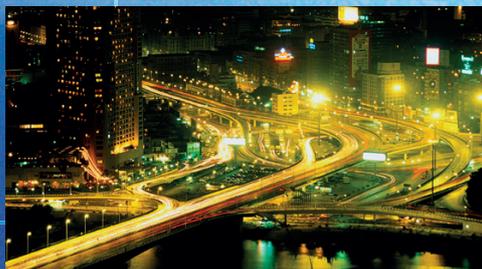


EXAMEN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR DE 2017



60 años

IAEA

Átomos para la paz y el desarrollo

Examen de la Tecnología Nuclear de 2017

GC(61)/INF/4

Impreso por el OIEA en Austria
Agosto de 2017
IAEA/NTR/2017

Prefacio

En respuesta a las solicitudes de los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio Examen de la Tecnología Nuclear.

En el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2017* se ponen de relieve avances notables habidos en el mundo en 2016 en las siguientes esferas seleccionadas: aplicaciones eléctricas, datos atómicos y nucleares, aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación, técnicas nucleares en la alimentación, gestión del suelo y del ganado, diagnóstico y tratamiento del cáncer, nuevos progresos en el estudio de los isótopos en la precipitación, efectos de la acidificación de los océanos y conservación del patrimonio cultural.

La versión preliminar se presentó a la Junta de Gobernadores en su reunión de marzo de 2017, en el documento GOV/2017/2. La presente versión definitiva se preparó teniendo en cuenta las deliberaciones habidas durante la Junta de Gobernadores, así como las observaciones recibidas por los Estados Miembros.

Índice

Informe principal.....	5
A. Aplicaciones eléctricas.....	5
A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad.....	5
A.1.1. Países en fase de incorporación.....	7
A.1.2. Países en fase de ampliación.....	7
A.1.3. Países con centrales nucleares en funcionamiento.....	8
A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica.....	9
A.3. Ciclo del combustible.....	11
A.3.1. Parte inicial.....	11
A.3.2. Garantía del suministro.....	15
A.3.3. Parte final.....	16
A.3.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos.....	18
A.4. Seguridad.....	23
B. Datos atómicos y nucleares.....	25
C. Aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación.....	27
C.1. Aceleradores.....	27
C.1.1. Técnicas novedosas de bombeo y sonda desarrolladas para la investigación <i>in situ</i> del deterioro por radiación.....	27
C.1.2. Nuevos dosímetros biocompatibles con haces iónicos focalizados.....	28
C.1.3. Dispersión neutrónica basada en aceleradores.....	28
C.2. Reactores de investigación.....	29
D. Alimentación y agricultura.....	32
D.1. Técnicas nucleares y otras técnicas conexas para determinar la autenticidad de los alimentos.....	32
D.1.1. Técnicas analíticas.....	33
D.2. Sonda de neutrones de rayos cósmicos: nuevo método para la vigilancia de la humedad del suelo en toda una zona.....	34
D.3. Mapeo de híbridos de irradiación para el desarrollo de herramientas genéticas en apoyo de los programas de mejora del ganado.....	36
D.3.1. Técnicas radioisotópicas para el mapeo del genoma del ganado.....	36
D.3.2. Aplicaciones de los mapas de híbridos de irradiación en la mejora del ganado.....	37
D.3.3. Consecuencias para la seguridad alimentaria y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	37
E. Salud humana.....	38
E.1. Avances en el manejo del cáncer de próstata. Diagnóstico y terapia.....	38
E.1.1. Antecedentes.....	38
E.1.2. Diagnóstico.....	38
E.1.3. Avances y tendencias recientes.....	39

F.	Recursos Hídricos.....	40
F.1.	Novedades en el uso de los isótopos en la precipitación para el estudio de la meteorología y el clima	40
G.	Medio ambiente.....	42
G.1.	Utilización de herramientas isotópicas para el estudio de la acidificación de los océanos	42
G.1.1.	Acidificación de los océanos - el otro problema del CO ₂	42
G.1.2.	Efectos biológicos de la acidificación de los océanos	43
G.1.3.	Aplicación de técnicas nucleares para entender los efectos de la acidificación de los océanos.....	44
H.	Tecnologías de la radiación	44
H.1.	Patrimonio cultural: Exploración y preservación con ayuda de tecnologías de la radiación.....	44
H.1.1.	Exploración y examen	45
H.1.2.	Uso de técnicas basadas en la radiación para la preservación y consolidación de artefactos.	46

