nucleoelectrica. No se presupone que todos los objetivos nacionales en materia de energía nucleoelectrica vayan a alcanzarse. Se trata de una proyección “conservadora pero plausible”. Las proyecciones se hacen a nivel regional y no nacional. En la proyección baja de 2012 se tiene en cuenta un posible descenso de la participación de la energía nucleoelectrica en la mezcla energética del Japón.

29. En la proyección baja, la capacidad nucleoelectrica instalada mundial aumenta a 456 GW(e) en 2030, lo que representa una reducción del 9 % respecto de lo proyectado el año anterior. En la proyección alta actualizada, crece hasta 740 GW(e) en 2030, es decir, aumenta aproximadamente un 1 % menos que lo proyectado en 2011. En relación con las proyecciones anteriores, en que no se tuvo en cuenta el accidente de Fukushima Daiichi, la proyección baja se ha reducido en un 16 % mientras que la proyección alta muestra un descenso más moderado del 8 %. En la proyección baja se observa un retraso de diez años en comparación con el crecimiento previsto antes del accidente de Fukushima; la capacidad proyectada para 2020 antes del accidente se proyecta ahora para 2030.

30. La mayor parte de este aumento se registrará en regiones que ya tienen centrales nucleares en funcionamiento. El aumento proyectado es más acusado en el Lejano Oriente: desde los 83 GW(e) de finales de 2012, la capacidad crece hasta 153 GW(e) en 2030 en la proyección baja, y hasta 274 GW(e), en la alta. Europa occidental muestra la mayor diferencia entre las proyecciones baja y alta. En la proyección baja, la capacidad nucleoelectrica de Europa occidental desciende de 114 GW(e) al final de 2012 a 70 GW(e) en 2030. En la proyección alta, la energía nucleoelectrica se incrementa hasta 126 GW(e). En América del Norte, en la proyección baja se prevé un pequeño descenso, desde los 115 GW(e) de finales de 2012 hasta 111 GW(e) en 2030. En la proyección alta se estima un incremento hasta la cifra de 148 GW(e).

31. Otras regiones con programas nucleoelectricos importantes son Europa oriental, el Oriente Medio y Asia meridional. Según las proyecciones baja y alta, la energía nucleoelectrica crece en estas regiones hasta niveles 2 a 4 GW(e) inferiores a los proyectados antes del accidente.

Energía nucleoelectrica y desarrollo sostenible

32. La energía desempeña un papel fundamental en la consecución de los objetivos del desarrollo sostenible. Las decisiones que adopten los países en los próximos años con respecto a los combustibles y las tecnologías energéticas tal vez determinen en gran medida la rapidez con que el mundo podrá avanzar hacia un futuro sostenible. En junio de 2012 se celebró en Rio de Janeiro (Brasil) una importante conferencia internacional, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (conocida también comúnmente como Rio+20), con el fin de examinar los progresos alcanzados en el desarrollo sostenible desde la celebración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Cumbre para la Tierra) en 1992, y de marcar el rumbo de futuras acciones en los planos nacional, regional y mundial. En el documento final de la Conferencia Rio+20, *El futuro que queremos*, se analiza un rumbo de desarrollo que abarca una gama de decisiones individuales y colectivas y se abordan varias cuestiones prioritarias, incluso el acceso a energía limpia para todos, y la garantía de que la energía producida no contribuya al cambio climático.

33. En noviembre y diciembre de 2012, se celebró en Doha (Qatar) el 18º período de sesiones de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CP-18), junto con el octavo período de sesiones de la Conferencia de las Partes en el Protocolo de Kyoto. Las Partes en el Protocolo de Kyoto acordaron un segundo período de compromiso de 2013 a 2020. Sin ese compromiso, el mundo no hubiera contado con un acuerdo internacional que limitara las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y, sin límites de emisiones de GEI, las emisiones muy bajas de la energía nucleoelectrica no tendrían ningún valor económico. Las leyes nacionales o regionales que limitan las emisiones (como en la UE) habrían seguido estando vigentes, pero los progresos hacia límites más estrictos y amplios se habrían revertido.

34. El diseño de estrategias energéticas nacionales apropiadas para atender a las necesidades de desarrollo y prestar servicios energéticos modernos sostenibles para todos se está haciendo cada vez más complejo a causa del número creciente de factores que influyen en las decisiones en materia de energía. En primer lugar, en él se deben evaluar exhaustivamente todas las posibles opciones de oferta y demanda de energía en función de las repercusiones sociales, económicas y ambientales. Muchos Estados Miembros, sobre todo los países en desarrollo, carecen de conocimientos especializados y experiencia locales para emprender una tarea y el Organismo ha venido prestando apoyo técnico para ayudar a desarrollar competencia técnica local a fin de colmar ese vacío. En segundo lugar, las fuentes de energía con bajas emisiones de carbono, como la energía nuclear, minimizan los gases de efecto invernadero que se emiten para producir energía y mitigan los efectos negativos de las perturbaciones climáticas en el desarrollo.

35. En el estudio de sus opciones energéticas un número importante de países analizan la posibilidad de utilizar la energía nucleoelectrica. Los factores que contribuyen al interés sostenido en la energía nucleoelectrica son, entre otros, la creciente demanda mundial de energía, así como las preocupaciones por el cambio climático, los precios inestables de los combustibles fósiles y la garantía del abastecimiento de energía.

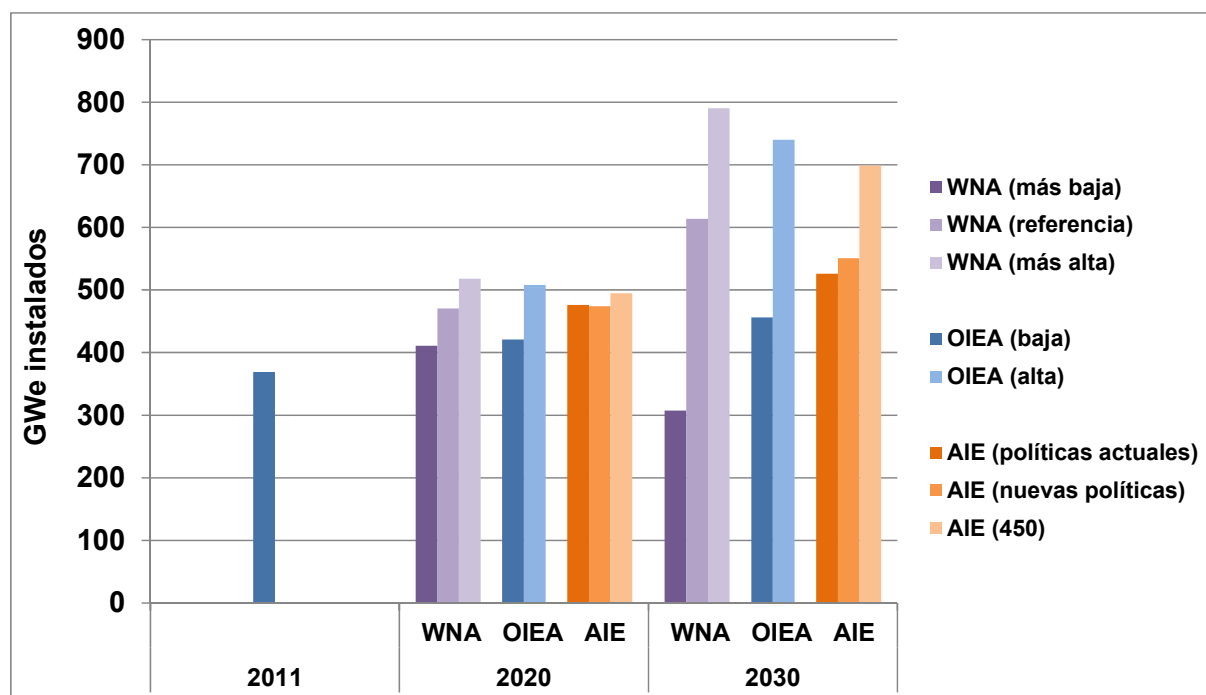


Fig. A-5. Comparación de las proyecciones sobre energía nucleoelectrica del OIEA (azul), el informe *Global Nuclear Fuel Market de 2011* de la Asociación Nuclear Mundial (WNA) (violeta) y la publicación *World Energy Outlook 2012* de la Agencia Internacional de Energía (AIE) (naranja).

36. La Agencia Internacional de Energía (AIE) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) también publica proyecciones del crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica. Según el escenario central planteado en el informe *World Energy Outlook 2012* de la AIE, conocido como Escenario de Nuevas Políticas, la capacidad mundial de generación de energía nuclear llegará a alcanzar unos 550 GW(e) en 2030, lo que representa aproximadamente un 7 % menos que el pronóstico de la AIE de hace un año, y es comparable con la reducción similar observada en la proyección baja del OIEA, si se compara con su edición anterior. En la figura A-5 se comparan las proyecciones de 2012 del Organismo, los escenarios de 2012 de la AIE, y las proyecciones de 2011 de la Asociación Nuclear Mundial (WNA). Los escenarios altos de las tres organizaciones producen resultados semejantes, como lo hacen los escenarios nucleares bajos del OIEA y la AIE.

A.3. Ciclo del combustible³

A.3.1. Recursos y producción de uranio

37. En 2012, el Organismo y la AEN/OCDE publicaron la última edición del “Libro Rojo”, *Uranio 2011: Recursos, producción y demanda*. En él se estimaban los recursos totales de uranio convencionales identificados, recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, en 5,3 millones de toneladas métricas. Esto representa un 1,4 % menos de lo estimado en la edición anterior (publicada en 2010). Además, se estimaban 1,8 toneladas métricas de recursos de uranio convencionales identificados, recuperables a costos que oscilaban entre 130 dólares/kg de U y 260 dólares/kg de U, con lo que los recursos identificados totales, recuperables a un costo inferior a 260 dólares/kg de U, ascendían a 7,1 toneladas métricas. El precio de entrega inmediata del uranio, tras un valor máximo en

³ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del Organismo relativas al ciclo del combustible nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2012>), y en la dirección www.iaea.org/NuclearFuelCycleAndWaste.

dos años registrado a principios de 2011, descendió después del accidente de Fukushima Daiichi y terminó el año en 135 dólares/kg de U. En el segundo semestre de 2012 los precios de entrega inmediata bajaron a cerca de 110 dólares/kg de U por la incertidumbre en torno al programa nuclear del Japón, pero terminaron el año en unos 115 dólares/kg de U. No obstante, los precios a largo plazo del uranio se mantuvieron constantes en unos 158 dólares/kg de U.

38. Los recursos totales no descubiertos (recursos pronosticados y especulativos) indicados en el Libro Rojo ascendían a más de 10,43 toneladas métricas de uranio, lo que supone un ligero ascenso de las 10,40 toneladas métricas notificadas en la edición anterior. Los recursos convencionales no descubiertos se estimaban en más de 6,2 toneladas métricas de uranio a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, más otras 0,46 toneladas métricas de uranio a costos que oscilaban entre 130 y 260 dólares/kg de U. También se estimaban unas 3,7 toneladas métricas de uranio adicionales de recursos especulativos cuyos costos de producción no se habían especificado.

39. En 2011 se informó de la existencia de nuevos recursos en numerosos yacimientos de uranio en África, a saber, Botswana, Malawi, Malí, la República Islámica de Mauritania, Namibia, la República Unida de Tanzania y Zambia, donde las actividades de prospección de uranio siguieron siendo intensas. En la República Unida de Tanzania se está realizando un estudio de viabilidad para el proyecto del río Mkuju. El Comité del Patrimonio Mundial de la UNESCO aprobó un cambio de límites de la Reserva de Selous de Tanzania como medida encaminada a desarrollar el emplazamiento para la producción de uranio del río Mkuju. Con todo, la explotación de la posible mina sigue quedando sujeta a la solicitud de licencia que presente la empresa Uranium One. En 2012 también se notificaron recursos nuevos o adicionales con respecto a Colombia, Guyana, el Paraguay, el Perú y Suecia.

40. Los recursos de uranio no convencionales y el torio amplían aún más la base de recursos. Los recursos no convencionales comprenden el uranio potencialmente recuperable asociado a los fosfatos, los minerales no ferrosos, la carbonatita, el esquisto negro y el lignito, recursos de los que el uranio solo se puede recuperar como producto secundario de poca importancia, así como el uranio presente en el agua de mar. Actualmente muy pocos países notifican sus recursos no convencionales de uranio. Las actuales estimaciones de uranio posiblemente recuperable están en el orden de 8 toneladas métricas. Uranium Equities anunció que su planta de demostración portátil para la recuperación de uranio a base de ácido fosfórico mediante una técnica de intercambio de iones (Proceso PhosEnergy) comenzó la etapa de ensayos en junio de 2012. En septiembre de 2012 se anunció que las operaciones de ensayo resultaron satisfactorias al recuperarse en el proceso más del 90 % del uranio. Se ha encargado un estudio técnico del Proceso PhosEnergy.

41. El Gobierno de Finlandia concedió una licencia en marzo de 2012 para la extracción de uranio como producto secundario de la mina de níquel de Talvivaara administrada por la Talvivaara Mining Company en Sotkarmo (Finlandia oriental) (Fig. A-6). Todavía se requiere un permiso ambiental del Organismo Administrativo Estatal de la Región de Finlandia Septentrional y una autorización de puesta en marcha del Organismo de Seguridad Radiológica y Nuclear para iniciar la producción de uranio. Cameco Corporation está prestando asistencia técnica al proyecto de Talvivaara en el diseño, construcción, puesta en servicio y funcionamiento del circuito de extracción de uranio. Los recursos no convencionales se cifran en 22 000 toneladas de uranio.



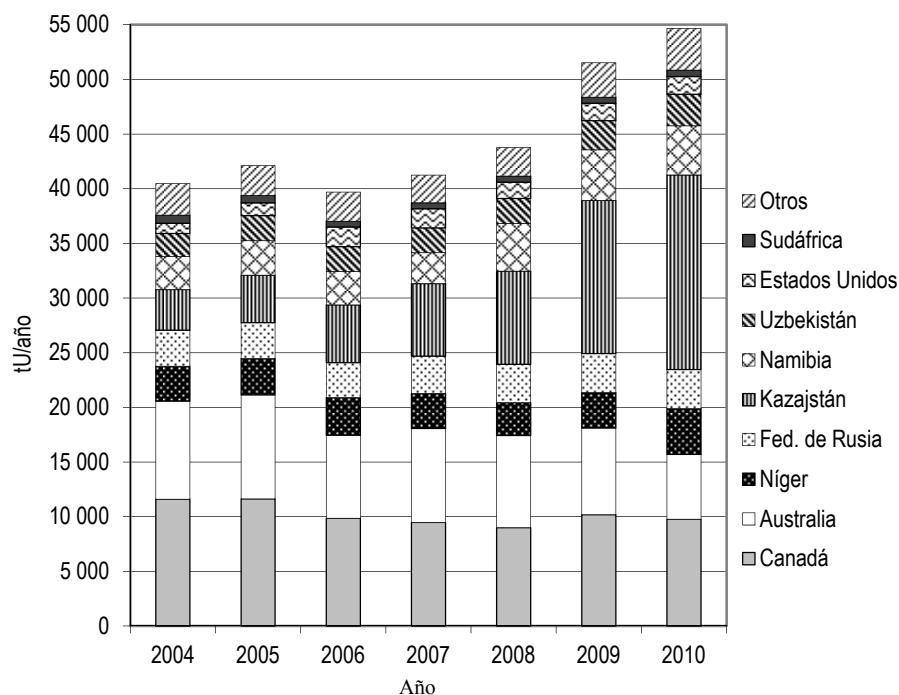
Fig. A-6. Proyecto de producción de uranio de Talvivaara (Finlandia).

42. Los recursos mundiales de torio se estiman en unos seis a siete millones de toneladas. Aunque el torio se ha utilizado como combustible a escala de demostración, aún se requieren trabajos mucho más exhaustivos para poderlo considerar en pie de igualdad con el uranio. En el Canadá, Candu Energy firmó un acuerdo con tres subsidiarias de la Corporación Nuclear Nacional de China (CNNC) en agosto de 2012 con miras a ampliar su cooperación en la explotación de torio y uranio reciclado como combustibles sustitutivos para los nuevos reactores CANDU. El acuerdo marca la tercera fase de cooperación entre el Canadá y China, que comenzó en 2008.

43. El agua de mar se ha investigado intensamente como fuente no convencional de uranio. En los Estados Unidos, el Laboratorio Nacional de Oak Ridge informó de la fabricación de nuevos materiales adsorbentes. Esteras hechas de fibras “HiCap”, que tienen una gran superficie, se someten a irradiación y luego se hacen reaccionar con compuestos químicos que tienen afinidad para el uranio. Las fibras mostraron una capacidad de adsorción cinco veces más alta, una absorción más rápida y mayor selectividad. Científicos de la Universidad de Alabama están experimentando con el uso de fibras basándose en la quitina: un biopolímero de cadena larga que puede obtenerse del caparazón de los camarones.

44. En el Libro Rojo se incluyen datos sobre gastos en prospección y explotación de minas a escala mundial hasta 2010, inclusive. Tales gastos ascendieron a un total de 2 076 millones de dólares en 2010, lo que supuso un incremento del 22 % con respecto a las cifras de 2008 que figuran en la anterior edición del Libro Rojo.

45. La producción de uranio en 2010, que es el año más reciente sobre el que se da información en el Libro Rojo, era de 54 670 t U (Fig. A-7). Australia, el Canadá y Kazajstán representaron el 62 % de esa producción. Estos tres países, junto con los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Namibia, el Níger y Uzbekistán, representaron el 92 % de la producción. La WNA estima que la producción ascendió a 54 610 t U en 2011 y 52 222 t U en 2012.



Nota: Los valores correspondientes a la India, Namibia, el Pakistán y Rumania son aproximados.

Fig. A-7. Producción mundial reciente de uranio (Fuente: Uranio 2011: Recursos, Producción y Demanda).

46. La lixiviación in situ⁴ superó a la minería subterránea como método principal de producción en 2009 y se espera que en el futuro siga aumentando la producción por lixiviación in situ en los totales mundiales. En 2012 se efectuaron ampliaciones en varias minas de producción por lixiviación in situ en Kazajistán, que han acrecentado la producción en el país aproximadamente en 2 250 t U anuales.

47. Solo unas cuantas minas de uranio han comenzado su fase de producción en los últimos años (por ejemplo, en Australia en 2011 y en el Níger en 2010). Desde 2010 se encuentra en construcción un centro de producción por lixiviación in situ en Khiagda (Federación de Rusia). La infraestructura ferroviaria ha sido modernizada, y se han terminado una nueva planta de procesamiento e instalaciones de producción de ácido sulfúrico. El centro debería ser capaz de producir 1 800 t U anuales a más tardar en 2018. En Namibia, la etapa 3 de ampliación de la mina Langer Heinrich de Paladin Energy Ltd. terminó en 2012 para aumentar la producción anual hasta 2 000 t U. La etapa 4 de ampliación incrementará aún más la producción anual hasta 3 900 t U. Dadas las actuales condiciones del mercado, Areva ha suspendido su explotación de la mina de Trekkopje en Namibia.

48. En Australia, el gobierno de la provincia levantó en octubre de 2012 una prohibición que impedía la extracción de uranio en Queensland desde 1982, cuando la mina Mary Kathleen cesó la producción. En Australia meridional, Quasar Resources anunció que comenzará en 2013 operaciones de extracción por lixiviación in situ en los yacimientos del este y oeste de Four Mile. En agosto de 2012, BHP Billiton anunció que investigaría un diseño alternativo menos intensivo en capital de la ampliación de la mina a cielo abierto de Olympic Dam a fin de mejorar los aspectos económicos del proyecto. Como resultado de ello, la empresa no pudo aprobar una ampliación de la mina de Olympic Dam antes del plazo del 15 de diciembre de 2012 fijado en el acuerdo de contrato. En Australia occidental, la mina de uranio de Wiluna de Toro Energy recibió la aprobación ambiental final del gobierno estatal.

⁴ En la minería convencional, o subterránea, la mena se extrae del suelo y, a continuación, se procesa para obtener los minerales que se buscan. En la lixiviación in situ la mena se deja donde está en el suelo y los minerales se extraen de ella disolviéndolos mediante una solución de lixiviación, que es bombeada a la superficie, donde los minerales podrán ser extraídos de la solución. En consecuencia, la alteración de la superficie es limitada y no se generan colas ni rocas estériles.

49. En el Canadá, AREVA Resources recibió en agosto de 2012 la aprobación ambiental para su proyecto del yacimiento de la región central. Este proyecto supone la explotación de una mina a cielo abierto, la construcción de un camino de acarreo que enlace la obra de la región central con las actuales operaciones del lago McClean y el aumento de la capacidad de producción de la planta de tratamiento de JEB del lago McLean para que se adapte a la tasa prevista de tratamiento de mineral de la región central.

50. En los Estados Unidos comenzaron en agosto de 2012 las obras de construcción para las operaciones de lixiviación in situ de Nichols Ranch, de la Uranerz Energy Corporation de Wyoming. La Uranerz anunció en noviembre de 2012 que ya poseía todos los permisos y licencias reglamentarios necesarios para construir y explotar la mina de Nichols Ranch. En octubre de 2012 se recibió la aprobación reglamentaria final para el proyecto de producción de uranio de Lost Creek de la Uranerz Energy Corporation. Esta empresa también obtuvo todos los permisos necesarios para proceder a establecer su proyecto de producción de uranio por lixiviación in situ de Goliad, en el sur de Texas. No obstante, todavía se requiere una exención de acuífero⁵ para iniciar las actividades de recuperación de uranio.

51. Se estima que la producción de uranio en 2012 solo fue suficiente para satisfacer un 77 % del consumo estimado de 67 990 toneladas de uranio de los reactores⁶. Para el resto se utilizaron cinco fuentes secundarias: las reservas militares 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 procedente de combustible gastado reprocesado, y el nuevo enriquecimiento de colas de uranio empobrecido. Al ritmo de consumo calculado para 2012, la vida útil de 5,3 toneladas métricas de uranio sería de 78 años, lo que se compara favorablemente con la reserva de otros productos básicos (p.ej., cobre, zinc, petróleo y gas natural), que es de 30 a 50 años.

A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible

52. Seis países (Canadá, China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Francia y Reino Unido) tienen en funcionamiento plantas de conversión a escala comercial de octóxido de triuranio (U_3O_8) a hexafluoruro de uranio (UF_6), y en la Argentina, el Brasil, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán, se encuentran en funcionamiento instalaciones de conversión en pequeña escala. El proceso de volatilización en seco con fluoruros se utiliza únicamente en los Estados Unidos de América, mientras que todos los demás países que realizan actividades de conversión utilizan un proceso en húmedo. La capacidad de conversión mundial total se mantuvo estable en unas 76 000 toneladas de uranio natural (t U en forma de UF_6) anuales. Sin embargo, se esperan cambios importantes a este respecto en Francia (Comurhex II de AREVA (Fig.A-8)) y los Estados Unidos de América (la planta Metropolis Works de Honeywell). La demanda total actual de servicios de conversión (suponiendo una concentración de las colas de enriquecimiento⁷ del 0,25 % de uranio-235) es del orden de 60 000 a 64 000 toneladas anuales. Se prevé que en 2018 comience la construcción de una instalación de conversión en Kazajstán, una empresa conjunta de Kazatomprom y Cameco del Canadá, la instalación de conversión Ulba. Esa instalación compartirá ubicación con la planta metalúrgica Ulba en Ust-Kamenogorsk. La capacidad de producción prevista es de unas 12 000 t UF_6 anuales.

⁵ Un componente importante de la Ley de Agua Potable Segura es la facultad legal para extraer minerales por lixiviación in situ en partes de estratos geológicos que también comparten suministros de agua potable. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos debe emitir una exención para cada explotación minera antes de realizarse cualquier recuperación por lixiviación in situ.

⁶ World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements, abril de 2012 (<http://www.worldnuclear.org/info/reactors0412.html>). Consultado el 7 de mayo de 2012.

⁷ La concentración de las colas, o la concentración de U 235 en la parte empobrecida, determina indirectamente la cantidad de operaciones a las que se debe someter una cantidad determinada de uranio a fin de obtener una concentración dada del producto. Un incremento de la concentración de las colas relacionado con una cantidad fija y una concentración fija de uranio enriquecido reduce la cantidad de enriquecimiento requerida, pero incrementa las necesidades de conversión y de uranio natural, y viceversa. Las concentraciones de las colas pueden variar ampliamente y alterarán la demanda de servicios de enriquecimiento.



Fig. A-8. COMURHEX II Instalación de conversión que se está construyendo en Francia. La puesta en servicio gradual está prevista para 2013-2014

53. La capacidad de enriquecimiento mundial total es actualmente de unos 65 millones de unidades de trabajo de separación (UTS) anuales, frente a una demanda total de aproximadamente 45 millones de UTS anuales. Hay plantas de conversión a escala comercial en funcionamiento en China (CNNC), los Estados Unidos de América (USEC y el grupo URENCO), la Federación de Rusia (Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom”) y Francia (AREVA). El grupo URENCO tiene plantas de centrifugación en funcionamiento en Alemania, los Estados Unidos de América, los Países Bajos y el Reino Unido (Fig. A-9). Hay también instalaciones de enriquecimiento en pequeña escala en Argentina, Brasil, India, Japón, Pakistán y República Islámica del Irán.



Fig. A-9. URENCO Instalación de enriquecimiento en Capenhurst, Reino Unido,

54. Se encuentra en marcha la labor de desarrollo de dos nuevas instalaciones de enriquecimiento por centrifugación a escala comercial, ambas en los Estados Unidos de América, a saber: la instalación Eagle Rock de AREVA y la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América. En septiembre de 2012 se expidió la licencia de construcción de una instalación de enriquecimiento por láser en gran escala en Carolina del Norte, Estados Unidos de América, que sería construida por GE-Hitachi, empresa subsidiaria de Global Laser Enrichment. Se prevé que la planta tenga capacidad para producir seis millones de UTS anuales y para enriquecer uranio hasta el 8 % de uranio-235 en peso.

55. La Argentina está reconstruyendo su capacidad de difusión gaseosa en Pilcaniyeu. Actualmente, los servicios de enriquecimiento se importan de los Estados Unidos de América.

56. En Francia, la planta de enriquecimiento por difusión Georges Besse de EURODIF, que estaba en funcionamiento desde 1979, cerró en junio de 2012. Esta planta ha sido sustituida por Georges Besse II, en la misma ubicación pero con una estructura de propiedad diferente. Actualmente tiene una capacidad instalada de unos 1,5 millones de UTS anuales con un aumento previsto hasta 7,5 millones de UTS para 2016. AREVA es el principal accionista en ambas operaciones.

57. La Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) comenzó la explotación comercial de las cascadas de centrifugadoras mejoradas de Rokkasho, prefectura de Aomori, en marzo de 2012. Se está debatiendo el aumento previsto de la capacidad actual de 150 000 a 1,5 millones de UTS anuales y la construcción de una nueva planta de enriquecimiento en el Japón que utilizará tecnología de centrifugación rusa en el marco de un acuerdo concertado entre Rosatom y Toshiba.

58. La capacidad total mundial de reconversión⁸ en 2012 se ha mantenido en unas 60 000 t UF₆ anuales.

59. En los Estados Unidos de América, la NRC expidió una licencia en octubre de 2012 a International Isotopes Fluorine Products para la construcción y explotación de una instalación de desconversión de uranio empobrecido in Nuevo México. La instalación, que se denominará Planta de extracción de flúor y desconversión de uranio empobrecido, utilizará el proceso de extracción de flúor patentado por la empresa.

60. La demanda anual de servicios de fabricación de combustible para el reactor de agua ligera (LWR) siguió siendo de unas 7 000 toneladas de uranio enriquecido en conjuntos combustibles, pero se prevé que aumentará a unas 8 000 t U anuales en 2015. En el caso de los PHWR, la demanda fue de 3 000 t U anuales. Ahora hay varios suministradores compitiendo por la mayoría de combustibles. La capacidad mundial total de fabricación de combustible se mantuvo en unas 13 500 t U anuales (uranio enriquecido en elementos combustibles y haces de combustible) en el caso del combustible para el LWR y en unas 4 000 t U anuales (uranio natural en elementos combustibles y haces de combustible) en el caso del combustible para PHWR. En el caso del combustible de uranio natural para PHWR, el uranio se purifica y se convierte en óxido de uranio (UO₂) en la Argentina, el Canadá, China, la India y Rumania.

61. En China, la capacidad de producción de la planta de combustible de la CNNC en Yibin fue de aproximadamente 600 t U anuales en 2012. En cuanto a la planta de la CNNC en Baotou, en el interior de Mongolia, que fabrica conjuntos combustibles para los PHWR de CANDU en Qinshan (200 t U anuales), su capacidad de combustible se está aumentando a 400 t U anuales. Se está estableciendo una nueva planta en Baotou con objeto de fabricar combustible para los reactores AP1000 de China. Además, en 2012, la Compañía Estatal Nuclear de Circonio y Hafnio WEC (SNZWH) comenzó a poner en servicio una nueva instalación de producción de esponjas de circonio en Nantong, China. La nueva planta producirá el circonio de pureza nuclear utilizado en la fabricación de tubos para conjuntos de combustible nuclear, y proveerá tanto al mercado chino por conducto de SNWHZ como al mercado mundial por conducto de Westinghouse.

62. La instalación de fabricación de combustible proyectada en Kazajstán, cuya finalización está prevista para 2014, es una empresa conjunta de AREVA y Kazatomprom y tiene una capacidad prevista de 1 200 t U anuales.

63. En Ucrania, cerca de Smoline, ha comenzado la construcción de una planta de combustible para WWER-1000, con una capacidad prevista de 400 t U anuales en 2015. La Compañía de combustible TVEL construirá la instalación como empresa conjunta con la Federación de Rusia y Ucrania, teniendo este último país el 51 % de las acciones.

64. Las operaciones de reciclado proporcionan una fuente secundaria de suministro de combustibles nucleares mediante el uso de uranio reprocesado y combustible de MOX. En Elektrostal, Federación de Rusia, se producen actualmente unas 100 t anuales de uranio reprocesado para AREVA. Una línea de producción de la planta de AREVA en Romans, Francia, fabrica aproximadamente 80 t HM

⁸ Para fabricar combustible de uranio enriquecido, el UF₆ enriquecido ha de reconvertirse en polvo de UO₂. Es la primera etapa de la fabricación de combustible enriquecido. Se denomina reconversión o desconversión.

anuales de uranio reprocesado para LWR en Francia. La capacidad mundial de fabricación de combustible de MOX es actualmente de unas 250 t de metal pesado; 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.

65. La India y la Federación de Rusia fabrican combustible de MOX para su utilización en reactores rápidos. En la Federación de Rusia está en construcción una instalación de fabricación de combustible para el reactor rápido BN-800 en Zheleznogorsk (Krasnoyarsk-26). La Federación de Rusia también tiene instalaciones piloto en el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos de Dimitrovgrad, y en la planta Mayak, en Ozersk.

66. En otros lugares, se fabrica combustible de MOX para su utilización en LWR. En el Reino Unido, se redujo la producción de la instalación de MOX de Sellafield de 128 a 40 t HM anuales y, en agosto de 2011, la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares anunció que había reevaluado las perspectivas de la planta y que la cerraría. En los Estados Unidos de América se están construyendo más instalaciones de fabricación de combustible de MOX con miras a utilizar el excedente de plutonio apto para armas. A escala mundial, aproximadamente 30 LWR utilizan en la actualidad combustible de MOX.

Garantía de suministro

67. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores aprobó la creación de un banco de uranio poco enriquecido del OIEA. En 2012 la Secretaría del Organismo prosiguió la labor relativa a las disposiciones administrativas, financieras, jurídicas y técnicas y las evaluaciones de emplazamientos para establecer el banco. Estará ubicado en la Planta Metalúrgica de Ulba en Kazajstán. Para el establecimiento del banco de UPE se han recibido promesas de contribuciones por más de 150 millones de dólares de los Estados Miembros, la UE y la Nuclear Threat Initiative (NTI). A fines de 2012 se habían pagado íntegramente las cantidades prometidas por Noruega (5 millones de dólares), los Estados Unidos (alrededor de 50 millones de dólares), la NTI (50 millones de dólares) y Kuwait (10 millones de dólares); la UE había pagado 20 de los 25 millones de euros prometidos y se estaban finalizando acuerdos con los Emiratos Árabes Unidos (10 millones de dólares).⁹

A.3.3. Parte final del ciclo del combustible nuclear

Combustible nuclear gastado y reprocesamiento de combustible nuclear

68. Se están utilizando dos estrategias de gestión distintas en relación con el combustible nuclear gastado. La primera consiste en reprocesar el combustible gastado (uranio y plutonio) para fabricar nuevo combustible. La segunda consiste en considerar el combustible gastado como un desecho y almacenarlo en espera de su disposición final. Actualmente, países como China, la Federación de Rusia, Francia y la India reprocesan la mayor parte de su combustible gastado, mientras que otros, como el Canadá, Finlandia y Suecia han optado por su disposición final directa. La mayoría de los países no ha decidido aún qué estrategia adoptar. En la actualidad almacenan el combustible gastado y se mantienen al día de la evolución de ambas alternativas.

69. Entre los acontecimientos notables de 2012, que se expondrán sucintamente en los párrafos siguientes, cabe mencionar la solicitud de Posiva en Finlandia para obtener una licencia de construcción de un repositorio, la suspensión por el Canadá de su solicitud de comunidades interesadas en la selección de emplazamientos candidatos para el Repositorio de Combustible Nuclear Gastado y Centro de Competencia porque precisaba tiempo para responder debidamente a las 21 expresiones de

⁹ En la edición de 2012 del Examen de la tecnología nuclear se describen otros mecanismos de garantía de suministro de combustible nuclear actualmente en vigor.

interés ya presentadas, y un informe de la Comisión del Lazo Azul sobre el Futuro Nuclear de los Estados Unidos de América que recomendó, entre otras cosas, un nuevo enfoque basado en el consentimiento para seleccionar el emplazamiento de las instalaciones de gestión de desechos nucleares del país y la creación de una nueva organización dedicada exclusivamente a la aplicación del programa de gestión de desechos. La aplicación de las recomendaciones de la Comisión requerirá la introducción de cambios importantes en la legislación de los Estados Unidos que regula los desechos nucleares.

70. En 2012 se descargaron como combustible gastado de todos los reactores nucleares de potencia unas 10 000 t HM. La cantidad total acumulada de combustible gastado que se había descargado en todo el mundo hasta diciembre de 2012 era de unas 360 500 t HM, de las cuales unas 250 700 t HM se encuentran almacenadas en instalaciones de almacenamiento situadas en el emplazamiento del reactor o fuera del mismo. Menos de un tercio de la cantidad acumulada de combustible gastado descargado en todo el mundo, unas 109 800 t HM, ya ha sido reprocesada. En 2012, la capacidad mundial de reprocesamiento comercial, concentrada en cuatro países (Federación de Rusia, Francia, India y Reino Unido), era de unas 4 800 t HM anuales.

71. En diciembre, Villar de Cañas fue seleccionado oficialmente como emplazamiento para acoger una instalación de almacenamiento del combustible nuclear gastado de España (Fig. A-10). El emplazamiento se consideró adecuado en cuanto a geología, sismología, meteorología, hidrología, geometría del emplazamiento y riesgo en relación con los centros de población locales. La instalación aceptará cofres de transporte de conjuntos de combustible nuclear usado o desechos vitrificados que están actualmente almacenados en cada una de las centrales nucleares, y desechos vitrificados provenientes de la central nuclear de Vandellós, actualmente almacenados en Francia.



Fig. A-10. Visualización de la instalación de almacenamiento de combustible gastado que se construirá en Villar de Cañas.

72. En la India prosiguen los trabajos de construcción de la instalación del ciclo del combustible para reactores rápidos, de Kalpakkam. La fabricación de agujas de combustible de MOX para el próximo prototipo de reactor reproductor rápido se está llevando a cabo actualmente en la instalación de fabricación de combustibles avanzados del Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas en Tarapur.

73. En el Japón, en septiembre de 2012, la JNFL anunció que procedería a construir la planta de reprocesamiento comercial de 800 t HM anuales en Rokkasho, que se suspendió como consecuencia del terremoto y el tsunami del 11 de marzo de 2011. Está previsto que la construcción finalice en octubre de 2013.

74. En la República de Corea, el Instituto de Investigaciones de Energía Atómica de Corea finalizó la construcción de la instalación integrada de demostración inactiva de piroprocesamiento en julio de 2012 como parte de una instalación de demostración a escala industrial para el piroprocesamiento¹⁰ de combustible gastado de mezcla de óxidos. Los ensayos de puesta en funcionamiento de esa instalación comenzaron en agosto de 2012 y ahora se están realizando las pruebas operacionales y de funcionamiento de los sistemas de operaciones y servicios que, según lo previsto, concluirán a principios de 2013.

75. En el Reino Unido, se prevé que los contratos existentes de reprocesamiento de la planta de reprocesamiento de óxido térmico (THORP) en Sellafield se habrán completado en 2018. La Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares ha confirmado que posteriormente la planta se cerrará para su clausura en lugar de llevar a cabo el desarrollo de la infraestructura necesario para ampliar su vida útil.

Gestión de desechos radiactivos

76. Los desechos radiactivos se derivan del uso de las tecnologías nucleares para la producción de energía, las actividades de investigación y las aplicaciones médicas e industriales, así como de su uso en actividades militares pasadas y presentes. Para la gestión segura de los desechos radiactivos se requiere una capacidad de almacenamiento adecuada y, en última instancia, la disposición final. En todo el mundo hay instalaciones de disposición final en funcionamiento o en construcción para todas las categorías de desechos radiactivos. En diciembre de 2012 había en todo el mundo 464 instalaciones de almacenamiento y 154 instalaciones de disposición final de desechos en funcionamiento¹¹ (Fig. A-11).



Fig. A-11. Instalación de almacenamiento de desechos de actividad intermedia HABOG, Países Bajos.

Estimaciones del inventario mundial

77. El inventario mundial de desechos radiactivos declarados como desechos almacenados en 2011 (el año más reciente disponible) fue de unos 68 millones de metros cúbicos¹² (cuadro A-2). La cantidad acumulada de desechos radiactivos sometidos a disposición final hasta 2011 fue de cerca de 76 millones de metros cúbicos, que incluyen la inyección en pozos profundos de unos 29 millones de metros cúbicos de desechos líquidos, y la disposición final de cerca de 4 000 metros cúbicos de desechos sólidos de actividad alta (HLW), provenientes principalmente de Chernóbil. La acumulación anual de HLW procesados es bastante constante, con una tasa media de unos 850 metros cúbicos anuales en todo el mundo (excluido el combustible gastado).

¹⁰ Piroprocesamiento hace referencia a los métodos no acuosos de reprocesamiento del combustible nuclear, que permiten extraer los materiales y refinarlos sin H₂O a temperaturas elevadas.

¹¹ Según información facilitada por los Estados Miembros a la Base de datos sobre gestión de desechos en Internet (NEWMDB) del OIEA, accesible en línea en <http://newmdb.iaea.org/>.

¹² Estimación hecha con la NEWMDB del OIEA y otras fuentes para los países que no envían notificaciones a la NEWMDB.

Cuadro A-2. Estimación global del inventario de desechos radiactivos correspondiente a 2011 (datos más recientes)¹³

Clase de desechos	Almacenamiento ¹⁴ [metros cúbicos]	Disposición final acumulada [metros cúbicos]
<i>Desechos de actividad muy baja (VLLW)</i>	153 000¹⁵	113 000
<i>Desechos de actividad baja (LLW)</i>	56 663 000¹⁶	64 792 000¹⁷
<i>Desechos de actividad intermedia (ILW)</i>	8 723 000	10 587 000
<i>Desechos de actividad alta (HLW)</i>	2 743 000	72 000¹⁸

Fuentes: NEWMDB (2012), informes nacionales oficiales, y datos puestos a disposición del público.

Novedades a nivel nacional en material de opciones de disposición final

78. Se han construido numerosas instalaciones de disposición final de desechos de actividad muy baja, baja e intermedia, que se encuentran actualmente en funcionamiento, y está previsto que en un futuro próximo se inicie la construcción de algunas instalaciones de disposición final de combustible nuclear gastado. Entre las instalaciones de disposición final de desechos en funcionamiento cabe citar las instalaciones de disposición final en zanjas de VLLW (p.ej., en España, Francia y Suecia) o de LLW en zonas áridas (p.ej., en Argentina, Estados Unidos de América, India y Sudáfrica); las instalaciones construidas cerca de la superficie para LLW (p.ej., en China, Eslovaquia, España,

¹³ Las cifras del cuadro A-2 son estimaciones y no un recuento exacto de las cantidades de desechos radiactivos que actualmente se gestionan a escala mundial. Además, hay diferencias inherentes en las cantidades de material almacenado de un año a otro debido a los siguientes factores: a) cambios de masa y volumen durante el proceso de gestión de los desechos; b) cambios en la notificación y cambios o correcciones efectuados por los Estados Miembros en sus propios datos; y c) incorporación de nuevos Estados Miembros a la base de datos.

¹⁴ Normalmente los desechos se someten a tratamiento y acondicionamiento y pasan por varias fases de manipulación durante su almacenamiento y antes de su disposición final. Por consiguiente, la masa y el volumen de los desechos radiactivos cambian constantemente durante el proceso de gestión previa a la disposición final. Esto puede dar lugar a discrepancias en las estimaciones de las cantidades almacenadas de un año a otro.

¹⁵ La estimación de los VLLW es mucho más baja que la de los LLW porque muchos Estados Miembros con inventarios significativos de desechos no definen los VLLW como clase de desechos. Ahora bien, muchos de estos Estados Miembros están reconsiderando actualmente sus definiciones de las clases de desechos a fin de ajustarlas más a las recomendadas en la publicación titulada *Classification of Radioactive Waste* (Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSG-1, 2009), por lo que es probable que esta estimación sea más alta en el futuro, con la correspondiente disminución en la categoría de los LLW.

¹⁶ La estimación de los LLW almacenados no incluye alrededor de 4×10^8 m³ de LLW líquidos que, según se ha notificado, se encuentran en depósitos especiales no aislados del entorno circundante, ya que este caso no se ajusta a la definición del Organismo de "almacenamiento" contenida en el *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA* (2007). Por esta razón, la inclusión de esos desechos en esta estimación todavía no es segura.

¹⁷ El cambio significativo en la estimación de la disposición final acumulada de los LLW y los ILW en comparación con el informe anterior se debe a la inclusión de estimaciones de la Federación de Rusia.

¹⁸ Este volumen de desechos de actividad alta es una combinación de los desechos líquidos objeto de disposición final, notificados por la Federación de Rusia, y los cerca de 4 000 m³ de desechos radiactivos sólidos notificados por Ucrania y considerados provisionalmente como sometidos a disposición final hasta que se encuentre un diseño/lugar o solución más permanente. La disposición final de los HLW de Ucrania fue resultado de las actividades de descontaminación de emergencia llevadas a cabo tras el accidente en la unidad 4 de la central nuclear de Chernóbil.

Francia, India, Japón, Reino Unido, República Checa y Ucrania); las instalaciones construidas en la subsuperficie para los desechos de actividad baja e intermedia (LILW) (p.ej., en Finlandia y Suecia); las actividades de disposición final en pozos barrenados de LLW realizadas en Estados Unidos de América; y las instalaciones de disposición final geológica de LILW (p.ej., en Alemania y Estados Unidos de América). Las opciones para la disposición final de los desechos de materiales radiactivos naturales varían según los reglamentos nacionales y abarcan desde las instalaciones de disposición final en zanjas hasta las instalaciones construidas en la subsuperficie (p.ej., en Noruega).

79. Las opciones para la disposición final de las fuentes radiactivas selladas en desuso comprenden la disposición final junto con otros desechos en instalaciones apropiadas, o la disposición final en pozos barrenados especiales, opción que se viene examinando en varios países, entre ellos, Filipinas, Ghana, Malasia y Sudáfrica.

80. Se han adoptado medidas encaminadas a la concesión de licencias a instalaciones de disposición final geológica de HLW y/o combustible gastado en Finlandia, Francia y Suecia.

81. En Bélgica, la justificación de la seguridad tecnológica elaborada por el Organismo Nacional de Desechos Radiactivos y Materiales Fisionables Enriquecidos (ONDRAF/NIRAS) en relación con la instalación de disposición final cerca de la superficie prevista en Dessel, fue el tema de estudio de un examen internacional por homólogos organizado por la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la OCDE; las conclusiones del examen, publicadas en septiembre de 2012, fueron en general positivas.

82. En el Canadá se están examinando tres instalaciones de disposición final geológica: la instalación en el emplazamiento de Bruce para LLW e ILW de Ontario Power Generation, el emplazamiento de los laboratorios de Chalk River actualmente en estudio para LLW e ILW, y un tercer emplazamiento, aún no definido, para el Repositorio de Combustible Nuclear Gastado y Centro de Competencia del Canadá. Los trabajos de ingeniería y diseño de la instalación de Bruce se encuentran parcialmente finalizados. Atomic Energy of Canada Limited está investigando la idoneidad del emplazamiento de los laboratorios de Chalk River. En cuanto al tercer emplazamiento, la fase para la presentación de “expresiones de interés” por parte de las comunidades que desean participar en el proceso de selección del emplazamiento del Repositorio de Combustible Nuclear Gastado y Centro de Competencia del Canadá, fue suspendida por la Sociedad de Gestión de Desechos Nucleares de este país el 30 de septiembre de 2012, a fin de centrar los esfuerzos en la realización de los estudios detallados requeridos en las comunidades que ya habían presentado oficialmente en esa fecha o antes sus expresiones de interés.

83. Los planes de China a mediano plazo en cuanto a la gestión de sus LILW consisten en contar con cinco instalaciones regionales de disposición final en funcionamiento hasta 2020, con una capacidad total de disposición final de alrededor de 1 000 000 m³. Dos de ellas, situadas cerca de Yumen en la provincia noroccidental de Gansu y cerca de la central nuclear de Daya Bay, en la provincia meridional de Guangdong, están en funcionamiento y es posible que sus capacidades, que actualmente ascienden a 20 000 m³ y 80 000 m³, respectivamente, aumenten en el futuro a 200 000 m³ y 240 000 m³. La tercera instalación, situada en China sudoccidental, se encuentra en construcción. Los trabajos relacionados con las otras dos instalaciones, en China septentrional y oriental, aún no se han iniciado.