Resumen ejecutivo

1. Al final de 2016, con 448 reactores en funcionamiento, la energía nuclear tenía una capacidad de generación mundial de 391 GW(e), aproximadamente 8,3 GW(e) más que en 2015. En 2016 se pusieron en régimen de parada definitiva tres reactores, se conectaron a la red diez reactores nuevos y se inició la construcción de tres. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen centradas en Asia, especialmente en China. De los 61 reactores en construcción, 40 están en Asia, al igual que 47 de los 55 reactores que se han conectado a la red desde 2005.
2. Treinta países utilizan actualmente la energía nucleoelectrica, y un número similar está estudiando la posibilidad de incluirla en su canasta energética, o está ya planificando esta medida o trabajando activamente en ella. De los 30 países con centrales nucleares activas, 13 están construyendo nuevas centrales o trabajando activamente para ultimar proyectos de construcción que se habían suspendido. Varios países que han decidido introducir la energía nucleoelectrica se encuentran en fases avanzadas de la preparación de la infraestructura.
3. Las proyecciones de 2016 del Organismo para 2030 indican un aumento de la capacidad nucleoelectrica mundial de entre el 1,9 %, en el escenario de capacidad baja, y el 56 %, en el de capacidad alta. La energía nucleoelectrica, con los efectos beneficiosos comprobados de sus bajas emisiones de carbono y con su gran capacidad y su producción distribuable, puede contribuir significativamente al cumplimiento del objetivo del Acuerdo de París de mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. Las tecnologías innovadoras de producción de energía nucleoelectrica podrían reducir aún más las emisiones de gases de efecto invernadero y abrir paso al uso de esta energía en nuevas aplicaciones.
4. En todo el mundo se siguió mejorando la seguridad de las centrales nucleares y, según los indicadores de seguridad de uso común, la seguridad operacional de estas centrales se mantuvo alta. El Organismo revisó sus publicaciones de la categoría de los Requisitos de Seguridad para incorporar en ellas las lecciones aprendidas del accidente de Fukushima Daiichi. También se revisaron otros dos documentos de esa categoría, uno relacionado con el liderazgo y la gestión en pro de la seguridad y el otro con la seguridad de los reactores de investigación.
5. Los bajos precios del uranio siguieron menoscabando los esfuerzos de las empresas por recaudar fondos para la exploración, los estudios de viabilidad, el inicio de nuevos proyectos de construcción y la ampliación de proyectos ya existentes. En la 26ª edición del ‘Libro Rojo’ bienal, un autorizado informe de referencia mundial, se señala que los recursos mundiales de uranio son más que suficientes para cubrir las necesidades del escenario de alta capacidad antes mencionado.
6. Las plantas de enriquecimiento y las otras instalaciones del ciclo del combustible funcionaron a niveles relativamente constantes. Se inició la construcción de una nueva instalación de almacenamiento para el Banco de Uranio Poco Enriquecido (UPE) del OIEA en Kazajstán, y las obras proceden según lo previsto.
7. El combustible gastado de los reactores nucleares que se encuentra almacenado alcanzó las 273 000 toneladas de metal pesado aproximadamente, y se acumula a razón de unas 7000 toneladas por año. Entraron en funcionamiento cinco instalaciones de almacenamiento de combustible gastado de reactores de potencia situadas fuera del emplazamiento de los reactores.
8. Para los próximos años se prevé una labor considerable en relación con la clausura de reactores en todo el mundo: 158 reactores nucleares de potencia están en régimen de parada definitiva o en fase de clausura. Más del 60 % de los reactores en funcionamiento tienen más de 30 años, y alrededor

del 15 % ha superado los 40 años. Aunque algunos pueden seguir funcionando más tiempo, muchos serán retirados del servicio en los próximos 20 años. Además, se han clausurado o están en proceso de clausura más de 480 reactores de investigación y conjuntos críticos, así como varios centenares de otras instalaciones del ciclo del combustible.