84. En Finlandia, Posiva está avanzando en la construcción de la instalación subterránea de investigación ONKALO. En diciembre, Posiva presentó al Gobierno de Finlandia una solicitud de licencia de construcción del repositorio para el emplazamiento de Olkiluoto con la intención de iniciar las actividades de disposición final en 2020.

85. En Francia, la Agencia Nacional de Gestión de Desechos Radiactivos (ANDRA) está preparando la fase industrial de su proyecto de disposición final reversible de ILW y HLW, el proyecto Cigéo, que

se pondrá en servicio en 2025, y ha iniciado un estudio de viabilidad y un proceso formalizado de participación del público interesado, antes de presentar la solicitud de licencia. La ANDRA también ha publicado la edición de 2012 del inventario nacional de desechos radiactivos, comprendidas las características, el volumen y la ubicación de los desechos existentes a nivel nacional.

86. En Alemania, el Gobierno anunció en noviembre de 2012 que todos los trabajos exploratorios y de reconocimiento que se estaban realizando en la instalación provisional de almacenamiento de desechos nucleares de Gorleben con miras a convertirla en una instalación permanente se suspenderían hasta que se tomara una decisión política respecto del camino a seguir en relación con Gorleben, a saber, proseguir los trabajos exploratorios, aplicar una moratoria o cerrar la instalación.

87. En la instalación de disposición final en Bátaapáti (Hungria), diseñada para recibir 40 000 m³ de LILW provenientes de las operaciones de las centrales nucleares, se han concluido los trabajos de construcción de las rampas de acceso inclinadas que conducen al repositorio (Fig. A-12), a los túneles de servicio, así como a las dos primeras cámaras de disposición final. En la ceremonia de apertura en diciembre se colocó en la instalación, para su disposición final, el primer bulto de desechos con nueve bidones de desechos revestidos de hormigón (Fig. A-13). El concepto de operaciones prevé la construcción paralela de más cámaras de disposición final y, entretanto, los desechos se colocan en las cámaras existentes.



Fig. A-12. Rampa de acceso a la instalación nacional de disposición final de desechos radiactivos en Bátaapáti (Hungria).



Fig. A-13. Colocación del primer bulto de desechos en la instalación de Bátaapáti (Hungria), para su disposición final.

88. En la República de Corea, la conclusión de los trabajos de construcción de la instalación de disposición final de Gyeongju, diseñada para la disposición final de 100 000 bidones de LILW en silos, está prevista actualmente para junio de 2014.

89. La Agencia de Gestión de Desechos Radiactivos de Lituania ha finalizado las investigaciones del emplazamiento y está examinando las opciones de diseño de la instalación de disposición final cerca de la superficie que se tiene previsto construir con una capacidad de disposición final de unos 100 000 m³ de LILW de período corto.

90. En la Federación de Rusia, el Gobierno aprobó tres documentos fundamentales sobre gestión de desechos radiactivos para apoyar las actividades en la esfera de la energía nuclear, los trabajos de limpieza, la restauración de emplazamientos contaminados y la extracción y el tratamiento de minerales y materiales orgánicos con un alto contenido de radionucleidos naturales. También se han iniciado las actividades relacionadas con la creación de instalaciones de disposición final de desechos radiactivos. Se encuentra en marcha la labor de desarrollo del diseño relacionada con la creación de un laboratorio subterráneo en el macizo granitoide de Nizhnekanskiy (a 500 m de profundidad), en la región de Krasnoyarsk, Siberia. En el laboratorio se estudiará la posibilidad de someter a disposición final en el emplazamiento desechos de actividad alta e intermedia de período largo. Está previsto que la instalación de disposición final inicie operaciones en 2021. Además, se han realizado trabajos de diseño preliminares (estudios geológicos y de ingeniería) en relación con una instalación de disposición final de LLW y de ILW de período corto en el noroccidente de la Federación de Rusia. La primera instalación nacional de almacenamiento en seco a escala comercial fuera del emplazamiento del reactor comenzó a funcionar en 2011, a saber el complejo minero y químico, almacén en seco, fase I, en Zheleznogorsk, Krasnoyarsk.

91. En junio de 2012, un grupo internacional designado por la AEN concluyó positivamente el análisis de la solicitud de licencia para una planta de disposición final geológica y de encapsulamiento en Oskarshamn, presentada por la Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares, que espera que la planta inicie operaciones en 2025.

92. En el marco de un proyecto de reconstrucción financiado por la Comisión Europea, se tiene previsto aumentar en 120 000 m³ la capacidad de la instalación de disposición final de LILW de Ucrania en Buryakovka, construida después del accidente de Chernóbil, que actualmente asciende a unos 700 000 m³.

93. En los Estados Unidos de América, la nueva instalación de disposición final de desechos radiactivos de Andrews County, Texas, comenzó sus operaciones en abril de 2012. Esta instalación recibe LLW procedentes de Texas y Vermont, así como del Gobierno Federal. La instalación de disposición final en zanjas poco profundas comprende dos repositorios adyacentes de diseño similar, uno para los desechos comerciales y otro para los desechos procedentes del Gobierno Federal.

94. Se han llevado a cabo con éxito varias operaciones encaminadas a retirar fuentes radiactivas selladas en desuso de los locales de los usuarios y a someterlas a control, transportándolas ya sea a una instalación nacional de almacenamiento de desechos radiactivos o a otro lugar con las condiciones de almacenamiento adecuadas. Mediante la asistencia directa del Organismo, en Honduras se recuperaron y se transfirieron a la instalación nacional de almacenamiento 125 fuentes radiactivas selladas en desuso, incluido un antiguo irradiador gamma. Asimismo, mediante la asistencia directa del Organismo se recuperaron, descontaminaron, caracterizaron y embalaron en Costa Rica dos irradiadores gamma, que se trasladaron en febrero de 2012 de un búnker contaminado a un lugar de almacenamiento más seguro. En noviembre de 2012 se acondicionaron en Honduras y Costa Rica varias fuentes de braquiterapia en desuso de radio 226 y cesio 137 con el fin de garantizar su almacenamiento a largo plazo en condiciones más seguras. Además, en septiembre de 2012 se concluyeron con éxito, mediante la asistencia directa del Organismo y en cooperación con el Fondo de No Proliferación y Desarme de los Estados Unidos y la Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM), las actividades de repatriación de un irradiador indio del Uruguay, que contenía 15 fuentes radiactivas de actividad alta en desuso.

Desechos radiactivos históricos

95. Se está realizando un número importante de actividades para eliminar el legado nuclear de la guerra fría. Desde hace más de quince años, el Grupo de contacto de expertos para iniciativas internacionales sobre el legado nuclear en la Federación de Rusia (CEG) del Organismo 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. En 2012, uno de sus logros más importantes tuvo lugar en noviembre, cuando se retiró con éxito el combustible de un reactor submarino refrigerado por metal líquido. La Federación de Rusia, con la ayuda importante de los asociados del CEG, ha retirado el combustible y desmantelado la mayor parte de los 200 submarinos nucleares clausurados, y solo quedan cinco por desmantelar. Las unidades de reactor de los submarinos de las que se ha descargado el combustible están siendo precintadas y colocadas en instalaciones de almacenamiento a largo plazo. Se finalizó la construcción de una de esas instalaciones en 2011 en el noroeste de la Federación de Rusia. Otra fue inaugurada en mayo de 2012 en la parte más oriental de la Federación de Rusia y en septiembre recibió su primer compartimento de reactor para su almacenamiento (Fig. A-14). En los Estados Unidos de América se está llevando a cabo un programa similar, en cuyo marco se han desmantelado 114 submarinos y buques nucleares.



Fig. A-14. Desmantelamiento de un submarino nuclear.

96. La gestión y retirada en condiciones de seguridad del combustible nuclear gastado y de los desechos de antiguas bases navales es actualmente la prioridad del CEG. Se están construyendo dos centros regionales de acondicionamiento y almacenamiento de desechos radiactivos en las zonas noroccidental y más oriental de la Federación de Rusia. También se está ejecutando con éxito un programa internacional para recuperar potentes generadores termoeléctricos de radioisótopos que se utilizaron con fines de navegación (por ejemplo, baterías para faros) a lo largo de la costa de la Federación de Rusia. La mayoría de los 1 007 generadores termoeléctricos de radioisótopos del país ya han sido recuperados, y solo quedan 75.

Gestión de desechos radiactivos: El accidente de Fukushima Daiichi

97. El accidente de Fukushima Daiichi dio lugar a importantes desafíos relacionados con la gestión de los desechos radiactivos, tanto los que se encontraban en el emplazamiento como los que quedaron esparcidos en una amplia zona fuera del emplazamiento (Fig. A-15). Los desechos en el emplazamiento son grandes volúmenes de agua salada muy contaminada en los edificios del reactor y de la turbina y diversos desechos sólidos como escombros, troncos de árboles, tierra y metales que contienen sobre todo radionucleidos de cesio, así como concentraciones importantes de otros productos de fisión y posiblemente restos de elementos transuránicos. Los desechos fuera del emplazamiento son grandes volúmenes de escombros contaminados procedentes de la destrucción causada por el tsunami y volúmenes muy grandes de material contaminado que se derivará de las actividades de gran envergadura previstas de limpieza/restauración de las zonas urbanas, agrícolas, forestales y acuáticas más afectadas por las emisiones de cesio radiactivo (Fig. A-16).

98. El agua muy radiactiva que se ha acumulado en los edificios del reactor y la turbina está siendo procesada constantemente para la eliminación del cesio en instalaciones de purificación creadas mediante la colaboración local e internacional. El agua procesada se ha almacenado en cisternas o se ha reutilizado para refrigerar los núcleos de los reactores dañados tras la desalación. A noviembre de 2012, el volumen acumulado de agua procesada era de aproximadamente 500 000 m³. Se han instalado instalaciones de eliminación de diversos nucleidos para eliminar elementos radiactivos distintos del cesio, y están siendo preparadas para iniciar las operaciones. Los principales desafíos actuales en esta esfera son, entre otros, el almacenamiento de volúmenes muy grandes de agua procesada y la entrada constante de agua subterránea en los edificios, lo que da lugar a volúmenes en constante aumento de agua contaminada que se debe procesar y almacenar. Los desechos sólidos acumulados en el emplazamiento han sido almacenados en instalaciones de almacenamiento temporal y se están realizando muestreos y análisis a fin de determinar las características de los desechos y las opciones para su ulterior gestión.

99. La retirada de residuos del combustible de los reactores dañados (“retirada del combustible”) plantea una serie de desafíos tecnológicos. Esta labor se debe realizar en condiciones de dosis extremadamente elevadas de radiación dentro de los edificios de los reactores. Por lo tanto, la retirada del combustible precisará el desarrollo y utilización de instrumentos especiales, la manipulación remota de equipo y el empleo de técnicas avanzadas. Será preciso desarrollar instrumentos controlados a distancia para el examen detenido de la situación de contaminación o tecnologías de funcionamiento remoto o mediante robots para realizar actividades de descontaminación (por ejemplo, lavar, limpiar/aspirar, cepillar/desbastar las superficies, y pintar/rociar agentes de descontaminación), a fin de evitar la exposición innecesaria de los trabajadores. Está previsto realizar actividades de investigación y desarrollo en relación con esos instrumentos y tecnologías mediante la colaboración multilateral entre expertos e instituciones internacionales.

100. La Ley de medidas especiales relativas al tratamiento de la contaminación radiactiva, de 2011, entró en vigor en su totalidad el 1 de enero de 2012 en el Japón. Sobre la base de esta ley se están llevando a cabo la planificación y puesta en práctica de la descontaminación fuera del emplazamiento, así como la recopilación, transferencia, almacenamiento temporal y disposición final de los desechos. Se están realizando actividades de descontaminación en un total de 104 municipios. Esto incluye zonas en un radio de 20 km de la central nuclear de Fukushima Daiichi o en las que la exposición a dosis de radiación anuales supera los 20 mSv. A agosto de 2012 se había finalizado la descontaminación en 78 de los 104 municipios. Asimismo, se desplegaron intensos esfuerzos para obtener una instalación de almacenamiento provisional con el objetivo de encontrar un lugar adecuado para una instalación en el plazo de un año e iniciar las operaciones en tres años. Está previsto llevar a cabo la disposición final en un plazo de 30 años a partir del inicio del almacenamiento provisional.



Fig. A-15. Central nuclear de Fukushima Daiichi de la TEPCO, octubre de 2011



Fig. A-16. Almacenamiento provisional de tierra retirada en un proyecto modelo de restauración en la escuela primaria de Tominari, ciudad de Date, octubre de 2011.

Clausura

101. A diciembre 2012, 142 reactores de potencia de todo el mundo habían sido puestas en régimen de parada permanente, cifra que incluye 18 reactores de potencia respecto de los cuales se había declarado que iniciaban la fase de clausura o que estuvieron en régimen de parada permanente en 2012. En total, 16 reactores de potencia han sido desmantelados íntegramente, otros 52 reactores están siendo desmantelados, 59 se encuentran en modalidad de confinamiento seguro o están a la espera del inicio del desmantelamiento final, tres están sepultados y en el caso de 12 no se ha especificado aún una estrategia de clausura.

102. Actualmente, más de 400 reactores de investigación y conjuntos críticos han sido clausurados o están en proceso de desmantelamiento. Otros varios cientos de instalaciones nucleares, como instalaciones de gestión de desechos radiactivos o del ciclo del combustible nuclear, han sido clausuradas o están siendo desmanteladas.

103. Se han realizado importantes progresos en la ejecución de proyectos de clausura de reactores de potencia en Francia, España, los Estados Unidos de América, el Reino Unido y Ucrania. El montaje en curso del nuevo confinamiento seguro para la unidad cuatro de la central nuclear de Chernóbil y el desmantelamiento de los dispositivos interiores del reactor¹⁹ de la central nuclear José Cabrera en

¹⁹ Los “dispositivos interiores del reactor” son estructuras importantes dentro de la vasija del reactor que desempeñan una o varias funciones, como servir de soporte al núcleo, mantener la alineación del combustible, dirigir el flujo del refrigerante primario, proporcionar blindaje radiológico para la vasija del reactor y guiar la instrumentación intranuclear.

España son ejemplos de logros técnicos (Figs. A-17 y A-18). No obstante, pese a los progresos realizados en varios países, es preciso acelerar la ejecución de proyectos de clausura en algunos Estados Miembros con infraestructuras nucleares menos desarrolladas.

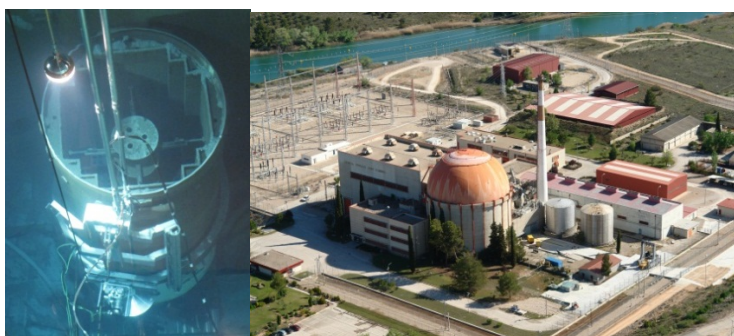


Fig. A-17. Desmantelamiento de los dispositivos interiores del reactor (izquierda) en la central nuclear José Cabrera (derecha) (Fotografía: ENRESA).

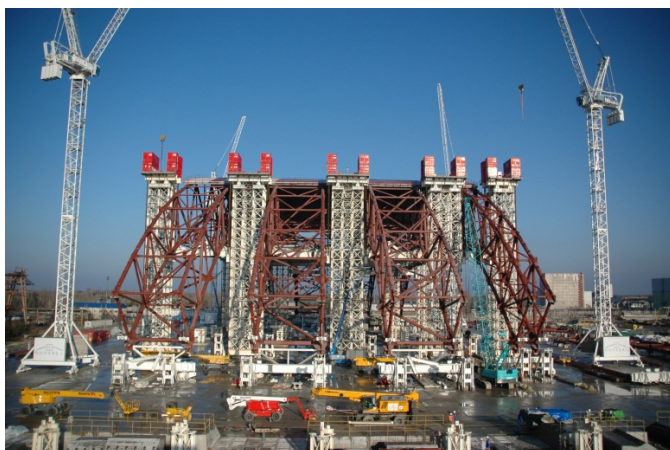


Fig. A-18. Montaje del nuevo confinamiento seguro de la unidad cuatro en la central nuclear de Chernóbil (Fotografía: Central nuclear de Chernóbil).

104. Siguen existiendo desafíos importantes en relación con la clausura, como la disponibilidad de financiación y las opciones de disposición final, junto con el acceso a recursos técnicos y humanos apropiados, especialmente en el caso de centrales nucleares que han sido sometidas a régimen de parada tras un accidente muy grave. La clausura en curso de la central nuclear de Chernóbil y la clausura futura de la de Fukushima Daiichi son los ejemplos más visibles de esas instalaciones nucleares. La ausencia de un marco jurídico y regulador apropiado también sigue siendo una limitación importante en algunos países.

105. En el Japón se actualizó, en agosto de 2012, la hoja de ruta a medio y largo plazo para la clausura de la central nuclear de Fukushima Daiichi. El documento *Progress Status of Mid-and-long Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Units 1–4, TEPCO*²⁰, publicado por la sede del Servicio de respuesta a emergencias nucleares del Consejo Gobierno-TEPCO de respuesta a medio y largo plazo, se elaboró para describir el marco de todas las actividades requeridas para la clausura de la central y la gestión de los desechos radiactivos conexos (Fig. A-19).

²⁰ http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20120625_01a.pdf

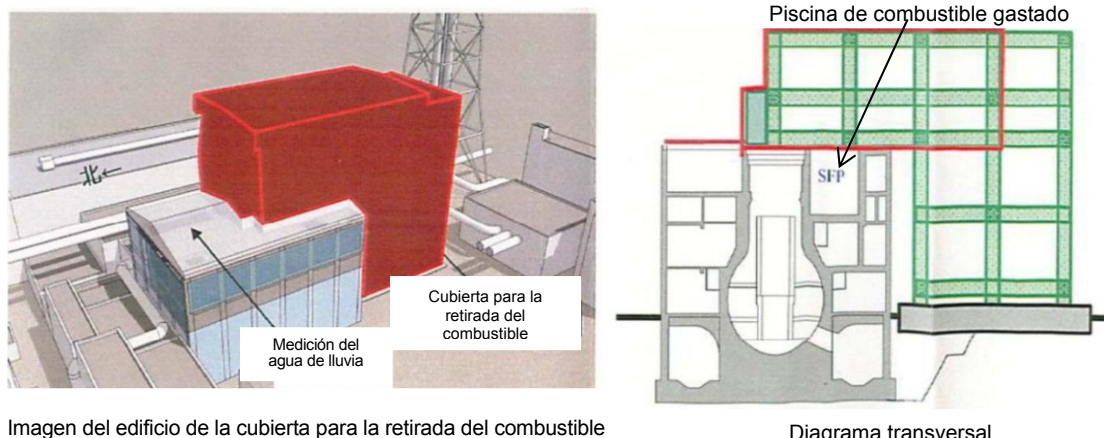


Imagen del edificio de la cubierta para la retirada del combustible

Diagrama transversal

Fig. A-19. Cubierta protectora para la retirada del combustible gastado de la piscina de combustible gastado en Fukushima Daiichi-4.

A.4. Seguridad

106. En 2012, los debates sobre la seguridad de las centrales nucleares se centraron en gran medida en determinar y aplicar las enseñanzas que se podían extraer del accidente nuclear de Fukushima Daiichi de marzo de 2011. Aunque aún quedan enseñanzas por aprender, ya se han elaborado planes de acción para poner en práctica las enseñanzas preliminares extraídas del accidente, planes que se están aplicando a escala tanto nacional como internacional. El Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear, aprobado por la Conferencia General en septiembre de 2011, define un programa de trabajo para fortalecer el marco mundial de seguridad nuclear. En él se definen 12 medidas principales.²¹ Quizá se extraigan más enseñanzas que se podrían incorporar, según convenga, en estas medidas mediante la actualización del Plan de Acción.

107. En 2012, el Organismo convocó tres reuniones de expertos internacionales en relación con el plan de acción: una sobre seguridad de los reactores y del combustible gastado a la luz del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi, en marzo; otra sobre el aumento de la transparencia y la eficacia de las comunicaciones en caso de emergencia nuclear o radiológica, en junio; y una tercera sobre protección contra terremotos y tsunamis extremos a la luz del accidente ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi, en septiembre. Además, del 15 al 17 de diciembre de 2012, el Japón, con el patrocinio conjunto del Organismo, celebró la Conferencia Ministerial de Fukushima sobre Seguridad Nuclear, y ayudó a contribuir al fortalecimiento de la seguridad nuclear en todo el mundo intercambiando con la comunidad internacional, a nivel ministerial y de expertos, otros conocimientos y enseñanzas extraídas del accidente nuclear de Fukushima Daiichi.

108. Desde el punto de vista operacional, la seguridad de las centrales nucleares en todo el mundo sigue siendo alta, como señalan los indicadores de seguridad recopilados por el Organismo y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares. La figura A-20 muestra el número total de paradas de emergencia no previstas, o paradas normales, por cada 7 000 horas de funcionamiento crítico de los reactores de potencia. Esto suele utilizarse como indicador del éxito en la mejora de la seguridad de las centrales. Tal como se muestra, aunque en los últimos años se han logrado mejoras constantes, no son tan notables como las alcanzadas en el decenio de 1990. El aumento entre 2010 y 2011 guarda relación con el elevado número de paradas de emergencia desencadenadas por el terremoto de marzo de 2011 en el Japón.

²¹ El texto del Plan de Acción del OIEA sobre seguridad nuclear se puede consultar en la dirección: http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC55/GC55Documents/Spanish/gc55-14_sp.pdf

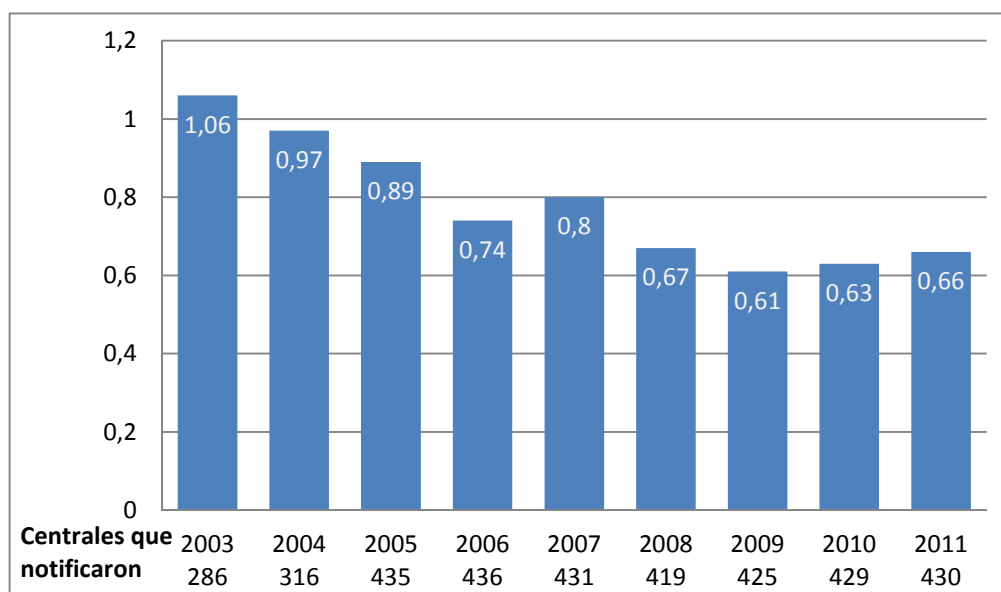


Fig. A-20. Número total de paradas de emergencia no previstas, tanto automáticas como manuales, por cada 7 000 horas de funcionamiento crítico de los reactores de potencia. Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo (<http://www.iaea.org/pris>).

109. Puede obtenerse más información sobre seguridad nuclear en el *Examen de la seguridad nuclear – 2013* o en el *Informe Anual del OIEA para 2011*.

B. Datos atómicos y nucleares²²

110. Es fundamental disponer de datos atómicos y nucleares exactos para todas las investigaciones e innovaciones en el ámbito nuclear. Esos datos son indispensables para muchas aplicaciones como la energía nucleoelectrónica (fisión), los reactores de investigación, la fusión nuclear, la medicina, los ensayos no destructivos y la monitorización ambiental.

111. Los centros regionales de datos de todo el mundo se encargan de la labor relacionada con los datos nucleares. Uno de los centros básicos se encuentra en el Organismo; otros son el Banco de Datos de la AEN de París (Francia), el Centro Ruso de Datos Nucleares de Obninsk y el Centro Nacional de Datos Nucleares de los Estados Unidos, situado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. El Organismo coordina dos redes que enlazan estos centros, la Red internacional de centros de datos sobre reacciones nucleares (NRDC) y la Red internacional de evaluadores de datos de estructuras y desintegración nucleares (NSDD). La NRDC se ocupa principalmente de la base de datos experimentales sobre reacciones nucleares (EXFOR), mientras que la NSDD supervisa el archivo de datos evaluados de estructuras nucleares (ENSDF) y realiza evaluaciones horizontales de interés. Estas bases de datos continuamente actualizadas proporcionan información esencial para las actividades de investigación y desarrollo en la ciencia y la tecnología nuclear, tanto para aplicaciones eléctricas como no eléctricas.

²² A partir la publicación del Examen de la tecnología nuclear 2012, los adelantos en la fisión y fusión avanzadas se presentan bianualmente, en alternancia con los adelantos registrados en la esfera de los datos atómicos y nucleares. Este mayor foco de atención nos permite describir con mayor detalle las tendencias y avances importantes.

112. En el último año la comunidad internacional de datos ha venido considerando la posibilidad de introducir un cambio en el formato para el almacenamiento de datos nucleares. Las actuales posibilidades técnicas facilitarían la modificación de la norma para que el formato de texto actual y de larga data de “tarjeta perforada” adoptara un lenguaje moderno estructurado como el código XML. Si se llega a un acuerdo al respecto, esa modificación sería una innovación importante.

113. El Simposio Internacional sobre dosimetría de reactores (ISR-14), celebrado en mayo de 2011 en los Estados Unidos, destacó la importancia de los datos dosimétricos para que los espectros y las fluencias de neutrones puedan determinarse con exactitud. Aunque la base de datos del Fichero internacional sobre dosimetría de reactores (IRDF) se ha aplicado como norma durante muchos años, esta ha sido sustituida recientemente por un nuevo fichero de dosimetría, el Fichero internacional sobre dosimetría de reactores y fusión (IRDF-F), también creado por el Organismo, y concebido para una gama más amplia de aplicaciones, incluida la fusión. Se prevé que el IRDF-F sea validado y mejorado según sea necesario en los próximos años, en particular, mediante actividades coordinadas por el Organismo.

114. Los usuarios utilizan los ficheros de datos evaluados como información en los códigos para diseñar dispositivos, formular justificaciones de la seguridad tecnológica y realizar actividades de ciencias básicas. En 2011 y 2012 se presentaron a nivel mundial tres nuevas versiones de estos ficheros: ENDF/B-VII.1 (Estados Unidos), JEFF-3.1.2 (Europa) y JENDL-4.0 (Japón). Se espera que, en los próximos años, estos ficheros sean validados y comprobados exhaustivamente. Ello ayudará a determinar defectos y mediante nuevos experimentos y cálculos de apoyo la elaboración de versiones mejoradas de estos ficheros. En la figura B-1 se presenta un ejemplo de datos tomado de las tres bases de datos, en que se incluye la incertidumbre, en relación con la reacción de la captura de neutrones en el tungsteno. Este gráfico fue elaborado mediante un programa informático creado por el Organismo para posibilitar mejores comparaciones visuales y la difusión de datos nucleares de una amplia diversidad de fuentes de datos.

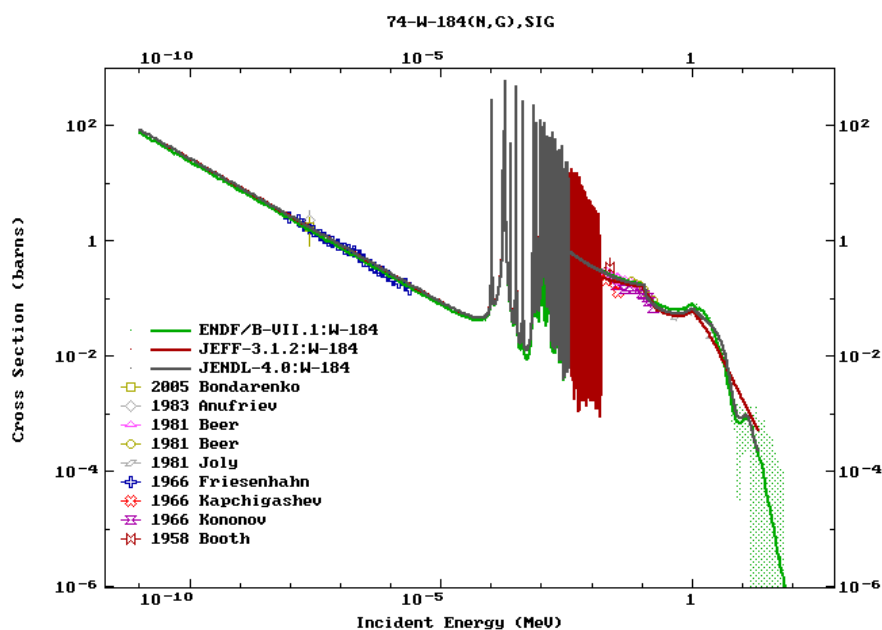


Fig. B-1. Ejemplo de datos obtenidos de tres bibliotecas de datos recientemente evaluadas con la inclusión de una selección de datos experimentales procedentes de EXFOR. La región sombreada a la derecha indica cómo puede representarse la información de incertidumbres de la versión ENDF/B-VII.1.

115. Los ficheros de datos evaluados que se mencionan anteriormente están alcanzando un grado de madurez, como demuestra la convergencia de gran parte de los datos. No obstante, quedan varios aspectos en que se reconocen deficiencias, aunque normalmente su magnitud dificulta resolverlos mediante un solo proyecto de evaluación. La colaboración internacional se considera una respuesta, y ya se ha logrado mucho en las actividades de cooperación para la evaluación de datos nucleares de la AEN, en las que se han publicado 30 informes. Se ha propuesto que esa cooperación se amplíe considerablemente mediante un nuevo paradigma de trabajo que acelere los adelantos en la evaluación de datos de reacciones nucleares denominado Organización Internacional de Colaboración para la Evaluación de Bibliotecas de Datos. Al inicio se tomará en consideración una serie de seis isótopos prioritarios: ^1H , ^{16}O , ^{56}Fe , $^{235,238}\text{U}$ y ^{239}Pu . Se prevé que esto facilite evaluaciones definitivas que puedan adoptar todos los proyectos y que en el futuro, bajo la gobernanza de organismos internacionales como la AEN y el OIEA, pueda abarcar aspectos más amplios relacionados con los datos nucleares.

116. La fusión es posiblemente una de las principales fuentes de energía. El proyecto relativo al Reactor termonuclear experimental internacional (ITER)²³ tiene la facilidad de demostrar la viabilidad científica y tecnológica y los elementos de seguridad de la energía de fusión con fines pacíficos. En el marco del proyecto se está construyendo un dispositivo de escala de central eléctrica que se espera que demuestre la viabilidad de producir 500 MW de energía de fusión (Fig. B-2). La biblioteca FENDL-2.1 sirvió de fuente de datos de referencia para el diseño del ITER y se ha creado una biblioteca mejorada FENDL-3 en virtud de un proyecto coordinado de investigación del Organismo destinado a ayudar a analizar los resultados.

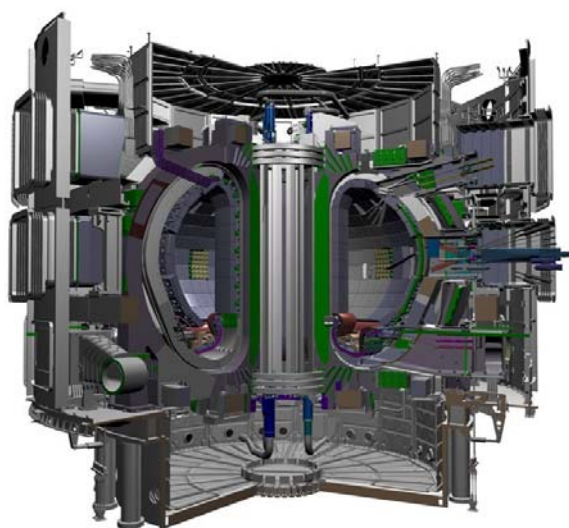


Fig. B-2. Vista de corte del dispositivo del ITER que se está construyendo en Francia para investigar la producción de energía de fusión. En el diseño del dispositivo se han empleado ingentes cantidades de datos nucleares y atómicos, que se utilizarán para analizar su funcionamiento y los experimentos.

117. La 24ª Conferencia del OIEA sobre energía de fusión, celebrada en octubre de 2012 en San Diego (Estados Unidos), atrajo a más de 850 participantes de 37 Estados Miembros y cinco organizaciones internacionales. Se presentaron aproximadamente 700 monografías, incluso los resultados del experimento del muro similar al del ITER (Fig. B-3) en relación con el dispositivo de fusión del proyecto Toro Europeo Común (JET) en el Reino Unido.

²³ Puede obtenerse más información sobre el ITER en <http://www.iter.org/>.

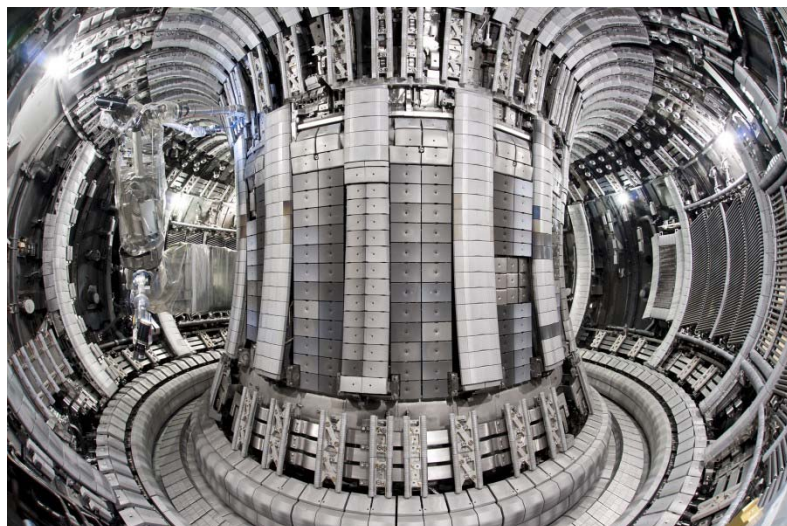


Fig. B-3. Terminado el interior de la vasija de vacío del JET con la instalación del muro similar al del ITER.

118. Las técnicas nucleares para el análisis de materiales están adquiriendo mayor predominio, y los métodos empleados anteriormente solo en los laboratorios nucleares se han venido aplicando por industrias privadas como parte del equipo estándar de simulación. Varias conferencias internacionales se dedican al tema. La 21ª Conferencia internacional sobre el análisis con haces de iones tendrá lugar en Seattle (Estados Unidos) en junio de 2013. El Organismo ha ultimado un proyecto coordinado de investigación relativo a la base de datos IBANDL que proporciona datos sobre el análisis con haces de iones, y está ejecutando otro sobre una técnica analítica conexas, la emisión de rayos gamma inducidos por partículas.

119. Las nuevas instalaciones que producen intensos pulsos de rayos X duros están generando avances en los datos atómicos y moleculares. La fuente de luz coherente de acelerador lineal de Stanford (Estados Unidos) fue puesta en servicio en 2009 y la instalación SACLA de la RIKEN de Harima, en el Japón, entró en funcionamiento en 2011 y fue accesible a los usuarios externos en 2012. La fuente de luz de rayos X de estas instalaciones se emplea para iluminar blancos que van desde átomos y moléculas hasta células vivas y nanocristales. La gran intensidad y la longitud corta de pulsos facilitan el estudio de la materia en condiciones extremas así como de procesos complicados, por ejemplo, en biomoléculas, a nivel atómico.

120. La Instalación nacional de ignición del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de los Estados Unidos utiliza 192 láseres de alta potencia que enfocan la luz ultravioleta en un hohlraum donde esta se convierte en rayos X. En su fase inicial de funcionamiento, 2009-2012, la Instalación nacional de ignición se dedicó a lograr una ganancia neta de energía del calentamiento y compresión de una pastilla de deuterio-tritio. La ganancia de energía pronosticada no se consiguió y esto en parte señala la necesidad de contar con datos atómicos exactos sobre la materia en condiciones extremas. La Instalación nacional de ignición sigue funcionando.

121. El Centro Virtual de Datos Atómicos y Moleculares (VAMDC), un proyecto europeo de infraestructura de tecnología de la información financiado inicialmente para el período 2009-2012, ha logrado establecer una interfaz común para unas 20 a 25 bases de datos atómicos y moleculares con aplicaciones en la física del plasma y la astrofísica. Las interfaces y los instrumentos de búsqueda conexos se crearon tomando como base el Esquema XML para átomos, moléculas y sólidos (XSAMS), que elaboró un grupo internacional coordinado por el Organismo. La versión 0.1 se presentó en 2009, y la versión 1.0 en 2012. En estos momentos se ejecuta un proyecto de seguimiento del VAMDC.

122. Las bases de datos relativas a los procesos atómicos y moleculares se sustentan cada vez más en datos informatizados. En varias reuniones recientes se ha planteado la cuestión de que las secciones eficaces informatizadas, como las secciones eficaces experimentales, tienen incertidumbres que deben ser cuantificadas. En septiembre de 2012 se celebró en Daejeon (Corea) la Reunión técnica conjunta del OIEA-NFRI sobre la evaluación de datos relativos a los procesos atómicos, moleculares y de interacción plasma-material que intervienen en la fusión, con el fin de analizar las cuestiones de la propagación de errores y el análisis de sensibilidad, la situación actual de las bases de datos evaluadas, la evaluación de conjuntos de datos teóricos y experimentales, los métodos de evaluación y la función de los ajustes semiempíricos. Esta reunión, que es la primera de su tipo, tiene un importante papel que desempeñar en la modernización del trabajo internacional que se lleva a cabo en relación con la asignación de incertidumbres y la evaluación de datos para los procesos atómicos y moleculares que intervienen en la fusión.

123. En 2013, la Conferencia Internacional sobre datos nucleares para la ciencia y la tecnología se celebrará en Nueva York (Estados Unidos). En la conferencia se mostrará la labor que desempeñan los científicos e ingenieros que participan en la producción o la aplicación de datos nucleares para numerosas aplicaciones.

C. Aceleradores y reactores de investigación

C.1. Aceleradores

124. Los electrones, los protones y otros tipos de partículas cargadas se aceleran para producir rayos X, neutrones, haces de partículas cargadas y radioisótopos para su uso en las investigaciones y en la tecnología. Las tecnologías basadas en aceleradores se consideran un elemento clave al servicio del desarrollo social y económico con una amplia variedad de aplicaciones en los sectores de la energía, la salud, la agricultura, el medio ambiente, los materiales, los recursos naturales y la educación.

125. Se han desarrollado aceleradores con diseños muy distintos. Su tamaño puede variar: algunos son tan pequeños que se pueden colocar sobre una mesa, mientras que otros pueden medir decenas de kilómetros. Los aceleradores pueden tener forma lineal o circular. Pueden producir o acelerar haces de partículas cargadas en pulsos o de forma continua mediante distintas técnicas. Los aceleradores son los principales instrumentos de una gran variedad de aplicaciones basadas en la física nuclear con una importante incidencia social, como: la producción de radioisótopos tales como el flúor 18, el cobre 64, el carbono 11, etc., para la preparación de radiofármacos utilizados en el diagnóstico del cáncer; el uso directo de haces de aceleradores para el tratamiento del cáncer; la prospección de minerales y petróleo; el procesamiento de chips semiconductores; la esterilización de equipo médico y productos alimenticios; la datación de artefactos; y muchas otras. Los aceleradores son objeto de constantes estudios destinados a encontrarles nuevas aplicaciones, y un acontecimiento notable ha sido el uso eficaz del ciclotrón para fines médicos en la producción de tecnecio 99 m, el radionucleido más ampliamente utilizado con fines de diagnóstico en el mundo.

Caracterización de materiales

126. La tecnología nuclear desempeña una función clave en el desarrollo de nuevos materiales. El análisis con haces de iones es un instrumento importante para caracterizar las propiedades y el comportamiento de materiales en esferas como la arqueología, la biomedicina, la vigilancia de la contaminación ambiental, la alimentación y la agricultura, la ciencia forense, la industria, la minería, el estudio de objetos del patrimonio cultural, etc. Las técnicas de análisis con haces de iones suelen ser no destructivas; no obstante, las propiedades de los materiales pueden verse muy afectadas por la irradiación con iones.

127. Existen preocupaciones ambientales en relación con los radioisótopos con prolongados períodos de semidesintegración generados a partir de la fisión nuclear en la parte final del ciclo del combustible nuclear. Esas preocupaciones han dado lugar a un mayor número de actividades de investigación y desarrollo para crear una tecnología que reduzca la cantidad de desechos radiactivos mediante la transmutación²⁴, ya sea en reactores rápidos de fisión o sistemas accionados por aceleradores, también en el OIEA, donde se están ejecutando una serie de iniciativas en el marco del proyecto sobre adelantos tecnológicos en la esfera de los reactores rápidos y los sistemas accionados por acelerador.

128. La caracterización de materiales en tiempo real mediante la radiación sincrotrónica y los haces de neutrones, iones y electrones es un instrumento valioso para hacer frente a los desafíos existentes en materia de investigación y tecnología para utilizar determinados materiales en las aplicaciones relacionadas con la energía. Una mejor comprensión de los factores derivados del uso o el envejecimiento que degradan el comportamiento de un material pueden ayudar a responder a esos desafíos. El desarrollo de materiales más sofisticados, por ejemplo, materiales que reducen al mínimo el consumo de energía, pueden contribuir a paliar la presión en los recursos naturales de la Tierra y limitar las presiones ambientales. Las partículas aceleradas pueden desempeñar una función importante en el desarrollo de esos nuevos materiales: se pueden utilizar los iones de los aceleradores de haces de iones para simular los daños por radiación que experimenta el material en un reactor de fisión o de fusión; también pueden emplearse para crear nuevos materiales mediante la implantación de iones; por último, se pueden utilizar para analizar esos materiales. Las muestras que se crean de nuevos materiales son pequeñas, por lo que se habla de ellas como “materiales modelo”. Por razones de rentabilidad, una vez que esos materiales han sido fabricados, es necesario crear métodos alternativos y más sencillos para producirlos. La caracterización *in situ* y en tiempo real del proceso de fabricación puede facilitar esta tarea promoviendo una mejor comprensión de todos los pasos necesarios.

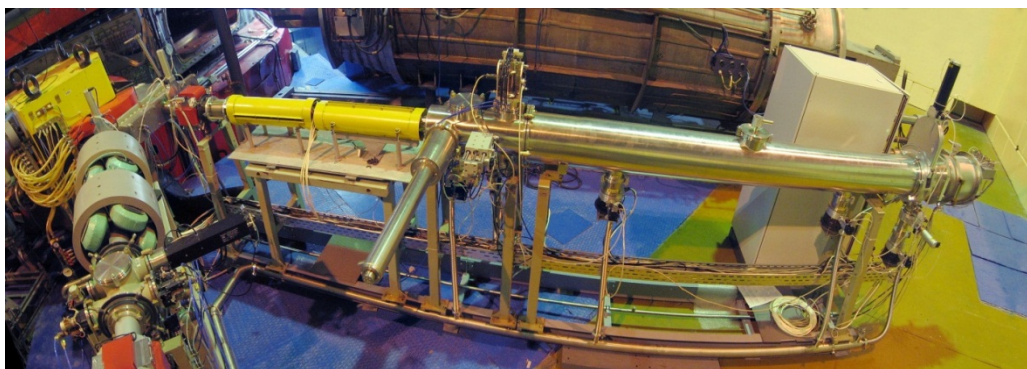


Fig. C-1. Desarrollo de una nueva línea de haces de iones para ensayos de resistencia a la radiación de dispositivos electrónicos en la instalación de ciclotrón U400M del Instituto Unificado de Investigaciones Nucleares (Federación de Rusia).

Imagenología elemental y molecular con haces de iones

129. A lo largo de los años, la espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) se ha convertido en un poderoso instrumento analítico para el análisis elemental, en particular en materiales como los semiconductores. Recientemente, este instrumento se ha utilizado para obtener imágenes (mapas) de concentración molecular de alta resolución de superficies, con una resolución lateral inferior a un micrón. Los nuevos adelantos en la elaboración de perfiles de profundidad de los materiales nucleares podrían facilitar en última instancia una imagen completa en 3D del material analizado. No obstante, un inconveniente de esta técnica es que el análisis debe realizarse en un vacío. Las técnicas de

²⁴ Conversión de un elemento en otro. Se está estudiando la transmutación como medio para convertir los radionucleidos de período largo en otros de período más corto o estables.

espectrometría de masas a presión atmosférica disponibles actualmente, incluidas las basadas en la desorción/ionización mediante láser asistida por matriz (MALDI), el análisis directo en tiempo real (DART) y la ionización por desorción con electrospray (DESI), tienen diversas gamas de resolución espacial, como se indica en el cuadro C-1. Los límites de detección también pueden verse afectados, entre otras cosas, por el solvente utilizado. Otro inconveniente es que algunas técnicas pueden destruir información molecular. Hasta la fecha, ninguna técnica de espectrometría de masas puede ofrecer mapas de moléculas de alta masa en condiciones de presión ambiental con alta resolución espacial.