9. Varios países siguieron trabajando en proyectos para la disposición final geológica profunda de los desechos radiactivos. En todo el mundo hay instalaciones de disposición final operativas para todas las demás categorías de desechos radiactivos. Las opciones de reciclado y repatriación para la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso han ido en aumento. Varios países tienen proyectos de disposición final en pozos barrenados en diferentes fases de desarrollo. Las operaciones de retirada permitieron almacenar muchas de esas fuentes en condiciones adecuadas.

10. La Organización Internacional de Colaboración para una Biblioteca de Datos Evaluados ha promovido avances en las evaluaciones de la sección eficaz de captura de neutrones de los nucleidos correspondientes a isótopos del oxígeno, el hierro, el uranio y el plutonio que revisten particular interés para las tecnologías nucleares. La Red Internacional de Evaluadores de Datos de Estructuras y Desintegración Nucleares ha recibido un nuevo impulso a través del sitio web del LiveChart del Organismo y de la aplicación Isotope Browser para la consulta de información nuclear desde teléfonos inteligentes.

11. Los adelantos e innovaciones en la tecnología de los aceleradores incluyeron técnicas novedosas de espectroscopia de bombeo y sonda para la investigación *in situ* del deterioro por radiación, el desarrollo de nuevos dosímetros biocompatibles para las radiaciones, y la dispersión neutrónica basada en aceleradores.

12. Aproximadamente la mitad de los 249 reactores de investigación e instalaciones críticas en funcionamiento en 56 países tienen más de 40 años. Los principales desafíos para la comunidad que utiliza esos reactores son la gestión del envejecimiento, la sostenibilidad del suministro de combustible, las opciones relativas a la gestión del combustible gastado y la mejora de la utilización de los reactores de investigación. Siete países están construyendo nuevos reactores de investigación, y varios otros están planificando la construcción de reactores nuevos o estudiando la posibilidad de construirlos, como instalaciones nacionales clave para el desarrollo de infraestructura y programas de ciencia y tecnología nucleares, también en el sector de la energía nucleoelectrica. Iniciativas tales como el proyecto Reactor-Laboratorio por Internet del Organismo y el ICERR (Centro Internacional basado en Reactores de Investigación designado por el OIEA), así como redes y coaliciones internacionales, promueven la cooperación internacional en el uso de los reactores de investigación para la creación de capacidad nuclear.

13. Prosiguieron las actividades encaminadas a reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido (UME), entre ellas la devolución del combustible de UME de los reactores de investigación al país de origen. Los programas de devolución del combustible de UME de origen ruso y estadounidense han producido resultados encomiables a lo largo de los años.

14. A pesar de las interrupciones del servicio y los retos operacionales registrados en algunas instalaciones, en 2016 no hubo ninguna escasez importante en el suministro mundial de molibdeno 99, el isótopo de uso médico más común. Los principales productores siguieron haciendo progresos en sus esfuerzos por pasar del UME al UPE en sus procesos de producción.

15. La globalización del comercio de alimentos ha aumentado la necesidad de sistemas eficaces de control de los alimentos para proteger a los consumidores de la presentación fraudulenta de los productos alimenticios. Los fraudes alimentarios pueden suponer un riesgo para la salud, ya que los productos falsificados no se someten a los mismos controles y pueden contener ingredientes no declarados. La necesidad de métodos analíticos que respalden los mecanismos de autenticación y

rastreabilidad de los alimentos ha aumentado con rapidez. Una serie de técnicas analíticas nucleares o relacionadas con el ámbito nuclear que tienen una buena relación costo-eficacia, como la medición de los isótopos estables naturales de los bioelementos que constituyen los alimentos, pueden dar información sobre el origen geográfico y la técnica de producción de estos. Los avances recientes en la producción de instrumentos analíticos de mano a precios asequibles están facilitando la realización de pruebas de la autenticidad de los alimentos en múltiples puntos de la cadena alimentaria y aumentando considerablemente la eficacia de los sistemas de control.