130. La espectrometría de masas de iones secundarios del orden de megaelectronvoltios (MeV-SIMS) ha surgido recientemente como una técnica que puede facilitar información química y elemental. Este método emplea iones pesados en la gama de energía de los MeV acelerados por aceleradores de iones y centrados en una instalación de microsondas nuclear. Los iones moleculares secundarios, emitidos desde la superficie irradiada de la muestra, se detectan mediante el método de tiempo de vuelo (ToF). Se prevé disponer de aplicaciones prometedoras de la MeV-SIMS en la elaboración de mapas de moléculas orgánicas, especialmente en las investigaciones biomédicas, forenses y del patrimonio cultural.

131. Es posible extraer iones del orden de los MeV del sistema de vacío y pasarlos al aire por una delgada ventana. Esta técnica se ha usado ampliamente en el pasado para realizar análisis elementales de objetos en condiciones ambientales con técnicas convencionales de análisis con haces de iones. Varias esferas clave sacarían provecho de un sistema de obtención de imágenes moleculares de gran resolución a presión ambiental. Entre ellas cabe mencionar: la arqueometría, las ciencias geológicas y ambientales, y las ciencias forense y biomédica. En el cuadro C-1 se hace una comparación de algunas de las principales técnicas de imagenología molecular.

Cuadro C-1. Comparación de algunas de las principales técnicas de imagenología molecular [Spoto, G. y Grasso, G., Spatially resolved mass spectrometry in the study of art and archaeological objects, *Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30, 856–863]

Información	Espectrometría de masas MALDI	SIMS	Espectrometría de masas a presión ambiental	NanoSIMS	MeV SIMS	Espectrometría de masas LA-ICP
Resolución espacial	10 μm	> 200 nm para elementos orgánicos	> 50 μm Submicrón en desarrollo	50 nm	1 μm	> 100 μm
Tamaño moléculas detectadas	Hasta ~150 kDa (proteínas grandes)	Hasta ~2 kDa (péptidos pequeños)	Hasta ~50 kDa (proteínas medianas)	Elemental	Hasta ~10 kDa (péptidos grandes)	Elemental
Capacidad de crear imágenes en 3D	Por desarrollar	Sí (5 nm de resolución de profundidad)	Potencial por desarrollar	Sí	Potencial por desarrollar	Algunos
Ambiente y tiempo real	Algunos (AP-MALDI)	x	✓	x	✓	x
Portátil	Versión de mesa disponible	x	✓	x	x	x
Cuantitativa	Con normas internas pero difícil	Cuantificación relativa	Con normas internas	Puede ser con marcado isotópico	Desconocido	✓

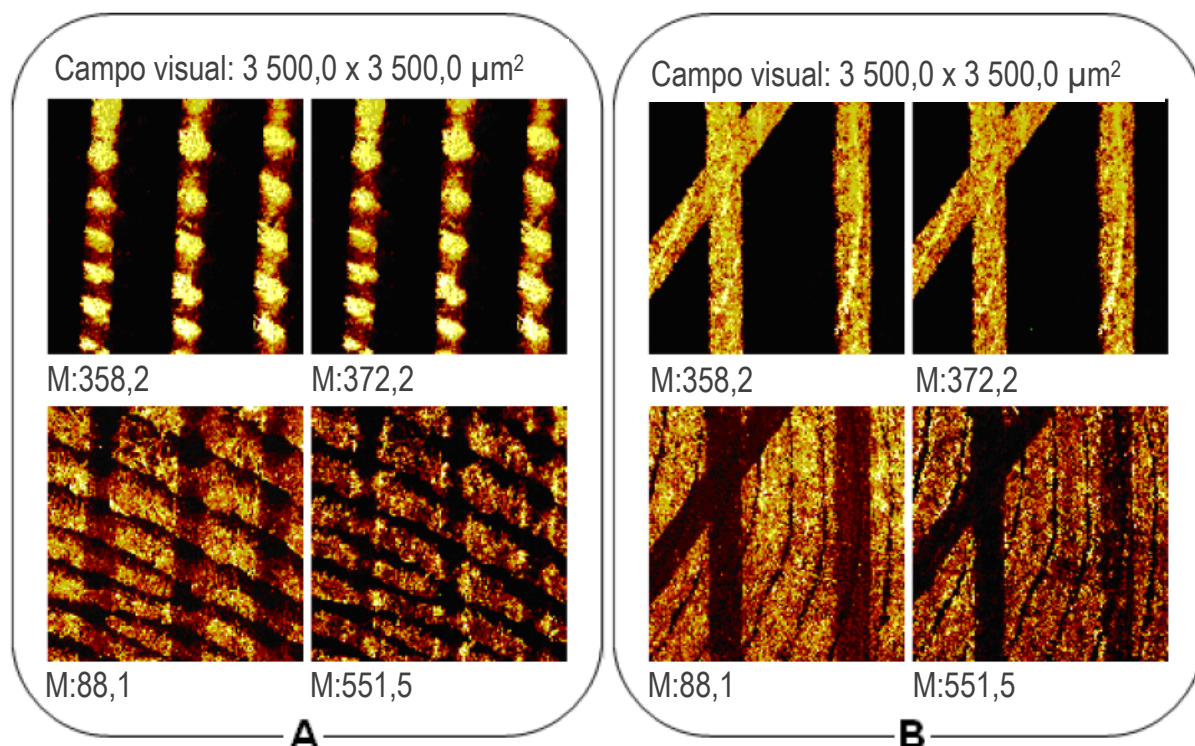


Fig. C-2. Imágenes de iones positivos por keV ToF-SIMS de una huella dactilar depositada (A) después de la tinta y (B) antes de la tinta en un sustrato de papel. N. J. Bright, R. P. Webb, S. Bleay, S. Hinder, N. I. Ward, J. F. Watts, K. J. Kirkby & M. J. Bailey, *Analytical Chemistry*, 84(9), 4083 a 4087, (2012).

132. Un protocolo publicado en 2012 utiliza la imagenología convencional keV ToF-SIMS para determinar si una huella dactilar se tomó antes o después de haber trazado una línea de tinta. Las imágenes de la figura C-2 muestran la diferencia entre ambos casos utilizando picos másicos asociados a la tinta y a la huella dactilar. La figura C-2 A muestra que cuando una huella dactilar se deposita sobre una línea de tinta existente, las moléculas de la tinta (M:358,2 y 372,2) correspondientes a los tintes quedan ocultas en las zonas en que se encuentran las líneas de la huella dactilar (determinadas a partir de M:88,1 y 551,5). La figura C-2 B muestra que cuando se traza una línea de tinta sobre una huella dactilar ya existente en un papel, los iones característicos de las moléculas de la tinta (M:358,2 y 372,2) ocultan las que corresponden a las moléculas de la huella dactilar (determinadas a partir de M:88,1 y 551,5) e impiden su detección.

C.2. Reactores de investigación

133. Los reactores de investigación abarcan una amplia gama de diversos tipos de reactores que en general no se utilizan para la generación de electricidad. La función principal de los reactores de investigación es proporcionar una fuente de neutrones para la investigación y varias aplicaciones, entre ellas, la educación y la capacitación. Son pequeños en comparación con los reactores de potencia, cuya función principal es producir electricidad. Las potencias nominales de los reactores de investigación se designan en megavatios y su potencia puede oscilar entre cero (por ejemplo, un conjunto crítico) y 200 MW(th), en comparación con 3 000 MW(th) (es decir, 1 000 MW(e)) en el caso de un gran reactor de potencia típico.

134. En enero de 2013 había en el mundo 247 instalaciones con reactores de investigación en funcionamiento. Además, había 15 reactores en régimen de parada temporal y 150 en régimen de parada a largo plazo. De los reactores en funcionamiento, 49 tienen gran capacidad, funcionan a niveles de potencia elevados y ofrecen un flujo neutrónico de intensidad más alta. Se han clausurado 304 reactores de investigación adicionales. Se están construyendo otros cuatro, de los cuales dos están en Francia (el

Reactor Jules-Horowitz y el reactor de sublimación mejorada por irradiación), uno en Jordania (instalación subcrítica) y otro en la Federación de Rusia (reactor PIK)²⁵. Por último, se han planificado oficialmente seis proyectos de reactores de investigación, respectivamente en la Argentina (RA-10), Bélgica (MYRRHA), el Brasil (RMB), Jordania (JRTR), Países Bajos (PALLAS) y la Federación de Rusia (MBIR). Antes de 2012 se cancelaron cinco proyectos. La distribución por edad, los niveles de potencia y la utilización de los reactores de investigación en funcionamiento se indican en las figuras C-5 y C-3 y en el cuadro C-2 respectivamente.

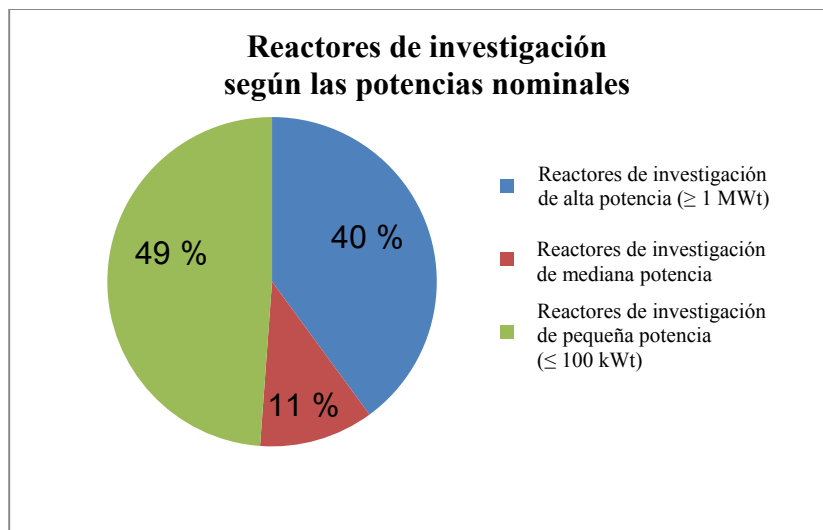


Fig. C-3. Desglose de la potencia nominal de los reactores de investigación en condiciones de funcionamiento (fuente: base de datos de reactores de investigación del OIEA, agosto de 2012).

Cuadro C-2. Aplicaciones habituales de los reactores de investigación en el mundo.

Tipo de aplicación	Número de reactores de investigación que intervienen ^a	Estados Miembros que acogen las instalaciones utilizadas
Producción de isótopos	92	45
Dispersión de neutrones	50	33
Radiografía neutrónica	71	40
Irradiación de materiales	70	28
Transmutación (piedras semipreciosas)	20	11
Transmutación (dopado con silicio)	29	19
Enseñanza/Capacitación	165	53
Análisis por activación neutrónica (AAN)	124	54
Geocronología	25	21
Terapia por captura neutrónica en boro (BNCT), incluida la I+D	22	12
Otras ^b	103	31

^a De los 252 reactores de investigación examinados (229 en funcionamiento, 15 en régimen de parada temporal, 4 en construcción y 4 previstos; en agosto de 2012).

^b Entre otras aplicaciones cabe citar: calibración y ensayo de instrumentos y dosimetría, experimentos de blindaje, experimentos en física de reactores, mediciones de datos nucleares, y visitas y seminarios de relaciones públicas.

²⁵ Según la información de la base de datos de reactores de investigación del Organismo, (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>) que contiene registros de reactores de investigación que están o han estado en funcionamiento.

135. Más de 15 Estados Miembros están estudiando la posibilidad de construir nuevos reactores de investigación o están procediendo a su planificación. Arabia Saudita, Azerbaiyán, Líbano, Sudán y Túnez se encuentran en las primeras fases de la planificación para construir un reactor de investigación. En Jordania, ha comenzado la construcción de un reactor de investigación multipropósito de 5 MW, mientras que en Viet Nam está previsto construir un nuevo reactor de investigación como parte de un contrato comercial global para una central nuclear. Los países que ya cuentan con programas de energía nucleoelectrónica, entre ellos Argentina, Brasil, Federación de Rusia, Francia, India, Países Bajos, República de Corea y Sudáfrica, también están construyendo o planificando la construcción de nuevos reactores de investigación con fines experimentales y comerciales específicos²⁶.



Fig. C-4. En 2012, el reactor de investigación avanzado de China alcanzó su potencia nominal de 60 MW y funcionó en total durante ~70 horas acumulativas. En consecuencia, se encargaron cinco instrumentos de haces de neutrones, cuando los modelos de dispersión de neutrones tuvieron la calidad requerida.

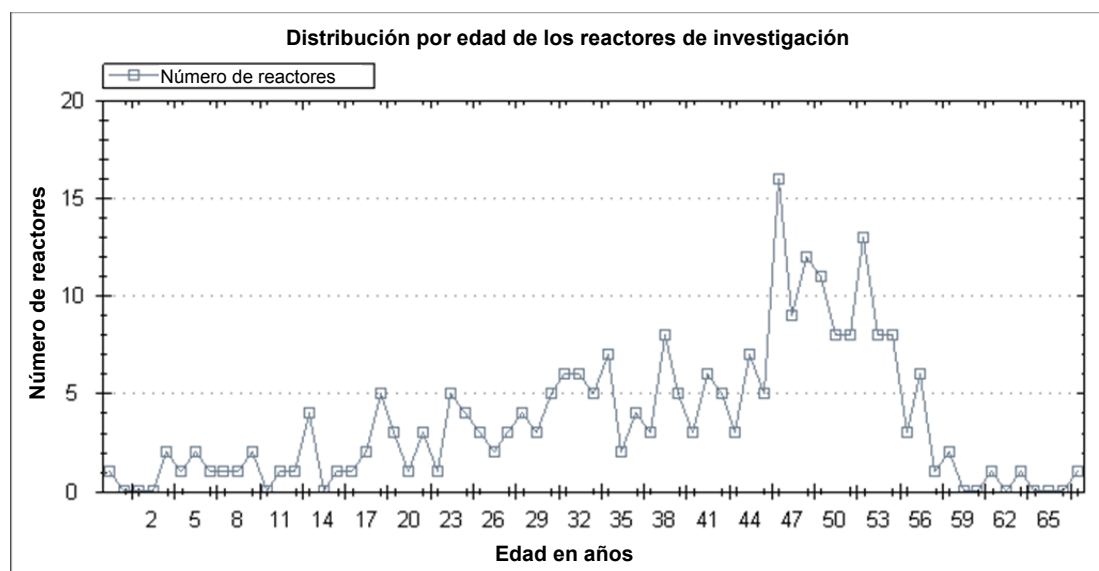


Fig. C-5. Distribución por edad de los reactores de investigación en condiciones de funcionamiento.

136. A medida 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 siga disminuyendo. Será precisa una mayor cooperación internacional para garantizar

²⁶ Una publicación reciente del Organismo titulada *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.1), ayuda a los Estados Miembros en esta esfera.

un acceso amplio a esas instalaciones y su uso eficiente. En 2012, las redes o coaliciones regionales de reactores de investigación existentes, con el apoyo del Organismo²⁷, ayudaron a potenciar esta cooperación y prestaron asistencia a los reactores de investigación para ampliar su base de interesados directos.

137. En 2012 se puso en marcha un nuevo servicio del Organismo, la Evaluación de la explotación y el mantenimiento de reactores de investigación (OMARR) para realizar exámenes por homólogos exhaustivos de la explotación y el mantenimiento de instalaciones de reactores de investigación; verificar el cumplimiento de los procedimientos de la planta en vigor; proponer esferas de mejora; y facilitar la transferencia mutua de conocimientos y experiencia entre los expertos de la misión y el personal del reactor. La primera misión OMARR, precedida por una misión previa que se celebró en junio de 2012, finalizó en diciembre de 2012 en el reactor del centro de investigación sobre neutrones del Instituto Nacional de Normas y Tecnologías de los Estados Unidos de América. También se celebró una reunión previa en octubre de 2012 para realizar una misión OMARR al reactor TRIGA en la Universidad de Pavia en Italia. Se espera que la misión principal se realice en 2013.

138. Durante 2012, la Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM) siguió llevando a cabo su misión de reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido (UME) en aplicaciones nucleares civiles en todo el mundo. En 2009, el alcance de la IRAM se amplió de 129 a aproximadamente 200 reactores de investigación de todo el mundo que funcionaban con combustible de UME y, a finales de 2012, 82 de ellos habían sido convertidos a combustible de UPE o sometidos a régimen de parada con anterioridad a la conversión. Por ejemplo, en México se procedió a la conversión del reactor de investigación TRIGA MARK III para que, en lugar de combustible de UME, utilice combustible de UPE y, tras su retirada definitiva, el combustible de UME se devolvió en marzo de 2012 a los Estados Unidos de América. En septiembre de 2012 finalizó en Polonia la conversión total del reactor de investigación María, que está utilizando combustible de UPE especialmente diseñado. En diciembre de 2012, la IRAM anunció la retirada definitiva de todo el UME de Austria tras la conversión total del reactor TRIGA de Viena a combustible de UPE. La repatriación en condiciones de seguridad del combustible de Austria marca la retirada definitiva de todo el combustible de UME para TRIGA del comercio civil.



Fig. C-6. El núcleo del reactor de investigación tipo Triga Mark-II que utiliza combustible de UPE, de la Universidad Técnica de Viena. El reactor se convirtió en 2012 para que utilizara UPE en lugar de UME.

²⁷ El Organismo ha reunido a varias coaliciones distintas de reactores de investigación del Báltico, el Caribe (que incluye la participación de América Latina), África Central, Asia Central, Europa Oriental y el Mediterráneo.

139. Con el apoyo del Organismo, varios Estados Miembros devolvieron combustible de UME de reactores de investigación al país de origen del combustible. En el marco del programa de devolución de combustible de origen ruso para reactores de investigación (RRRFR) se sigue repatriando en condiciones de seguridad combustible sin irradiar y gastado de UME a la Federación de Rusia. En 2012 el Organismo prestó asistencia en la repatriación de cerca de 110 kg de combustible de UME sin irradiar del Instituto de Física y Tecnología de Jarkov, Ucrania, y de unos 20 kg de combustible gastado de UME del Instituto de Investigaciones Nucleares de Kiev tras la conversión de su reactor de investigación para que utilice combustible de UPE en lugar de UME. En agosto y septiembre de 2012, finalizaron dos operaciones más de expedición de combustible gastado de aproximadamente 100 kg de UME procedentes de Uzbekistán y Polonia. Otra expedición para retirar unos 27 kg de combustible de UME sin irradiar procedente de Polonia finalizó satisfactoriamente. China prosiguió sus actividades de conversión de sus reactores miniatura fuente de neutrones para que utilicen UPE en lugar de UME, y prevé colaborar con los Estados Miembros que han adquirido reactores de ese tipo para que procedan a su conversión y repatrien el combustible de UME.

140. La conversión de un reactor para que utilice UPE y la repatriación del combustible de UME suele ir acompañada de importantes mejoras de infraestructura. Por ejemplo, en Ucrania, en el Instituto de Física y Tecnología de Jarkov se está construyendo, con apoyo financiero y técnico, una instalación subcrítica accionada por acelerador y alimentada con combustible de UPE tras la repatriación de todo el UME a la Federación de Rusia. Se espera que la instalación comience a funcionar en 2014.

141. En 2012, disminuyeron por fin las dificultades de suministro de los últimos años y la producción recuperó sus niveles normales aunque quedan interrogantes con respecto al abastecimiento a mediano y largo plazo. La conversión de los procesos de producción de isótopos médicos de UME a UPE prosiguió también con renovado interés durante este periodo. Australia anunció la ampliación de su capacidad de producción de molibdeno-99 a partir de UPE, para atender aproximadamente el 25 % de la demanda mundial. A fin de alcanzar esta producción, en 2016 se construirá una nueva planta de fabricación de elementos de medicina nuclear a escala de exportación, y en el mismo lugar también se construirá una planta de tratamiento de desechos Synroc para los desechos adicionales generados por la ampliación de la planta de molibdeno-99.²⁸ Sudáfrica continuó su producción comercial de molibdeno-99 a partir de blancos de UPE así como la conversión de sus procesos para que utilicen exclusivamente UPE, mientras que dos de los principales productores de isótopos (Bélgica y los Países Bajos) también comenzaron a ejecutar planes para convertir sus procesos de producción a escala comercial de UME a UPE. Por último, a finales de 2011 Indonesia pasó a ser un productor en pequeña escala basado totalmente en UPE.

142. 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. Aunque antes de 2012 se lograron avances sustanciales en el desarrollo de combustibles de uranio-molibdeno y su cualificación, es preciso realizar más esfuerzos y ensayos, particularmente en el contexto de los programas de examen de irradiación y post-irradiación, así como en la esfera de las técnicas de fabricación, para lograr la disponibilidad comercial oportuna de combustibles de UPE cualificados de muy alta densidad.

143. Tras la conversión de los reactores TRIGA pertinentes, disminuyó la demanda global de combustible para TRIGA. Durante una conferencia sobre el combustible para los reactores de

²⁸ Synroc es una tecnología australiana que utiliza prensas isostáticas calientes para reducir el volumen de subproductos nucleares incluso hasta el 99 % (en comparación con otros métodos como el hormigonado).

investigación celebrada en 2010²⁹, TRIGA Internacional anunció que la escasa viabilidad comercial del suministro de combustible creaba dificultades en relación con su capacidad a largo plazo para el abastecimiento de combustible. Desde entonces el precio del combustible ha aumentado considerablemente, lo que ha planteado dificultades para la explotación de varios de los 38 reactores TRIGA en condiciones de funcionamiento del mundo.

144. En 2012, el OIEA siguió apoyando la promoción del uso de los reactores de investigación para la educación y formación. Esos proyectos incluyen la búsqueda de vías para aumentar el número y los tipos de cursos de capacitación disponibles, y el uso de los reactores de investigación en la educación científica básica.

D. Nuevas tecnologías para mejorar la inocuidad y seguridad de los alimentos

D.1. Creación de estrategias y tecnologías con miras a la preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear y radiológica que afecte a la alimentación y la agricultura

145. Hay que tomar en cuenta muchos factores al establecer una estrategia de preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica que puedan afectar a la alimentación y la agricultura. Aunque la adopción de un enfoque común comporta ventajas, en toda estrategia deben tenerse en cuenta las condiciones locales y específicas de los emplazamientos para lograr su eficacia.

146. Durante los accidentes nucleares de Chernóbil y Fukushima Daiichi se emitieron radionucleidos al medio ambiente. En Fukushima se detectaron altos niveles de cesio y yodo radiactivos en el suelo y las plantas, y un programa de monitorización de alimentos produjo datos que llevaron a la publicación de las primeras restricciones en la distribución de alimentos específicos el 21 de marzo de 2011. El accidente de Fukushima Daiichi, al igual que el accidente de Chernóbil, demostró claramente que es fundamental que se apliquen lo antes posible después de un suceso prácticas de campo y laboratorio armonizadas basadas en protocolos de muestreo y estrategias de análisis coherentes para los alimentos y los suelos.

D.1.1. Preparación y respuesta para casos de emergencia: Necesidad de procedimientos analíticos y protocolos de muestreo armonizados

147. Después de cualquier suceso que provoque la emisión de radioisótopos al medio ambiente, deberían aplicarse estrategias de muestreo con el fin de determinar los radioisótopos de interés, así como la magnitud y la distribución espacial de la contaminación. Debería utilizarse un método normalizado basado en información de referencia apropiada para evitar comparaciones inexactas de las concentraciones de radionucleidos. Por ejemplo, cuando se contaminan las tierras agrícolas, es preciso que la profundidad seleccionada para el muestreo del suelo (capa superficial del suelo frente a zona de la raíz de las plantas) sea la misma.