16. La medición de las proporciones de los isótopos estables naturales de los bioelementos de los alimentos puede aportar información sobre su origen geográfico o sobre la técnica de producción empleada, mientras que el perfil de los elementos presentes en los alimentos da información importante sobre su inocuidad o toxicidad y puede ayudar también a vincular los alimentos con su lugar de origen. Estas técnicas, combinadas con otras tales como la espectroscopia vibracional, el análisis del ADN y la huella microbiana, están demostrando ser de enorme utilidad para la autenticación de los productos alimenticios.

17. La agricultura absorbe aproximadamente dos tercios del consumo mundial de agua dulce. A fin de lograr los rendimientos necesarios para alimentar a la creciente población, los sistemas agrícolas deben procurar aumentar su eficiencia. La sonda de neutrones de rayos cósmicos es un dispositivo novedoso que detecta y cuantifica el contenido de agua del suelo en una zona grande, sin los inconvenientes del carácter invasivo y el consumo de tiempo de los sistemas de evaluación tradicionales. La información sobre la humedad del suelo que proporciona este dispositivo está permitiendo mejorar la gestión de unos recursos hídricos cada vez más escasos.

18. Las herramientas genómicas, como las micromatrices de ADN, ayudan a estimar los valores de cría de los animales al nacer. Los mapas genéticos indican la localización precisa de diferentes rasgos en los cromosomas y son herramientas esenciales para identificar los genes y los marcadores responsables de las características productivas y la resistencia a las enfermedades. Las técnicas radioisotópicas pueden dejar atrás el engorroso proceso convencional de mapeo genético del ganado al simular eventos de recombinación genética y acelerar el proceso *in vitro*.

19. La elaboración y aplicación de mapas de híbridos de irradiación y de herramientas genómicas ayudarán a establecer programas de mejoramiento que aumenten la productividad del ganado y refuercen la seguridad alimentaria. Se han elaborado mapas genéticos de alta resolución para el ganado ovino, caprino y porcino y para los búfalos, y es posible elaborarlos para muchas otras especies ganaderas importantes. Los mapas han facilitado el desarrollo de micromatrices de ADN que se utilizan ampliamente para mejorar la productividad lechera del ganado vacuno.

20. El cáncer de próstata es, a nivel mundial, uno de los tres cánceres más comunes en el hombre y, junto con el cáncer de pulmón, hígado, estómago e intestino, es una de las causas más frecuentes de muerte por cáncer en el hombre. Más de la mitad de los pacientes que se someten a una prostatectomía o a radioterapia externa sufren una recidiva bioquímica. Recientemente se ha desarrollado una nueva molécula que actúa sobre el antígeno prostático específico de membrana (PSMA), una enzima vinculada a las células de cáncer prostático. El PSMA podría ser un excelente blanco molecular en el desarrollo de radiotrazadores para las imágenes de PET-TC, porque es capaz de detectar precozmente una recidiva de la enfermedad. Hay ensayos clínicos en curso.

21. La Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación (RMIP) del Organismo registra las relaciones isotópicas del oxígeno y el hidrógeno en las precipitaciones desde 1960. Los datos de la RMIP indican que las relaciones isotópicas experimentan grandes variaciones estacionales. Trabajos recientes del Organismo han revelado la existencia de una correlación sustancial entre las relaciones isotópicas y los procesos de las nubes que causan la precipitación. Este nuevo conocimiento ampliará

considerablemente la utilidad de los datos de la RMIP para entender tanto los procesos a corto plazo vinculados con la meteorología como los procesos a largo plazo que se relacionan con el clima, y ayudará a vigilar el cambio climático y a adaptarse a él.

22. La acidificación de los océanos está afectando ya de manera mensurable a muchos organismos marinos, como los peces, los moluscos y crustáceos, el plancton y los corales, que, de distintas formas, son fundamentales para el estado de los océanos y para la salud y el bienestar de quienes dependen de ellos. Experimentos que emplean una serie de radioisótopos están permitiendo ahora estudiar cómo afectará la disminución proyectada del pH oceánico a esos organismos marinos, y entender mejor el amplio abanico de repercusiones que tendrá la acidificación de los océanos. Esa información es necesaria para prever mejor los efectos que probablemente sufrirán los recursos costeros y marinos como consecuencias de los cambios en los océanos.

23. Las técnicas radiológicas pueden ayudar a preservar una amplia variedad de objetos culturales inestimables. Mientras que la radiografía y la tomografía computarizada permiten examinar los artefactos en detalle, el tratamiento por irradiación ayuda a eliminar los insectos dañinos o las infestaciones por hongos. La tecnología del tratamiento con radiaciones ya cumple una función sin igual en la preservación del patrimonio cultural del mundo, permitiendo restaurar y reforzar artículos y documentos valiosos.

Examen de la Tecnología Nuclear de 2017

Informe principal

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. Al 31 de diciembre de 2016, había 448 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo, con una capacidad total de 391 GW(e)¹ (véase el cuadro A-1). Esta cifra representa un aumento de la capacidad total del orden de 8,3 GW(e) con respecto a 2015. De los reactores en funcionamiento, el 82 % son reactores moderados y refrigerados por agua ligera, el 10,9 % son reactores moderados y refrigerados por agua pesada, el 3,3 % son reactores refrigerados por agua ligera y moderados por grafito, y el 3,1 % son reactores refrigerados por gas. Tres son reactores rápidos refrigerados por metal líquido.

2. En 2016 se conectaron a la red diez nuevos reactores, el mismo número que en 2015, todos ellos de agua a presión (PWR). Cinco de estos reactores se encuentran en China (Changjiang-2, Fangchenggang-2, Fuqing-3, Hongyanhe-4, Ningde-4) y el resto en los Estados Unidos de América (Watts Bar-2), la Federación de Rusia (Novovoronezh 2-1), la India (Kudankulam-2), el Pakistán (CHASNUPP-3) y la República de Corea (Shin-Kori-3).

3. Tras la nueva puesta en servicio en 2015 del Sendai-1 y el Sendai-2, los dos primeros reactores nucleares de potencia del Japón en reanudar plenamente sus operaciones tras el accidente de Fukushima Daiichi, en enero y febrero de 2016, respectivamente, reanudaron sus actividades también el Takahama-3 y el Takahama-4, que sin embargo volvieron a parar poco después. En agosto de 2016 entró nuevamente en servicio el Ikata-3. En octubre de 2016 se puso en régimen de parada definitiva la central nuclear de Fort Calhoun de los Estados Unidos de América, tras 43 años de funcionamiento.

Número de reactores en construcción, por región

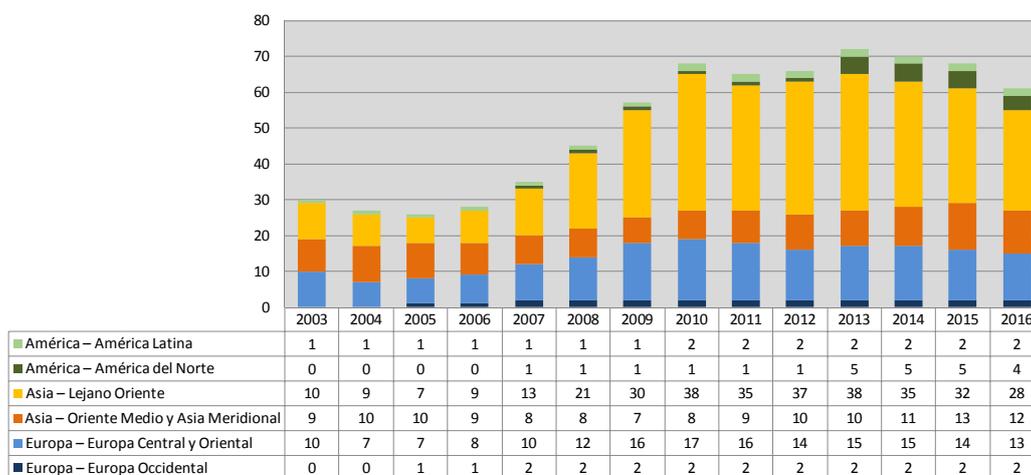


Fig. A-1. Número de reactores en construcción, por región (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA. <http://www.iaea.org/pris>).