²⁹ Reunión Temática Internacional sobre gestión del combustible de reactores de investigación (RRFM) 2010, organizada por la Sociedad Nuclear Europea (ENS) en cooperación con el OIEA y celebrada en Marruecos, los días 22 a 25 de marzo de 2010.



Fig. D-1. Muestreo de suelos en campos de arroz afectados, por cortesía del Ministerio de Agricultura, Silvicultura y Pesca del Japón.

148. La falta de protocolos armonizados en las prácticas de muestreo sobre el terreno y de análisis en el laboratorio también puede generar datos incongruentes que dificulten una sólida adopción de decisiones. Por ejemplo, el enjuague de radionucleidos de la superficie de hortalizas de hoja puede influir en la cantidad de radionucleidos detectados y el uso de distintos procedimientos de laboratorio (muestras enjuagadas o no enjuagadas) podría complicar la interpretación de los datos empleados para aplicar las restricciones alimentarias.

149. Por consiguiente, es fundamental que las autoridades encargadas del control de la alimentación y la agricultura utilicen protocolos y procedimientos armonizados. Estos procedimientos deberían concebirse para asegurar que se tome un número estadísticamente sólido de muestras, con una distribución temporal y espacial apropiada, para distintos tipos de suelos y alimentos. Deberían formularse orientaciones que ayuden a determinar la importancia de la incertidumbre analítica, el tipo de equipo analítico utilizado, y la metodología aplicada (p.ej., análisis sobre el terreno o en el laboratorio), incluidos los lugares de muestreo (sobre el terreno, en puntos de recolección, durante el transporte, en centros de distribución, en tiendas minoristas o en mercados).



Fig. D-2. Técnicas de ensayo para monitorizar los radionucleidos sobre el terreno, Grabenegg (Austria) [OIEA, 2012].

D.1.2. Manejo e interpretación de los datos del muestreo

150. Un gran volumen de datos de muestreo de alimentos puede acarrear importantes problemas logísticos. Los metadatos descriptivos (datos sobre el contenido informativo) y la producción y organización de bases de datos relacionales son fundamentales en la recopilación de grandes volúmenes de datos. Ello ayuda a mantener la calidad de los datos, facilita la producción de mapas y datos de salida detallados, y provee información precisa a los gobiernos, consumidores y reguladores.

151. Otro problema en la gestión de datos es la profundidad y el alcance de la resolución geográfica entre los conjuntos de datos. Por ejemplo, es indispensable que las muestras de alimentos y las de suelos asociadas con las zonas de producción tengan una resolución geoespacial similar (georeferenciación) que posibilite la superposición y presentación más exacta de los datos. A este respecto, los sistemas de posicionamiento mundial (GPS) pueden agregar valor a los datos al proporcionar información de ubicación en beneficio de interesados directos de todo el mundo. Esa información también ayuda a realizar un nuevo muestreo en los mismos emplazamientos, y hace posible la supervisión de cambios temporales en las concentraciones de radionucleidos en los alimentos y los suelos.

D.1.3. Representación geográfica de los datos

152. La cartografía es una actividad importante que pueden facilitar las encuestas terrestres, aéreas y marítimas para monitorizar la deposición de los radionucleidos luego de accidentes importantes; por ejemplo, cuando las encuestas aéreas y terrestres se combinan para representar geográficamente el alcance espacial de la precipitación radiactiva. Esa información, junto con los datos de monitorización de los suelos y los alimentos, se requiere para determinar las zonas afectadas, dar una imagen más clara de la situación de contaminación, y definir las opciones de restauración técnica y socioeconómicamente viables para restablecer la producción agrícola. Esos datos también ayudan a aplicar contramedidas agrícolas encaminadas a comunicar oportunamente asesoramiento acertado, incluso restricciones sobre la distribución y el consumo de productos específicos de la agricultura, la silvicultura y la pesca.

153. La monitorización terrestre también puede efectuarse con eficacia utilizando detectores de rayos gamma instalados en vehículos adecuados o portados por el personal. Ese tipo de equipo debería constar de medios de GPS para registrar los lugares de muestreo, y posibilitar así la rápida identificación de lugares críticos de contaminación y la adopción de decisiones sólida y oportuna. La monitorización móvil sobre el terreno también puede facilitar la especificación de las zonas que pueden requerir muestreo y vigilancia aún más minuciosos. Entre los últimos adelantos se cuenta la vinculación de los datos georeferenciados con tecnologías de cartografía geoespacial para la rápida difusión de información a los encargados de adoptar decisiones y el público.

D.1.4. Conclusiones

154. El liderazgo de las autoridades responsables durante los desastres catastróficos, incluidos los accidentes nucleares, y con posterioridad, resulta fundamental. Ello comporta poner en práctica las lecciones aprendidas y elaborar estrategias y tecnologías destinadas a mejorar las futuras medidas de preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear y radiológica.

155. Es necesario establecer prácticas de campo y laboratorio para armonizar los protocolos de muestreo y las estrategias analíticas (incluidos suelos, productos básicos agrícolas y alimentos) y programas de control para monitorizar los productos básicos. La notificación y la gestión de los datos sobre alimentación y agricultura también deben mejorarse. Este es un problema sobre todo cuando muchos países se ven afectados por un suceso y se requiere un enfoque coordinado para la recopilación y gestión de los datos. Los equipos y programas informáticos modernos también ayudarán a proporcionar datos oportunos y exactos de modo que los reguladores puedan basar sus decisiones de respuesta en la mejor información disponible.

156. En conclusión, se deben establecer y aplicar medidas de respuesta prácticas, oportunas, eficaces y armonizadas para restaurar la producción agrícola y garantizar la inocuidad de los alimentos. La aplicación de esas medidas haría más exacta y apropiada la recopilación de datos durante la respuesta a una emergencia en el futuro, y posibilitaría la aplicación de contramedidas y estrategias de restauración fundamentadas científicamente para resolver las incertidumbres y recobrar la confianza en el suministro de alimentos.

D.2. Nuevas aplicaciones de las tecnologías de irradiación de alimentos

157. La contribución de la irradiación de alimentos a la labor de mejorar la calidad de los alimentos, garantizar su inocuidad y reducir el riesgo de enfermedades transmitidas por los alimentos se conoce desde hace muchos años, y su potencial es evidente. La irradiación de alimentos puede desempeñar una función clave ante estos desafíos al reducir el deterioro de alimentos, las pérdidas y los desperdicios, y al prevenir la propagación de plagas de insectos de importancia económica, al mismo tiempo que proporciona acceso a mercados de exportación lucrativos.

158. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), aproximadamente un tercio (1 300 millones de toneladas) de todos los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o se desecha cada año. La Organización Mundial de la Salud también estima que las enfermedades transmitidas por los alimentos o el agua causan la muerte de 2,2 millones de personas al año, de las cuales 1,9 millones son niños³⁰. La reducción de las pérdidas de alimentos y desechos y la mejora de la calidad e inocuidad de los alimentos mediante la aplicación segura de tecnologías de irradiación de alimentos podrían, por tanto, tener un efecto inmediato e importante en la seguridad alimentaria mundial. Las exportaciones y el comercio de alimentos irradiados están creciendo a medida que la tecnología se acepta de manera más generalizada y se sustenta en normas internacionales.

D.2.1. Tecnología de irradiación de alimentos

159. La irradiación de alimentos es una de las pocas tecnologías que existen para abordar la calidad e inocuidad de los alimentos debido a su capacidad para controlar el deterioro de los alimentos y los microorganismos patógenos transmitidos por estos (inactivando y destruyendo esos microorganismos) así como las plagas nocivas de insectos (impidiendo su reproducción) sin afectar de forma significativa a las características sensoriales y la salubridad de los alimentos. El tratamiento de los alimentos por irradiación proporciona los mismos beneficios que procesos alternativos como los tratamientos térmicos, de refrigeración, congelación o químicos, pero sin elevar considerablemente la temperatura de los alimentos o dejar residuos potencialmente perjudiciales. La irradiación también puede utilizarse para proteger los alimentos envasados al impedir la contaminación cruzada y los riesgos microbiológicos después del tratamiento.

³⁰ Inocuidad de los alimentos – Informe de la Secretaría a la 63ª Asamblea Mundial de la Salud (A63/11), 25 de marzo de 2010, http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA63/A63_11-sp.pdf



Fig. D-3. Investigadores del Centro para la Aplicación de las Tecnologías de los Isótopos y las Radiaciones de la Agencia Nacional de Energía Nuclear de Yakarta (Indonesia) elaboran comidas preparadas para personas inmunodeprimidas, que aumentan la variedad en la dieta y minimizan los riesgos de enfermedades transmitidas por los alimentos [OIEA, 2012].

160. La irradiación de alimentos supone la exposición de los alimentos a la radiación ionizante en condiciones controladas. Los rayos gamma, los haces de electrones y los rayos X pueden utilizarse para aplicaciones alimentarias con arreglo a las normas internacionalmente reconocidas de la Comisión del Codex Alimentarius de la FAO/OMS y la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria. Los varios tipos de radiación ionizante tienen distintas propiedades y, por ende, presentan diversos beneficios y desventajas tecnológicos pero, en términos generales, una dosis determinada de radiación gamma, haces de electrones o rayos X produce los mismos efectos de inactivar los agentes patógenos y los organismos que promueven la descomposición, demorar la maduración e impedir la reproducción de los insectos.

161. La tecnología de irradiación de alimentos ha evolucionado considerablemente desde que fue propuesta a principios del decenio de 1900 y desde que se desarrolló la tecnología de fabricación de fuentes potentes de radiación en el decenio de 1950, y actualmente comprende nuevas aplicaciones de la radiación ionizante y diferentes técnicas de tratamiento; por ejemplo, en combinación con atmósferas frías o modificadas.

162. En la actualidad la irradiación de alimentos se lleva a cabo fundamentalmente en la región de Asia y el Pacífico y en América, pero no hay suficientes instalaciones de irradiación en el mundo para tratar los alimentos. La radiación ionizante se emplea principalmente para esterilizar dispositivos médicos y productos farmacéuticos, conservar objetos, procesar cosméticos y materiales de embalaje y mejorar los materiales de productos de consumo y manufacturados. La mayoría de las instalaciones tienen fines múltiples y en ellas se trata una amplia gama de productos, y aunque los alimentos puedan constituir una pequeña parte de su producción, pocas están diseñadas para aplicar eficientemente las dosis relativamente bajas (0,1 a 10 kGy) que se emplean para tratar los alimentos.

163. Hoy día la mayor parte de los alimentos irradiados se trata utilizando radiación gamma. Por ejemplo, de las casi 170 instalaciones de irradiación de alimentos que existen en China, más del 95 % emplean radiación gamma. La situación es similar en el caso de las instalaciones que irradian alimentos para los países de la Unión Europea, en que 26 instalaciones utilizan radiación gamma y seis, haces de electrones. Con todo, el uso de haces de electrones está aumentando en el mundo, y crece el interés en ellos y en los rayos X para tratar alimentos en laboratorios de investigación y en instalaciones comerciales de gran escala.

D.2.2 Fuentes de radiación

164. Las instalaciones de irradiación con radioisótopos utilizan comúnmente los isótopos radiactivos cobalto 60 o cesio 137 para producir rayos gamma. El cobalto 60 se utiliza en instalaciones comerciales y en la mayoría de los irradiadores de investigación gracias a su energía de rayos gamma más elevada y a su estabilidad inherente como metal, pero algunos irradiadores de investigación utilizan cesio 137, que tiene un período de semidesintegración más largo. Una desventaja de la radiación gamma es que no puede “apagarse”, por lo que la instalación debe mantenerse continuamente en funcionamiento con miras al pleno aprovechamiento económico del material radiactivo. Además, el decaimiento radiactivo significa que el tiempo de exposición de los alimentos a la radiación ionizante debe aumentarse en un pequeño porcentaje cada mes y que la fuente radiactiva debe aumentarse periódicamente añadiendo más cantidades del radioisótopo a fin de mantener una eficiencia de procesamiento aceptable. Aunque deben diseñarse de manera que garanticen la contención segura de la potente fuente de radioisótopos, estas instalaciones son relativamente fáciles de manejar.

165. Las instalaciones de irradiación con fuentes mecánicas, es decir, las que producen haces de electrones o rayos X, utilizan electricidad para producir radiación ionizante y, por lo tanto, una de sus ventajas respecto de las instalaciones de radioisótopos es que se pueden apagar cuando no se necesitan. Los haces de electrones se producen acelerando una corriente de electrones por medio de campos magnéticos y eléctricos. Administran la dosis muy rápidamente y en menos de un segundo pueden administrar una dosis para la que una instalación de irradiación gamma necesitaría varias horas. Ahora bien, los haces de electrones no penetran en los alimentos a tanta profundidad como los rayos gamma y no son adecuados para tratar grandes remesas de alimentos a granel en una sola vez. Con los haces de electrones se pueden procesar productos alimenticios embalados a granel en bultos más pequeños a un ritmo muy rápido. Esos haces ya se utilizan para aplicaciones comerciales en las industrias médica, ambiental y de modificación de materiales, pero no muchas instalaciones de haces de electrones están diseñadas para tratar alimentos eficazmente, y es preciso realizar investigaciones encaminadas a desarrollar aún más esta tecnología con miras a aplicarla en el tratamiento de los alimentos.

166. Los rayos X se generan cuando los electrones se aceleran en un blanco metálico, como por ejemplo, el tantalio, el tungsteno o el oro, para producir una corriente de rayos X. Aunque en la irradiación con rayos X, se puede perder una gran cantidad de energía en forma de calor, existe creciente interés en esta técnica, ya que los rayos x tienen más capacidad de penetración que los haces de electrones y puede utilizarse, por lo tanto, para irradiar grandes bultos a granel sin que sea necesaria una fuente radiactiva. Una instalación en Hawaii utiliza rayos X para irradiar las frutas y verduras frescas que se exportan al territorio continental de los Estados Unidos, y una gran instalación en Suiza ya está utilizando esta técnica para esterilizar dispositivos médicos. Es probable que, a medida que se disponga de aparatos de rayos X de nueva generación más eficientes y con mejores características técnicas, la irradiación por rayos X se convertirá en una técnica más difundida en el futuro.

Cuadro D-1. Comparación de la irradiación con radioisótopos y con fuentes mecánicas

	Irradiación con radioisótopos	Irradiación con fuentes mecánicas	
Aplicación	Los alimentos se irradian con rayos gamma	El haz de electrones pasa a través de los alimentos	Los alimentos se irradian con rayos X
Fuente	La fuente de radiación es un isótopo radiactivo (comúnmente cobalto 60)	La fuente de radiación es un aparato que utiliza electricidad	
Penetración	Radiación muy penetrante (idónea para palés de alimentos)	Penetración limitada (idónea para cajas de alimentos)	Radiación muy penetrante (idónea para palés de alimentos)
Duración del tratamiento	Duración razonable del proceso (minutos/horas)	Proceso muy rápido (segundos/minutos)	Duración media del proceso (minutos/horas)
Cuando no se utiliza	Siempre en marcha y debe colocarse en un lugar seguro cuando no se utiliza	Se puede apagar, por lo que ahorra energía	
Fase de desarrollo	Tecnología establecida, utilizada en investigaciones y a escala comercial	Debe desarrollarse más para poder aplicarla a los alimentos. Utilizada en investigaciones y a escala comercial, pero principalmente para productos no alimenticios	Tecnología en desarrollo. Se requieren más trabajos relacionados con su aplicación a los alimentos. Utilizada en algunas investigaciones y unas pocas instalaciones a escala comercial
Prevalencia	La mayoría de los alimentos irradiados se tratan en este tipo de instalaciones	Algunos productos alimenticios se tratan con haces de electrones	Una instalación a escala comercial utiliza rayos X para irradiar alimentos
Mantenimiento	La intensidad de la fuente disminuye con el tiempo y debe reemplazarse	Se requiere un buen suministro eléctrico y el aparato necesita mantenimiento	



Fig. D-4. Preparación de productos inocuos, para su exportación, con empleo de la tecnología de irradiación gamma, Hanoi (Viet Nam) [C. Blackburn, 2012].

D.2.3. Tendencias

167. En muchas partes del mundo resulta difícil suministrar fuentes de radioisótopos por temor al terrorismo y debido a las crecientes complejidades logísticas asociadas a su envío transfronterizo. Una de las principales razones del creciente interés en las tecnologías de haces de electrones y rayos X es que estas no plantean los problemas de adquisición, transporte, almacenamiento, disposición final y salvaguardias asociados a las fuentes de radioisótopos. Otra ventaja de la irradiación de alimentos mediante tecnologías con fuentes mecánicas es que no entraña el uso de material radiactivo y, por lo tanto, no tiene connotación nuclear, lo que mitiga las impresiones negativas de los consumidores. Por consiguiente, se prevé que las tecnologías de haces de electrones y rayos X se convertirán con el tiempo en otra opción para la irradiación de alimentos.

D.2.4. Exportaciones de productos alimenticios y comercio de alimentos irradiados

168. No existen muchos datos fiables sobre las cantidades de alimentos irradiados en todo el mundo, pero es sabido que anualmente una considerable y creciente cantidad de alimentos de alto valor se someten a irradiación y son objeto de comercio. En la mayoría de las regiones del mundo se somete a irradiación una pequeña, pero creciente, cantidad de productos alimenticios con objeto de cumplir los requisitos sanitarios. Por ejemplo, los datos publicados en 2012 indican que en la Unión Europea se irradiaron más de 9 263 toneladas de productos alimenticios, principalmente ancas de rana, aves de corral y especias.

169. Un porcentaje importante y cada vez más elevado de alimentos se somete a irradiación por razones fitosanitarias (por ejemplo, con fines de erradicación de la mosca de la fruta, ácaros y cochinillas harinosas) y esta aplicación comercial relativamente nueva está estimulando el comercio de alimentos irradiados. Por ejemplo, las frutas y verduras frescas se irradian a dosis bajas (menos de 1 kGy) para su exportación a los Estados Unidos, tras la decisión del Servicio de Inspección Sanitaria Animal y Vegetal (APHIS) de permitir la irradiación como tratamiento de cuarentena

“genérico” contra las plagas de insectos, excluidas las polillas en determinadas etapas de su vida. El APHIS también permite ya la irradiación de mangos del Pakistán a su llegada a los Estados Unidos, y en México se está creando más capacidad de irradiación con miras a atender a las necesidades del mercado estadounidense. Asimismo, una novedad reciente en materia de reglamentación en los Estados Unidos ha sido la aprobación de instalaciones de rayos gamma y haces de electrones para el tratamiento de productos frescos importados en el punto de importación. Los empresarios están aprovechando estas aprobaciones, para estimular el interés de países que de otra manera no tendrían la capacidad para irradiar alimentos. Es probable que el comercio de frutas y verduras frescas irradiadas continúe aumentando rápidamente.

170. Varios países, entre ellos, Australia, Estados Unidos de América, India, México, Nueva Zelandia, Tailandia y Viet Nam, comercian con productos frescos irradiados. Ese comercio está impulsando una creciente tendencia a la armonización interregional de los enfoques y las estrategias nacionales relacionados con la comercialización de la irradiación de alimentos mediante el control de plagas de insectos de importancia desde el punto de vista de la cuarentena con respecto a los productos frescos. Esta tendencia está respaldada por las Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria, comprendidas las normas elaboradas en el marco de iniciativas de investigación del Organismo, como las directrices para utilizar la irradiación como medida fitosanitaria y como tratamientos fitosanitarios para plagas reglamentadas; esta última abarca catorce tratamientos fitosanitarios por irradiación acordados internacionalmente, desarrollados en el marco de proyectos coordinados de investigación del Organismo.

D.2.5. Conclusiones

171. El aumento de la urbanización, el crecimiento de la población y el cambio climático suscitan inquietud respecto de la disponibilidad y asequibilidad de alimentos inocuos, sanos y de alta calidad. Los métodos convencionales utilizados para reducir al mínimo las pérdidas de alimentos posteriores a la cosecha, entre ellos la fumigación y otros tratamientos químicos, son objeto de creciente escrutinio a raíz de sus consecuencias potencialmente peligrosas para el público y el medio ambiente, como es el caso de determinados tratamientos químicos que están restringidos en virtud de las disposiciones del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. Es preciso recurrir mayormente a la irradiación de alimentos, especialmente las tecnologías de irradiación con haces de electrones y rayos X, a fin de que en los próximos años se pueda lograr una mejora considerable de la disponibilidad y asequibilidad de los alimentos. Mediante estas tecnologías se puede proporcionar un tratamiento eficaz y seguro para garantizar la calidad de los alimentos y reducir las pérdidas posteriores a las cosechas en todo el mundo.

172. Es probable que los adelantos futuros abarquen las investigaciones encaminadas a aumentar aún más la capacidad de irradiación de alimentos mediante tecnologías de irradiación con haces de electrones y rayos X. Estas nuevas tecnologías serán importantes para los reguladores, los encargados de elaborar políticas, los investigadores y las industrias alimentarias en el establecimiento de iniciativas y políticas destinadas a incrementar el comercio de alimentos irradiados.

173. La irradiación también proporciona un tratamiento posterior a la cosecha que permite garantizar que las exportaciones cumplan los requisitos de higiene y cuarentena, obteniendo así acceso a los mercados de exportación y los intercambios internacionales y ayudando de esa forma a generar ingresos que pueden beneficiar directamente a los productores de alimentos que de otro modo no podrían sacar provecho de las oportunidades de comercio internacional.

E. Novedades en la lucha contra el cáncer mediante el empleo de tecnologías nucleares

E.1. Adelantos recientes en la radioterapia contra el cáncer

174. La radioterapia permite tratar eficazmente el cáncer al administrar una dosis exacta a un tumor causando daños mínimos a los tejidos normales que lo rodean. Los adelantos recientes en la radioterapia con fotones ofrecen ventajas potencialmente considerables en comparación con la radioterapia convencional. Estos adelantos abarcan técnicas tales como la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), la radioterapia guiada por imágenes (IGRT), la radioterapia estereotáctica, la radiocirugía estereotáctica, la radioterapia estereotáctica corporal, la radioterapia robótica, la tomoterapia helicoidal, la arcoterapia volumétrica modulada (VMAT) y la radioterapia adaptada a la respiración. Esas tecnologías se presentaron brevemente en el *Examen de la tecnología nuclear 2012*³¹.

E.1.1 Cuestiones relacionadas con la implantación de estas tecnologías

175. Algunas de las tecnologías antes mencionadas permiten administrar con precisión y de manera no invasiva dosis de radiación anteriormente inimaginables a un volumen tumoral discretamente definido. Estas tecnologías podrían tener ventajas tales como mejor distribución de la dosis, menor toxicidad, rápida administración del tratamiento y control local más preciso, factores que redundan en el aumento de las probabilidades de supervivencia. Ahora bien, estas tecnologías se encuentran en distintas fases de desarrollo clínico y su aceptación en la práctica médica difundida dependerá de la obtención de más datos de apoyo de ensayos aleatorios bien diseñados³². Ya hay pruebas que indican que la IMRT facilita la tarea de evitar que los tejidos normales se vean afectados. Por ejemplo, de un estudio reciente de las pruebas clínicas realizadas en relación con la IMRT³³ se desprende que en el caso de los pacientes con cáncer avanzado de cabeza y cuello sometidos a este tipo de radioterapia se conserva la producción de saliva por la parótida y se reduce la xerostomía aguda y tardía (sequedad de la boca). Asimismo, en el caso de los pacientes con cáncer de próstata se reduce la toxicidad rectal tardía, lo que permite intensificar la dosis de manera segura, y en el caso de varias otras localizaciones de tumores también parece reducirse la toxicidad. En el caso del cáncer de mama, la IMRT permite reducir la toxicidad aguda y mejorar la estética en comparación con la radioterapia convencional tangencial en mama.