¹ Un GW(e), o gigavatio (eléctrico), equivale a mil millones de vatios de energía eléctrica.

4. Al 31 de diciembre de 2016, había 61 reactores en construcción. La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen centradas en Asia (fig. A-1), especialmente en China. Del número total de reactores en construcción, 40 están en Asia, al igual que 47 de los 55 reactores nuevos que se han conectado a la red desde 2005.

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo (al 31 de diciembre de 2016)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2016		Experiencia operacional total hasta el final de 2016	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidad	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	8	10 799			80,1	13,1	824	7
ARGENTINA	3	1 632	1	25	7,7	5,6	79	2
ARMENIA	1	375			2,2	31,4	42	8
BELARÚS			2	2 218				
BÉLGICA	7	5 913			41,4	51,7	282	7
BRASIL	2	1 884	1	1 245	15,0	2,9	51	3
BULGARIA	2	1 926			15,1	35,0	161	3
CANADÁ	19	13 554			95,7	15,6	712	6
CHINA	36	31 384	21	21 622	197,8	3,6	243	2
COREA, REPÚBLICA DE	25	23 077	3	4 020	154,3	30,3	498	11
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS			4	5 380				
ESLOVAQUIA	4	1 814	2	880	13,7	54,1	160	7
ESLOVENIA	1	688			5,4	35,2	35	3
ESPAÑA	7	7 121			56,1	21,4	322	1
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	99	99 869	4	4 468	804,9	19,7	4 210	9
FEDERACIÓN DE RUSIA	35	26 111	7	5 520	184,1	17,1	1 226	9
FINLANDIA	4	2 764	1	1 600	22,3	33,7	151	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 630	386,5	72,3	2 106	4
HUNGRÍA	4	1 889			15,2	51,3	126	2
INDIA	22	6 240	5	2 990	35,0	3,4	460	11
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DE	1	915			5,9	2,1	5	4
JAPÓN	42	39 752	2	2 653	17,5	2,2	1 781	5
MÉXICO	2	1 552			10,3	6,2	49	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,7	3,4	72	0
PAQUISTÁN	4	1 005	3	2 343	5,4	4,4	67	11
REINO UNIDO	15	8 918			65,1	20,4	1 574	7
REPÚBLICA CHECA	6	3 930			22,7	29,4	152	10
RUMANIA	2	1 300			10,4	17,1	29	11
SUDÁFRICA	2	1 860			15,2	6,6	64	3
SUECIA	10	9 740			60,6	40,0	442	6
SUIZA	5	3 333			20,3	34,4	209	11
UCRAINA	15	13 107	2	2 070	76,1	52,3	473	6
Total ^{b, c}	448	391 116	61	61 264	2 476,2		16 982	5

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

b. Nota: Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China):

6 unidades, 5052 MW(e), en funcionamiento; 2 unidades, 2600 MW(e), en construcción;

30,5 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 13,7 % de la electricidad total generada.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (80 años y 8 meses), Kazajstán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (212 años y 1 mes).

A.1.1. Países en fase de incorporación

5. En los Emiratos Árabes Unidos prosiguió la construcción de los cuatro reactores de la primera central nuclear del país, situada en Barakah. El inicio de la explotación comercial de la unidad 1 está programado para 2017; las otras tres unidades comenzarán a funcionar en los tres años siguientes, una por año. En noviembre de 2016 finalizó una misión del Servicio Internacional de Asesoramiento sobre Protección Física del OIEA. La Corporación de Energía Nuclear de los Emiratos y la Corporación de Energía Eléctrica de Corea firmaron un acuerdo de constitución de una empresa conjunta para establecer un lazo de cooperación a largo plazo. Los Emiratos Árabes Unidos han pedido orientación al Organismo sobre cómo organizar la labor de investigación y desarrollo para que contribuya a la sostenibilidad de su programa nucleoelectrico y de sus instituciones pertinentes.

6. Continuó la construcción de ambas unidades de la primera central nuclear de Belarús, situada en Ostrovets, cuya puesta en servicio está prevista para 2019 y 2020. La vasija de presión del reactor de la unidad 1 llegó al emplazamiento a finales de 2016. En 2016 se realizó también una misión del Servicio Integrado de Examen de la Situación Reglamentaria (IRRS) del OIEA.

7. En diciembre de 2015, Bangladesh firmó un contrato de ingeniería, suministros y construcción con Atomstroyexport, de la Federación de Rusia. En julio de 2016 se expidió una licencia para un emplazamiento y se concertó un acuerdo de crédito intergubernamental con la Federación de Rusia. Se prevé que la unidad 1 de la central nuclear de Rooppur entrará en servicio en 2023, y la unidad 2, en 2024.

8. En febrero de 2015, Egipto firmó un acuerdo de desarrollo de un proyecto con la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom” de la Federación de Rusia para la construcción de una nueva central nuclear en El Dabaa, y posteriormente suscribió otro acuerdo financiero intergubernamental con la Federación de Rusia. La terminación de la primera unidad del emplazamiento de El Dabaa está prevista para 2025, y la de las otras tres unidades para 2027. Jordania ha establecido un Grupo Asesor Internacional encargado de examinar los progresos realizados en la ejecución del programa nuclear del país, y ha contratado a consultores para que dirijan la preparación de una decisión de inversión, prevista para 2018. En noviembre de 2016, la Asamblea Nacional de Viet Nam refrendó la decisión del Gobierno de cancelar los planes relativos a las centrales nucleares del país. En 2009, la Asamblea Nacional había aprobado planes para la construcción de dos centrales nucleares, con una capacidad combinada de 4000 megavatios.

9. Los países “en fase de incorporación” que están considerando la posibilidad de incluir la energía nucleoelectrica en su canasta energética, o que ya están planificando esa medida o trabajando activamente en ella, han colaborado con el Organismo en el desarrollo de la infraestructura nuclear necesaria. Cuando estos países toman la decisión soberana de optar por la energía nuclear, empiezan una interacción con los países proveedores para construir sus futuras centrales nucleares. El Organismo, a través de una metodología específica integrada en su enfoque de los hitos, desempeña una función importante en el establecimiento de programas seguros y sostenibles. El Organismo presta asistencia a esos Estados Miembros mediante exámenes por homólogos y misiones de expertos, cursos de capacitación y herramientas de modelización, que sistemáticamente cubren las 19 cuestiones relativas a la infraestructura nuclear del enfoque de los hitos. Con las dos misiones del Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) y las dos misiones de seguimiento realizadas en 2016, se han llevado a cabo ya, desde el comienzo del Examen en 2009, un total de 21 misiones INIR, en 15 Estados Miembros.

A.1.2. Países en fase de ampliación

10. La Comisión Reguladora Nuclear (NRC) de los Estados Unidos expidió una licencia de explotación por 40 años a la Autoridad del Valle del Tennessee para la unidad 2 de Watts Bar, que se conectó a la red en junio y comenzó a funcionar a escala comercial en octubre de 2016. El

emplazamiento de Watts Bar es el primero en cumplir con las órdenes relativas a las estrategias de mitigación de accidentes de la NRC derivadas del accidente de Fukushima. La construcción de la unidad 2 de Watts Bar estaba terminada en un 80 % cuando fue suspendida en los años ochenta. El aprovechamiento de este activo ya existente permitió ahorrar tiempo y costos, en comparación con la construcción de nueva capacidad de carga básica.

11. El proyecto de Hinkley Point C para la construcción de una central nuclear de 3200 MW(e) con dos reactores EPR en Somerset (Inglaterra) fue aprobado por el Consejo de Administración de Electricité de France (EDF) en julio de 2016, y por el Gobierno del Reino Unido, con algunas condiciones nuevas respecto de la inversión, en septiembre de 2016. La central tiene una vida útil proyectada de 60 años. EDF prevé que el primer reactor comenzará a funcionar a principios de 2026, unos diez años después de la decisión de inversión y de la aprobación gubernamental.