176. La radioterapia conformada tridimensional (3D-CRT) básica es considerada hoy en día el enfoque técnico ordinario y ofrece tratamiento de buena calidad, y a un costo razonable, a la mayoría de los pacientes. Algunas de las nuevas tecnologías, como la radioterapia con iones de carbono, la radioterapia con protones o la radioterapia estereotáctica corporal, son idóneas para determinados tipos de cáncer y situaciones clínicas específicas, pero no pueden reemplazar la radioterapia tradicional ordinaria basada en la radioterapia conformada tridimensional con fotones.

177. A fin de seleccionar la tecnología más idónea, es necesario disponer de información clara sobre las tecnologías utilizadas. Las primeras pruebas relacionadas con algunas de las tecnologías se han centrado principalmente en la viabilidad de los entornos clínicos como principal punto final, mientras que recientemente el énfasis se ha hecho en los resultados prácticos. Las nuevas tecnologías también deben evaluarse en función de parámetros que incorporen mediciones relacionadas con la calidad de vida, tales como los resultados notificados por los pacientes y los años de vida ajustados por calidad³⁴.

³¹ IAEA NTR 2012

³² Rosenblatt et al. *Radiother & Oncol*, 2012

³³ Staffurth J. *Clinical Oncol* 2010

³⁴ Vikram, Coleman and Deye. *Oncol* 2009, Parte I & Parte II



Fig. E-1. Acelerador lineal moderno equipado para IGRT. Este dispositivo permite aumentar la precisión de la radioterapia mediante la obtención frecuente de imágenes del blanco y/o los tejidos sanos justo antes del tratamiento y actuar en función de esas imágenes a fin de adaptar el blanco sometido a radiación. Fotografía: Eduardo Rosenblatt. Foro de la ESTRO, Londres 2011.

E.1.2 Costo y eficacia de las técnicas de radioterapia avanzadas

178. El uso de tecnologías de radioterapia nuevas y avanzadas depende de su costo y eficacia. Estas tecnologías tienen costos de capital y gastos de funcionamiento más altos, suponen programas de garantía de calidad (GC) más estrictos y requieren personal debidamente cualificado. En estos momentos se están elaborando procedimientos de GC que pueden satisfacer la demanda de tecnologías avanzadas y que deberán aplicarse conjuntamente con ensayos clínicos formales comparativos. La aplicación de opciones tecnológicas avanzadas en la radiooncología debe considerarse también en el contexto de las necesidades y prioridades generales, en que son importantes factores como la disponibilidad de profesionales especializados en radioterapia, la financiación y la capacidad de mantenimiento del equipo. Es necesario capacitar radiooncólogos, físicos médicos, técnicos de radioterapia, administradores e ingenieros de mantenimiento. Todos estos profesionales requieren amplia capacitación no solo en las nuevas tecnologías que deben aplicarse, sino también, con bastante frecuencia, a nivel de los requisitos académicos básicos necesarios para trabajar en esta esfera.



Fig. E-2. La radioterapia robótica es un sistema de radiocirugía robótica sin marco. Los dos principales elementos de este dispositivo son la radiación producida por un pequeño acelerador lineal, y un brazo robótico que permite dirigir la energía hacia cualquier parte del cuerpo desde cualquier dirección. Fotografía: Eduardo Rosenblatt. ESTRO Forum London 2011.

E.1.3 Radioterapia con partículas cargadas para el tratamiento del cáncer

179. Por radioterapia con partículas cargadas se entiende el uso de partículas subatómicas “más pesadas” en la radioterapia. Aunque el electrón puede considerarse una “partícula”, se utiliza habitualmente en la práctica clínica y no posee propiedades radiobiológicas extraordinarias. Cuando las partículas más pesadas (neutrones, protones, iones de carbono) se desplazan en el tejido, depositan más energía por unidad de desplazamiento (p. ej., cm). En consecuencia, es más probable que dañen el ADN y destruyan las células. Los fotones, o radiación basada en rayos X, depositan una alta dosis de radiación más cerca de la superficie del cuerpo. La dosis absorbida disminuye a medida que el fotón penetra en el tejido. Los protones depositan poca energía en la superficie del cuerpo. Además, los protones liberan la mayor cantidad de energía (o producen ionización densa) casi al final de su recorrido por el tejido. Esta liberación de energía se denomina pico de Bragg: antes del pico de Bragg la dosis de radiación es baja y después del pico se reduce a cero en una distancia muy corta.

180. El uso de la radioterapia con partículas cargadas para el tratamiento del cáncer tiene un largo historial. Se desarrolló a principios del decenio de 1950 cuando se aplicaron los primeros tratamientos con protones, a los que siguieron otros con piones negativos (partículas subatómicas cargadas) y haces de neutrones. En los dos últimos decenios se ha observado un mayor interés por la radioterapia con partículas cargadas, así como un avance en esta esfera, particularmente en la radioterapia con protones y la radioterapia con iones de carbono. Actualmente hay 40 centros de radioterapia con partículas cargadas en todo el mundo, incluso seis centros de radioterapia con iones de carbono. Además, se están construyendo y desarrollando 25 instalaciones³⁵.

181. No obstante, el costo sigue siendo un problema para esas instalaciones. Un análisis de costos de la radioterapia externa con iones, protones y fotones de carbono³⁶ indicó que los costos de capital oscilan entre 23 millones de euros y 138 millones de euros (según las combinaciones terapéuticas en particular), y los gastos corrientes, entre 9 millones de euros y 36 millones de euros anuales. En el caso de las instalaciones de protones, se han logrado soluciones comerciales compactas más nuevas. El costo de una sola máquina basada en estos nuevos modelos oscila en unos 16 millones de euros, en comparación con el costo de 95 millones de euros de la configuración tradicional de la instalación de protones.

182. Otro problema relacionado con la radioterapia con partículas cargadas es el grado hasta el cual las pruebas científicas disponibles sustentan la afirmación de que esta terapia es superior a la terapia estándar con haz de fotones para el tratamiento de tumores sólidos³⁷. Algunos expertos que trabajan en instalaciones de haces de partículas han afirmado que no hay necesidad ni justificación para que en los ensayos clínicos se comparen, por ejemplo, los protones con los fotones, ya que la distribución física de la dosis y la deposición de la energía son claramente superiores en el caso de los protones.

183. Sin embargo, otros expertos sostienen que, al igual que cualquier otra modalidad innovadora de tratamiento médico, se requieren pruebas científicas para poder justificar una modalidad que requiere una gran cantidad de recursos a diferencia del tratamiento estándar. La hipótesis de que la radioterapia con partículas cargadas es superior a la terapia con fotones basada en la distribución física de la dosis solamente no es suficiente, según se aduce, para justificar la sustitución de la terapia con haz de fotones por la radioterapia con partículas cargadas.

184. En consecuencia, se necesitan datos más pormenorizados sobre la radiobiología, la radiofísica y los resultados clínicos de la radioterapia con partículas cargadas.

³⁵ Grupo Cooperativo de Terapia de Partículas.

³⁶ Peeters y otros. *Radiother & Oncol*, 2010.

³⁷ Holtzscheiter y otros. *Radiother & Oncol*, 2012.

E.1.4. Braquiterapia

185. La braquiterapia consiste en administrar radioterapia mediante la colocación de fuentes radiactivas en los tumores o en su proximidad, o bien en las cavidades corporales. En los cánceres ginecológicos en particular, la braquiterapia ha pasado gradualmente del método bidimensional a la planificación tridimensional basada en imágenes transversales. En este método moderno, el paciente se somete a una tomografía computarizada o a imagenología por resonancia magnética después de que se han insertado los aplicadores de braquiterapia. Esto no solo hace posible ver los aplicadores, sino también el propio tumor, sus extensiones y los órganos vecinos que corren riesgo de daño radiológico. Seguidamente la dosis de radiación no se prescribe a un punto, como antes, sino a un volumen que abarca no solo el tumor canceroso y sus extensiones, sino también los volúmenes de alto riesgo de contaminación de células cancerosas³⁸.

186. Los costos pueden variar notablemente según la tecnología elegida. Algunas, como la braquiterapia tridimensional, la arcoterapia volumétrica modulada y la radioterapia estereotáctica, pueden utilizar algunos de los componentes de radioterapia ya instalados para la imagenología o la planificación. Otras, como las que emplean iones o protones de carbono, requieren una instalación completamente nueva y dedicada a esos fines.

187. Para complementar esas instalaciones es preciso establecer otros requisitos de garantía de calidad (GC), incluido el nuevo equipo, el personal suplementario, y el tiempo asignado a actividades de GC conexas.

188. La incorporación de la tecnología avanzada en los sistemas de tratamiento y su sostenibilidad exigen inversiones adicionales en edificios y equipo, más recursos humanos bien capacitados y costosos contratos de mantenimiento para el equipo complejo y delicado necesario.

E.2. Adelantos en radiofármacos para imagenología y terapia oncológicas

189. El cáncer es una enfermedad que se origina cuando el tejido bioquímico molecular interno de una célula se altera anormalmente y escapa de los mecanismos de control habituales que regulan el crecimiento de los tejidos a través de una compleja red celular de señales. Se trata de un proceso complicado, y aunque se han logrado importantes progresos, todavía faltan tratamientos eficaces para muchos tipos de cáncer. En la presente sección se destacan algunos avances en el estudio del cáncer en los niveles atómico y molecular.

E.2.1. Nanotecnología y nanomedicina

190. La nanotecnología consiste en la manipulación de la materia en los niveles atómico y molecular para crear nuevos materiales, dispositivos y estructuras. A nivel molecular, los átomos independientes pueden tener distintas propiedades en comparación con los mismos átomos agrupados.

191. El tamaño también es importante para combatir el cáncer a causa de las diferentes pautas de comportamiento que se producen a nivel atómico. Métodos sin precedentes basados en las propiedades particulares de ciertas nanoestructuras pueden ayudar a combatir el cáncer, y han llevado a la nueva esfera de la nanomedicina, definida como la aplicación médica de la nanotecnología. La nanomedicina explota las propiedades físicas, químicas y biológicas mejoradas, y a menudo novedosas, de los nanomateriales para facilitar la pronta detección y prevención del cáncer, y mejorar el diagnóstico, tratamiento y seguimiento de la enfermedad.

³⁸ Haie-Meder y otros, *Radiother & Oncol*, 2005.

E.2.2 Propiedades de los nanomateriales que podrían resultar beneficiosas para la terapia contra el cáncer

192. Los productos químicos citotóxicos y los compuestos radiomarcados (radiofármacos) han sido históricamente unos de los instrumentos más eficaces para tratar el cáncer. La quimioterapia y las terapias con radionucleidos destruyen las células cancerosas, pero también las células sanas. Por lo general los productos quimioterapéuticos y los radiofármacos consisten en pequeñas moléculas que pueden difundirse y penetrar fácilmente en los tejidos, pero la producción de medicamentos que discriminen entre el cáncer y las células normales sigue siendo difícil. Los nanomateriales, empero, pueden ofrecer la manera de seleccionar como blanco las células cancerosas sin dañar los tejidos sanos dada una deficiencia antes no explotada en la arquitectura tumoral. Los tumores requieren la formación de nuevos vasos sanguíneos que suministren oxígeno y otros nutrientes para que se mantenga su rápida replicación celular. Como resultado del rápido crecimiento de los nuevos vasos sanguíneos, estos se hacen irregulares y permeables y los vacíos en sus paredes aumentan más en número y tamaño que en los vasos sanguíneos sanos. Los vacíos pueden variar en tamaño desde unos pocos cientos a unos cuantos miles de nanómetros. En cambio, el tamaño de los poros de los vasos sanguíneos normales oscila entre 2 y 6 nanómetros. Las nanopartículas del orden de 10 a 300 nanómetros tienen un tamaño apropiado para atravesar los vacíos de los vasos sanguíneos tumorales sin penetrar significativamente en los tejidos sanos. En realidad, las nanopartículas se acumulan de todos modos selectivamente en el tejido tumoral como resultado de un fenómeno puramente físico conocido como efecto de incremento de la permeabilidad y retención (EPR).

193. Las nanopartículas tienen la capacidad para albergar una sustancia terapéutica dentro de su núcleo interno que se presta para ser utilizada en combinación con el EPR. De ese modo, la capa superficial de la nanopartícula protege el compuesto encapsulado durante su recorrido al blanco biológico. El contenido interno puede liberarse y surtir su efecto terapéutico después de llegar al tejido blanco. Se pueden concebir nanopartículas que liberen su carga terapéutica en respuesta a cambios físicos y químicos ocurridos en el sitio de destino, como por ejemplo, cuando se encuentren con el medio ácido del núcleo tumoral. Actualmente se realiza un gran número de ensayos clínicos en que se utilizan reformulaciones nanotecnológicas de productos quimioterapéuticos establecidos para tratar el cáncer.

E.2.3. Adelantos en la nanotecnología farmacéutica

194. En la terapia con radionucleidos se emplean vectores radiomarcados – radiofármacos – concebidos para llevar una fuente de radiación localizada al interior de la zona tumoral. Los radiofármacos tienen dos componentes para la dosificación, un vector y una cantidad insignificante de un radionucleido que se desintegra por medio de la emisión de partículas subnucleares. El efecto terapéutico en la terapia de tumores con radionucleidos se deriva de las partículas alfa o beta emitidas por el radionucleido y absorbidas por el tumor. El radiofármaco ideal debería transmitir el radionucleido selectivamente al tejido tumoral sin que la radiación llegue a los tejidos normales.

195. La investigación de radiofármacos novedosos dirigidos específicamente a tumores es hoy uno de los aspectos que atrae más interés en la imagenología y el tratamiento de los tumores. En este contexto, los recientes progresos alcanzados en la nanotecnología farmacéutica se han orientado a la elaboración de enfoques prometedores basados en el diseño de nanovectores novedosos destinados a mejorar los resultados de la radioterapia y la calidad del diagnóstico. Un problema importante es cómo fijar firmemente el radionucleido a su molécula vectora, y parece ser que el enfoque nanotecnológico puede resultar especialmente ventajoso. El encapsulamiento de unos cuantos átomos radiactivos dentro de la capa protectora de una nanopartícula constituye un método sencillo para evitar que se propague la radiactividad a los tejidos sanos y aplicar la carga terapéutica a las células cancerosas blanco. Los sistemas nanométricos adaptados actúan como vehículos de liberación de medicamentos que hacen posible administrar grandes dosis de radionucleidos en las células malignas sin afectar a los tejidos normales, reduciendo así considerablemente los efectos secundarios que generalmente producen muchas de las actuales terapias contra el cáncer.

E.2.4 Terapéutica dirigida a las células cancerosas

196. Otra característica importante de los nanosistemas es la relación extremadamente alta entre superficie y volumen que hace que la superficie externa (corona) de las nanopartículas sea especialmente idónea para el recubrimiento con un gran número de fracciones de moléculas capaces de aportar otras propiedades funcionales al sistema. Por ejemplo, las nanopartículas que llevan coronas con carga positiva (catiónicas) pueden penetrar fácilmente en la mayoría de las membranas celulares por tener estas una carga neta negativa. Por el contrario, las nanopartículas recubiertas con moléculas con carga neutra tienen una distribución diferente en el cuerpo y pueden acceder a otros blancos específicos. El recubrimiento de la superficie de la nanopartícula con moléculas funcionales, como anticuerpos o péptidos que lo hacen al interactuar con los receptores de la membrana externa de las células cancerosas, también puede aumentar la selectividad y especificidad del tumor. La superficie de las nanopartículas también podría recubrirse con moléculas que ayuden a evitar que sean reconocidas por el sistema inmunitario, así como con grupos de moléculas que ayuden a seguir la ruta de la partícula en el interior del cuerpo para asegurar que llegue al lugar previsto (Fig. E-3).

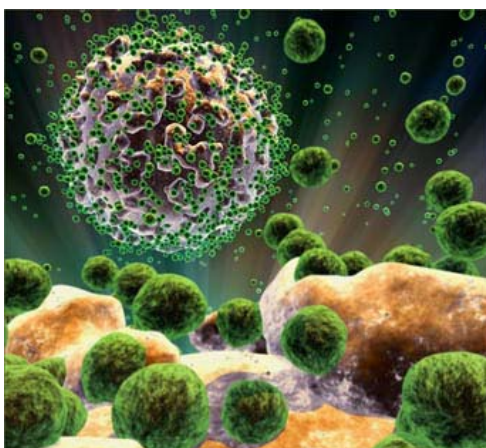


Fig. E-3. Representación pictórica de partículas globulares nanométricas (verde), compuestas por una cubierta protectora de moléculas lipídicas, flotando en los fluidos extracelulares y atacando las células cancerosas para liberar su carga terapéutica.

197. Se calcula que en 2006 aproximadamente 240 productos nanométricos fueron objeto de investigaciones farmacéuticas. Los nanoliposomas, que son burbujas huecas encerradas entre dos capas de lípidos, a menudo han sido el nanovector elegido para la administración de los radionucleidos terapéuticos presentes en su cavidad interna. En el cuadro E-1 figura una selección de radiofármacos nanoencapsulados dirigidos a tumores que están siendo objeto de evaluación clínica.

Cuadro E-1. Radiofármacos nanoencapsulados dirigidos a tumores

Nanovectores	Radionucleidos
Liposomas	Yodo 131, itrio 90, renio 188, cobre 67
Liposomas	Renio 186
Liposomas	Indio 111, renio 188
Liposomas	Indio 111, renio 188
Liposomas/inmunoliposomas	Actinio 225
Inmunoliposomas	Itrio 90
Liposomas y dendrímeros	Boro 10

198. Además de los liposomas, los investigadores están estudiando la posibilidad de utilizar varias nanoesferas naturales y artificiales, así como anticuerpos, ARN y ADN como vehículos nanométricos.

E.2.5. Actividades internacionales de investigación y desarrollo

199. Actualmente se lleva a cabo un gran número de investigaciones sobre el empleo de tecnologías de irradiación para sintetizar los vectores nanoestructurados con miras a la administración dirigida de productos terapéuticos. En el marco de un proyecto coordinado de investigación, la Argentina, el Brasil, China, Egipto, los Estados Unidos, Hungría, la India, Italia, Malasia, Polonia, la República de Corea, Serbia, Tailandia y Turquía han elaborado metodologías encaminadas a la síntesis de nanopartículas y nanogeles con el control preciso de la estructura, el tamaño y la funcionalidad del producto. Varios Estados Miembros también han trabajado para conseguir la compatibilidad de las instalaciones y los procedimientos actuales de irradiación en gran escala (Italia), y también han venido elaborando procedimientos relacionados con las nanopartículas y nanogeles basados en las proteínas (Argentina, Brasil), los polímeros naturales (Malasia y Tailandia), los polímeros sintéticos (Egipto, Hungría, Italia, Malasia, Polonia, la República de Corea y Turquía) y los compuestos inorgánicos (China, Francia, India, República de Corea y Serbia).

200. También se han creado procedimientos para nanoestructuras híbridas en que las superficies de las nanopartículas y los nanogeles se recubren con polímeros y biomoléculas funcionales para aumentar su biocompatibilidad (Francia, Italia y Tailandia). En Tailandia se produjeron nanopartículas basadas en el quitosano (sustancia producida del caparazón del camarón u otros crustáceos) mediante radiolisis. Estas nanopartículas y otras similares podrían ser posibles opciones para la inmovilización de radionucleidos seleccionados.

201. Aunque se han aplicado con éxito varios nanovectores específicos para visualizar y tratar modelos de tumores en fase preclínica y clínica, todavía hay numerosos problemas que resolver, como la estabilidad a largo plazo de los nanovectores, la intensificación de su producción, su posible toxicidad y sus productos de degradación.

E.2.6. Conclusiones

202. Comparada con la terapia con radionucleidos dirigida convencional, la terapia multifuncional dirigida con nanovectores puede liberar una carga mayor de radionucleidos, productos quimioterapéuticos y/o agentes imagenológicos a las células tumorales. Ello puede contribuir de manera importante a mejorar el tratamiento contra el cáncer al destruir selectivamente las células muertas y a la vez dejar ilesos los tejidos, reduciendo así los efectos secundarios y proporcionando mayor comodidad al paciente. Con todo, todavía quedan problemas por solucionar, entre ellos la estabilidad a largo plazo y la no toxicidad de los nanovectores y el perfeccionamiento satisfactorio del método de síntesis a escala industrial, manteniendo al mismo tiempo las especificaciones de los productos. Estos retos tendrán que abordarse mediante la ampliación de la cooperación entre los físicos, químicos, los biólogos, los médicos, las instituciones, los hospitales, la industria y las organizaciones internacionales.

F. Tecnología nuclear para abordar los efectos del cambio climático

F.1. Transformar la agricultura para hacer frente a los desafíos del cambio climático

203. Se prevé que la población mundial aumente a más de 9 000 millones de habitantes para 2050, lo que creará una demanda de mayor producción agrícola. A medida que hace un uso excesivo del agua y los fertilizantes y la calidad y fertilidad del suelo se deterioran, la seguridad alimentaria global plantea un desafío importante. Además, el cambio climático repercute en la lluvia y los fenómenos meteorológicos que pueden reducir la disponibilidad de agua y tiene un impacto en las condiciones ambientales necesarias para la producción agrícola. El cambio climático afecta las actividades agrícolas, pero estas actividades también afectan al cambio climático. Se considera que la agricultura es una causa importante del cambio climático mundial ya que es responsable de más del 14 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) ³⁹. Por consiguiente, la agricultura debe sufrir una transformación significativa para hacer frente a los desafíos de adaptarse al cambio climático y mitigar sus efectos en la productividad de la tierra y la seguridad alimentaria mediante la identificación y utilización de nuevas tecnologías y prácticas que reduzcan la huella de GEI de la agricultura.

F.1.1. Abordar los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria mediante la agricultura climáticamente inteligente

204. La FAO y sus asociados promueven la transición a una agricultura climáticamente inteligente. Esta se define como la agricultura que de forma sostenible aumenta la productividad y la resiliencia (adaptación), reduce/elimina los gases de efecto invernadero (mitigación) al tiempo que contribuye a la consecución de los objetivos nacionales de seguridad alimentaria y desarrollo.

205. La agricultura climáticamente inteligente aborda tanto la adaptación al cambio climático como su mitigación. La adaptación del sector agrícola es necesaria para evitar pérdidas y crear resiliencia. Entre las prácticas de adaptación cabe citar la agricultura de conservación, la mejora de la eficiencia en el uso del agua, la recogida de agua, la diversificación de cultivos, la selección de razas de animales, y el uso de sistemas integrados de producción agropecuaria. La mitigación incluye la aplicación de medidas para reducir las emisiones de GEI procedentes de las aplicaciones de fertilizantes químicos y estiércol de origen animal y potenciar al mismo tiempo la retirada de esos gases de la atmósfera mediante las plantas para su posterior almacenamiento en la materia orgánica del suelo.

206. En 2012, el Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición que presta apoyo al Comité de Seguridad Alimentaria Mundial señaló la importancia de formular estrategias para lograr una agricultura climáticamente resiliente y la seguridad alimentaria. En este contexto, la agricultura climáticamente inteligente revitaliza la producción de alimentos y el desarrollo rural, en particular en los países en desarrollo, de forma sostenible en los planos económico, social y ambiental. Ese tipo de agricultura que genera pocas emisiones no compromete la seguridad alimentaria pues los recursos se utilizan de forma más eficiente y se reduce el consumo de energía.

³⁹ FAO, (2012). Mainstreaming climate-smart agriculture into a broader landscape approach. Documento de antecedentes para la segunda Conferencia Global sobre Agricultura, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático. Hanoi (Viet Nam) 3 a 7 de septiembre de 2012.

F.1.2. La función de las técnicas nucleares en la agricultura climáticamente inteligente



Fig. F-1. Los residuos de los cultivos que se dejan en la superficie de la plantación de café reducen la evaporación del suelo, Vietnam

207. Es necesario disponer de información sobre la proporción de agua que absorben las plantas para su uso (transpiración) y de agua perdida por evaporación del suelo con objeto de mejorar la productividad de la agricultura, que es esencial – particularmente en entornos donde el agua escasea— para reducir el uso del agua en general. Esta información puede utilizarse para establecer prácticas de gestión que permitan potenciar al máximo el uso del agua y ampliar los conocimientos sobre el origen de la salinidad del suelo. La medición de las huellas isotópicas de oxígeno-18 y deuterio en el agua de riego y en el agua presente en el suelo, las plantas y la atmósfera en torno a los cultivos puede utilizarse para separar la evaporación y la transpiración así como para estimar la correspondiente pérdida de agua de los suelos regados. Esta técnica puede utilizarse para cuantificar el agua utilizada por la planta y la pérdida de agua debida a la evaporación en diferentes etapas de crecimiento de los cultivos y en diferentes sistemas de riego así como para ampliar los conocimientos sobre el origen de la salinidad del suelo. Esto es útil para desarrollar nuevas prácticas y tecnologías que permitan mejorar el riego, la productividad del agua para cultivos y la gestión de la salinidad del suelo y el agua.



Fig. F-2. Agua recogida en estanques de explotaciones agrícolas para el riego en zonas de agricultura de secano, Brasil

208. La materia orgánica del suelo (MOS) es un componente importante de su fertilidad y calidad. El carbono y el nitrógeno son dos elementos esenciales de la MOS. Parte de la MOS se descompone cuando hay humedad y el dióxido de carbono (CO_2) se libera a la atmósfera. La otra parte es estable y no se descompone, y en consecuencia no se libera CO_2 a la atmósfera. La adición de residuos de cultivos y de estiércol de origen animal, así como la introducción del cultivo de legumbres y la rotación de cultivos aumenta la MOS. Las huellas isotópicas del carbono y el nitrógeno (carbono-13 y nitrógeno-15) en el suelo y los gases CO_2 y óxido nitroso (N_2O) que se liberan pueden medirse in situ mediante instrumentos portátiles sobre el terreno y utilizarse para cuantificar las fuentes de la materia orgánica perdida de los suelos agrícolas. Esta información puede utilizarse para identificar prácticas de gestión que incorporen más MOS con carbono y nitrógeno estables y, en consecuencia, reduzcan las emisiones de CO_2 y N_2O del suelo.

209. La información sobre la demanda de agua de los cultivos es importante para la planificación precisa del riego con objeto de prever el rendimiento de los cultivos en el contexto del cambio climático. Para estimar esta demanda es necesario disponer de datos sobre el contenido de agua del suelo de toda una zona. En el pasado esto ha planteado un desafío ya que la mayor parte de las mediciones del agua del suelo se basan en puntos determinados. Esto significa que es preciso hacer muchas mediciones, lo que resulta costoso y requiere tiempo. Los recientes avances en el uso de neutrones generados de forma natural por los rayos cósmicos y los suelos permiten complementar las mediciones en puntos determinados para proporcionar una medición fiable del contenido del agua del suelo en todo el terreno y, por consiguiente, integrar los datos sobre la humedad del suelo de una zona amplia (hasta 40 ha). La tecnología también ofrece información sobre el contenido del agua del suelo hasta una profundidad de 70 cm y puede utilizarse para evaluar la uniformidad y eficiencia de la distribución del agua por lo que resulta más fácil programar el riego cuándo y dónde se necesita y, en consecuencia, reducir las necesidades globales de agua.

210. Deben desarrollarse variedades de cultivos que rindan más con menos insumos y se adapten mejor a medios desfavorables a causa del cambio climático. La inducción de mutaciones mediante el uso de técnicas nucleares genera una variación genética y contribuye a mejorar la biodiversidad. La fitotecnia por mutaciones se utiliza para desarrollar variedades que tienen mayor productividad y mayor estabilidad del rendimiento en medios desfavorables, incluidas las variaciones climáticas que causan inundaciones, sequías, vientos fuertes y temperaturas extremas. Las variedades mutantes mejoradas ayudan a reducir el uso de la tierra y a conseguir una agricultura mejor, más inocua para el medio ambiente. Un ejemplo son las variedades mutantes de cebada resistentes, desarrolladas para soportar duras condiciones meteorológicas a 5 000 m por encima del nivel del mar en el Perú. Esas variedades mutantes han mejorado la seguridad alimentaria de siete millones de personas pertenecientes a pueblos autóctonos de los Andes y han mejorado sus medios de vida. Además, en las zonas costeras de Bangladesh se han introducido variedades mutantes de arroz tolerantes a la sal. Esas variedades mutantes pueden crecer en suelos salinos y, por consiguiente, pueden utilizarse nuevas zonas para la producción agrícola.

211. El mayor avance será el desarrollo de métodos fitotécnicos acelerados para obtener los rasgos mutantes deseados, que podrían reducir el ciclo de reproducción de 10-15 a 2-3 años, dando así una respuesta rápida a las necesidades de los Estados Miembros respecto del desarrollo de nuevas variedades de cultivos con determinados rasgos como, por ejemplo, períodos de crecimiento más cortos y resistencia a las tensiones relacionadas con el agua y la salinidad, así como a las tormentas y las temperaturas extremas.



Fig. F-3. Cebada tolerante al granizo en el Altiplano del Perú. La mutación de esas variedades de cebada produce una espiga inclinada y, en consecuencia, quedan protegidas del daño que pueden causar las tormentas. Esto ha permitido cultivar cebada a altitudes sin precedentes y ha multiplicado por 6 el rendimiento de los cultivos de cebada en el Perú.

212. Un desafío importante es criar animales saludables que puedan sobrevivir con recursos forrajeros más reducidos, y al mismo tiempo aumentar la utilización de la energía que obtienen de sus piensos y mitigar las emisiones de gas de efecto invernadero generadas como producto secundario. Se realizan análisis metabólicos y genéticos del sistema digestivo del ganado para caracterizar o determinar la ecología y diversidad de los metanógenos con objeto de definir qué microorganismos están presentes y su función en la digestión de los componentes nutritivos. Esto permite formular estrategias que optimicen la eficiencia de los microorganismos ruminales y/o de los aditivos de piensos basados en el rumen para aumentar la absorción de energía y disminuir las emisiones de metano y CO₂. Además, el uso de marcadores genéticos para seleccionar donantes de semen a fin de obtener los rasgos deseados, como la adaptabilidad a medios cálidos y húmedos, la resistencia a las enfermedades y la mejora de la producción de leche y carne, ayudará a potenciar la industria ganadera en los próximos decenios. Para medir los parámetros buscados, en todas esas investigaciones se utilizan técnicas nucleares y conexas, ya sea como trazadores (marcado isotópico de componentes nutritivos para trazar sus vías metabólicas) o como métodos de laboratorio (radioinmunoanálisis, análisis de genética molecular, etc.).

F.1.3. Conclusiones

213. La agricultura climáticamente inteligente requiere información sobre los factores y agentes que influyen en la interacción entre el suelo, el agua, los cultivos y el ganado para que el sistema agrícola pueda adaptarse eficazmente al cambio climático. Es sumamente importante supervisar y evaluar las diferentes estrategias de adaptación y mitigación que se apliquen en las explotaciones agrícolas para promover mejores prácticas de gestión de esas explotaciones a fin de mejorar la resiliencia, la seguridad alimentaria y los beneficios a largo plazo. Las técnicas isotópicas y nucleares aportan nueva información para apoyar la mejora continua de la agricultura climáticamente inteligente.

F.2. Técnicas nucleares para estudiar el cambio climático y su impacto en el medio marino



Fig. F-4. Los recursos costeros se ven amenazados por el cambio climático; entre ellos, los arrecifes coralinos son reservas de biodiversidad, así como hábitat y viveros de muchas especies marinas (Fotografía: Robert B. Dunbar).

214. Es muy importante elaborar instrumentos y estrategias que permitan la adaptación del medio marino y sus recursos al cambio climático, así como la mitigación del impacto de ese cambio sobre ellos. Tal como se destaca en el Pacto de los Océanos del Secretario General de las Naciones Unidas y en los debates internacionales celebrados durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río+20), para alcanzar este objetivo se precisará una mayor cooperación internacional en las investigaciones científicas del medio marino, su monitorización y observación, en particular de los ecosistemas más vulnerables.

215. Desde el siglo XIX, la concentración atmosférica de CO₂ ha pasado de 280 partes por millón (ppm) a 390 ppm en 2011. El CO₂ es el principal gas de efecto invernadero que regula el equilibrio térmico global en la Tierra. El océano absorbe aproximadamente un tercio del total de emisiones de CO₂ de origen humano anuales que se derivan principalmente de la quema de combustibles fósiles y los cambios en la utilización de la tierra.

216. Se sabe que el incremento de CO₂ atmosférico es uno de los factores que más contribuyen al cambio climático y los problemas conexos, como el calentamiento global, el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el agotamiento del oxígeno y el aumento de la frecuencia e intensidad de sucesos meteorológicos extremos. A su vez, el cambio climático tiene diversos efectos importantes directos e indirectos en los recursos pesqueros, la acuicultura costera, los arrecifes coralinos y otros recursos costeros, así como en los patrones de habitabilidad humana en las grandes ciudades costeras de baja altitud. Las alteraciones del ciclo del agua también provocan cambios en la erosión costera y en la distribución, el transporte y la biodisponibilidad de nutrientes y contaminantes que pueden dar lugar a la eutrofización (proceso por el que el agua pasa a ser demasiado rica en nutrientes, lo que promueve el crecimiento y posterior descomposición de algas y plantas que consumirán más oxígeno y, en última instancia, producen el agotamiento del oxígeno en el agua) y a la contaminación de alimentos marinos y productos de acuicultura.

217. Las tecnologías nucleares son importantes para entender algunas de las preguntas científicas fundamentales relacionadas con el impacto de las condiciones ambientales de los océanos en los ecosistemas y organismos marinos.

218. Es posible utilizar los radionucleidos y los isótopos estables para estudiar numerosos parámetros ambientales en estudios climáticos históricos, como la temperatura, las precipitaciones y la acidez del agua de mar. Los glaciares, los sedimentos, las capas de hielo y los corales pueden utilizarse como “sistemas de almacenamiento” o “registradores” de las condiciones ambientales en el momento de su formación. Los radionucleidos y los isótopos estables también se pueden emplear para entender mejor procesos fisiológicos como la calcificación o la bioacumulación de productos químicos y las respuestas conexas de los organismos a unas condiciones ambientales cambiantes.

219. En los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente se han utilizado y desarrollado técnicas nucleares e isotópicas para contribuir al entendimiento global de los cambios en el medio marino en relación con el cambio climático, comprendidos el calentamiento y la acidificación de los océanos.

F.2.1. El Niño/Oscilación Austral

220. El fenómeno de El Niño/Oscilación Austral (ENSO) es un espectacular suceso climático que se da cada pocos años y tiene gran incidencia en el tiempo y las economías de muchos países de la región del Pacífico. También tiene efectos en la formación de hielo en el océano Antártico. La Oscilación Austral va unida a variaciones en la temperatura en la superficie del agua del mar en la zona tropical oriental del océano Pacífico (el calentamiento y enfriamiento se conocen, respectivamente, como El Niño y La Niña) y en la presión del aire en la superficie en la zona tropical occidental del Pacífico. También modifica la circulación oceánica a escala local, que es uno de los procesos clave que controlan el clima de nuestro planeta.

221. Los extremos de estas oscilaciones de las pautas climáticas dan lugar a graves sucesos meteorológicos como inundaciones y sequías en muchas regiones del mundo y tienen repercusiones muy importantes en la pesca para muchos países. Los países más afectados son los que dependen de la agricultura y la pesca, especialmente los que lindan con el océano Pacífico.

222. Los estudios realizados sobre el fenómeno del ENSO utilizando tanto radionucleidos como isótopos estables indican que durante los episodios de El Niño, las temperaturas oceánicas en el trópico y los subtrópicos cambian y van acompañadas de variabilidad en la evaporación y el fraccionamiento isotópico, que son cambios en las composiciones de los isótopos de deuterio, carbono 13, carbono 14 y oxígeno 18 del agua de mar. Estos cambios pueden estudiarse en sedimentos, corales, glaciares, depósitos de agua de cuevas o anillos de crecimiento de los árboles. Las investigaciones ayudan a explicar los episodios del fenómeno del ENSO durante períodos que se remontan a varios milenios.

F.2.2. El ciclo del carbono

223. El océano es un importante sumidero de carbono y la captura de cantidades cada vez mayores de CO₂ está haciendo que aumente su acidez. El “hundimiento de partículas” es el principal mecanismo por el que se transportan carbono y contaminantes de la superficie del océano al fondo marino. Ello incluye el carbono atmosférico, que se convierte de CO₂ en biomasa y queda secuestrado en las aguas profundas mediante el hundimiento de las partículas. Por consiguiente, es esencial entender los mecanismos que controlan los flujos de material desde la superficie del océano hasta los fondos oceánicos.

224. El radionucleido natural torio 234 se ha utilizado cada vez más para cuantificar los flujos de partículas y la exportación de carbono de las capas superiores del océano, tanto en alta mar como en entornos costeros. El torio 234 es un isótopo que reacciona con las partículas y que se produce en el agua de mar por la desintegración radiactiva de su predecesor disuelto, el uranio 238. El desequilibrio entre el uranio 238 y la actividad total medida del torio 234 refleja la tasa neta de exportación de partículas de la superficie del océano en escalas de tiempo de días a semanas.

225. Varios procesos ambientales relacionados con el cambio climático pueden alterar el ciclo del carbono y el secuestro de este en los océanos. El aumento del CO₂ atmosférico y el consiguiente aumento de CO₂ en el agua de mar están afectando gradualmente la acidez de los océanos. El aumento de la acidez del agua puede incidir en varios procesos biológicos que dan lugar a la formación y sedimentación de partículas a través de la columna de agua (una teórica columna de agua que va desde la superficie hasta el fondo del mar). Los cambios de temperatura afectan la cronología de las estaciones primavera-verano en la estratificación de la columna de agua en muchas zonas geográficas del mundo. Esto afecta a la dinámica de la exportación de partículas y carbono, ya que la estratificación de la columna de agua es un proceso físico clave en el flujo descendente de partículas. Ya se ha observado que unas temperaturas más cálidas afectan a la extensión y el grosor del hielo marino en las latitudes altas.

F.2.3. Impacto de la acidificación de los océanos

226. Mediante estudios basados en modelos se ha determinado con clara certeza que las regiones polares y tropicales son particularmente vulnerables a los efectos combinados del aumento de las temperaturas y la acidificación de los océanos que se dan por el cambio climático. El Organismo está elaborando estudios experimentales para investigar los efectos de la acidificación de los océanos a fin de poder predecir mejor sus repercusiones en la biodiversidad marina.

227. Los radioisótopos son instrumentos valiosos para investigar las respuestas de los organismos marinos al aumento de la temperatura, el incremento de la presión parcial del dióxido de carbono ($p\text{CO}_2$), y

la reducción de la salinidad y el contenido de oxígeno. Se han utilizado para dar pruebas que describan algunos de los efectos biológicos que cabe prever que acompañarán a los cambios globales en los océanos. Las técnicas nucleares se utilizan para estudiar diversos procesos biológicos importantes, entre ellos la calcificación, la biomineralización, el metabolismo y la bioacumulación de oligoelementos.

228. El isótopo calcio 45, que emite partículas beta, se suele utilizar actualmente para medir las tasas de calcificación de muchas especies, comprendidas las especies de corales que crean arrecifes. Proporciona una buena estimación de la tasa neta de calcificación en estructuras calcáreas. Es posible investigar la biomineralización mediante la incorporación de otros elementos importantes de las estructuras calcáreas, como el estroncio 85.

229. Los radioisótopos han sido particularmente útiles en la investigación de los procesos metabólicos en condiciones ambientales opuestas. Por ejemplo, la metaloenzima de zinc anhidrasa carbónica cataliza la captación de carbono por los organismos marinos para la fotosíntesis, los procesos de biomineralización y el equilibrio sistémico ácido-base y puede dar lugar a la acidificación oceánica o el agotamiento del oxígeno del agua de mar. El radioisótopo zinc 65 se emplea para evaluar el efecto de la $p\text{CO}_2$ elevada en los metabolismos de los organismos mediante el estudio de su cinética de captación. De forma más general, radioisótopos como el cobalto 57, el cobalto 60, el manganeso 54 o el selenio 75 revisten interés por la importancia metabólica de sus correspondientes isótopos estables. Estos oligoelementos desempeñan funciones fisiológicas esenciales y pueden verse afectados por el calentamiento, la acidificación oceánica, la hipoxia (agotamiento del oxígeno) o cambios en la salinidad. Se han estudiado procesos fisiológicos específicos como la regulación iónica utilizando técnicas muy sensibles que emplean radiotrazadores como el sodio 22 y el cloro 36.

F.2.4. Efectos futuros

230. En el futuro, se prevé que los cambios en la química de los carbonatos de los océanos debido a la acidificación, o en su salinidad debido al aumento de las emisiones de agua dulce en las zonas costeras, alteren la especiación química de los oligoelementos y modifiquen su biodisponibilidad para los organismos marinos. Además, la temperatura, la hipercapnia (CO_2 elevado), la hipoxia (O_2 reducido) y el cambio de la salinidad obstaculizarán las funciones fisiológicas como la regulación iónica. Los radiotrazadores disueltos pueden utilizarse para investigar las capacidades de bioacumulación ante un aumento de la $p\text{CO}_2$. El análisis con radioisótopos ha facilitado datos valiosos para entender los mecanismos de la toxicidad en los organismos marinos y evaluar los riesgos de contaminación de los alimentos marinos para consumo humano. Se trata de técnicas muy sensibles y con gran resolución que pueden utilizarse para entender los efectos causados por el carbono en los organismos marinos y reducir la incertidumbre existente en cuanto a las consecuencias biológicas de los cambios en la química de los océanos. Para producir modelos precisos de los efectos en la pesca y estimaciones de los impactos socioeconómicos de la acidificación de los océanos, es esencial que los datos sean fiables y la incertidumbre reducida.

F.2.5. Los isótopos estables en los estudios sobre el cambio climático

231. Se están utilizando isótopos estables para estudiar procesos en los océanos muy relacionados con la acidificación oceánica debida al cambio climático y el ciclo global del carbono.

232. Los combustibles fósiles muestran una relación única de los dos isótopos estables del carbono (el carbono 12 y el carbono 13) y la combustión de esos combustibles deja una característica huella isotópica en la atmósfera. La invasión de esta señal antropógena en el océano ha sido monitorizada mediante la medición en los océanos de los isótopos del carbono y, en consecuencia, el carbono 13 puede utilizarse como huella para investigar el modo en que el océano actúa como sumidero de los gases de efecto invernadero. El carbono 13 disuelto en el agua de mar es captado asimismo por

organismos calcificadores, por lo que la huella del carbono 13 en los caparazones puede utilizarse como instrumento de datación paleoclimática. También se está llevando a cabo una reconstrucción de la acidez del agua de mar basada en la presencia de boro 11 en la composición isotópica de los corales masivos de larga vida. Se han utilizado ampliamente otros elementos, como los registros de isótopos del oxígeno (oxígeno 18/oxígeno 16) atrapados en caparazones de carbonato de microfósiles marinos, o en corales de larga vida, para estimar la temperatura de la superficie del mar en el pasado, la salinidad y los regímenes de circulación, como la intensidad y frecuencia de episodios del ENSO en el pasado, así como cambios conexos en los periodos glaciales-interglaciales. Los cambios a largo plazo en las relaciones isotópicas del oxígeno y el hidrógeno en las precipitaciones también reflejan las variaciones de las condiciones climáticas locales, por ejemplo, en las trayectorias de las tormentas, la trayectoria de las masas de aire, el historial de lluvias y la temperatura del aire, elementos todos ellos que se pueden ver muy influenciados por los cambios en la circulación de las masas de agua. Las relaciones isotópicas del nitrógeno también se han utilizado como registrador de los cambios en la productividad y los niveles de nutrientes de la columna de agua y el origen de compuestos del nitrógeno.

233. Otras técnicas nuevas que emplean isótopos estables para seguir el cambio climático son, entre otras, la medición de la composición de isótopos estables del carbono y el hidrógeno de biomarcadores lípidos específicos que se han conservado en archivos ambientales como los sedimentos. Es posible rastrear el origen de biomarcadores lípidos específicos, derivados de antiguos organismos vivos, hasta llegar a sus compuestos iniciales y su composición de isótopos estables refleja las condiciones ambientales y climáticas en el momento en que se produjeron. Por lo tanto, pueden utilizarse como indicadores para reconstruir la temperatura, los niveles de CO₂, la humedad, la productividad marina y las aportaciones de los sedimentos derivados de la erosión de los suelos, así como para evaluar la vegetación en cuencas hidrográficas y los impactos de las actividades humanas en escalas de tiempo geológicas.

F.2.6. Conclusiones

234. Las técnicas nucleares e isotópicas son instrumentos excepcionales que ayudan a entender las modificaciones químicas, biológicas y ecológicas del medio marino en relación con el cambio climático.

235. El reloj interno de los radionucleidos naturales hace posible datar los registradores ambientales, en los que elementos isotópicos indirectos se utilizan como numerosos parámetros ambientales. La reconstrucción de las condiciones climáticas históricas a partir de los caparazones de carbonato de los fósiles marinos, los corales de larga vida o los sedimentos puede utilizarse para predecir el comportamiento de parámetros como la temperatura, las precipitaciones o la acidez del agua de mar.

236. Estos conocimientos se precisan para estudiar los impactos ecológicos y socioeconómicos de las condiciones climáticas futuras en la vida y los ecosistemas marinos, incluidas la pesca y la acuicultura, y para ayudar a las sociedades a elaborar estrategias a fin de mitigar esas condiciones o adaptarse a ellas, lo que requerirá una mayor cooperación internacional constante en las investigaciones científicas del medio marino, su monitorización y observación, en particular de los ecosistemas más vulnerables.