12. En 2016 se iniciaron tres construcciones: KANUPP-3 en Pakistán, y Tianwan-6 y Fangchenggang-4 en China.

A.1.3. Países con centrales nucleares en funcionamiento

13. De los 450 reactores nucleares de potencia en funcionamiento, 293 llevan 30 años o más en servicio. Cuando un reactor alcanza el final de su vida de diseño, es sometido a un examen de la seguridad y una evaluación del envejecimiento de sus estructuras, sistemas y componentes esenciales, antes de validar o renovar su licencia de explotación por plazos que superen el período de servicio previsto inicialmente. En los últimos años, una serie de reactores nucleares de potencia con licencias de explotación válidas, o que podrían haber recibido prórrogas de la licencia de explotación, han sido seleccionados por sus propietarios/explotadores para una parada anticipada, y en muchos casos las principales razones aducidas han sido de índole económica.

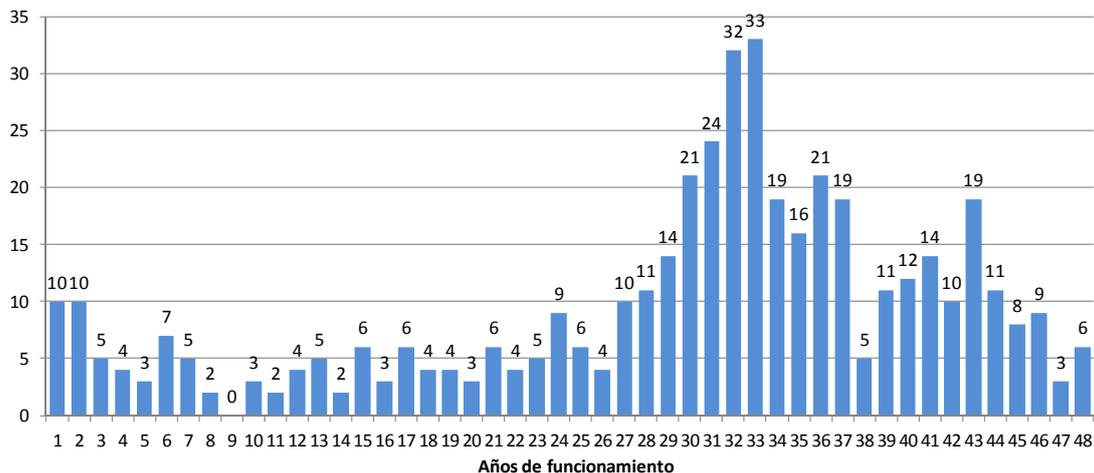


Fig. A-2. Distribución de los reactores de potencia en funcionamiento según su antigüedad, al 31 de diciembre de 2016 (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA: www.iaea.org/pris).

14. Para 2040, es probable que la mitad de las centrales nucleares activas en los Estados Unidos de América lleven 60 años de funcionamiento, si la NRC prorroga sus licencias de explotación más allá de los 40 años de la vida de diseño inicial. Varias compañías eléctricas están estudiando la posibilidad de prolongar la vida operacional de sus centrales por otros 20 años, lo que exigiría una segunda renovación de las licencias para los años de servicio adicionales. La central nuclear de Peach Bottom,

de Exelon, en Pennsylvania y la central nuclear de Surry, de Dominion, in Virginia son las primeras centrales nucleares de los Estados Unidos de América que pedirán una segunda renovación de la licencia para completar un período de explotación de 80 años.

15. La política de supresión gradual de la energía nucleoelectrica de Suiza, que proponía un límite constitucional de 45 años para la vida operacional de las centrales nucleares, fue rechazada en un referéndum celebrado el 20 de noviembre de 2016. En 2015, alrededor del 33 % de la electricidad de Suiza se generó a partir de energía nuclear.

A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica

16. Se prevé que la energía nucleoelectrica seguirá creciendo en todo el mundo en los próximos años, aun cuando el ritmo de crecimiento se reduzca, a corto plazo, como consecuencia de la competencia ejercida por los bajos precios de los combustibles fósiles y las fuentes de energía renovables. Según las proyecciones elaboradas por el Organismo en 2016 (fig. A-3), tomando como base la capacidad instalada de 382,9 GW(e) a fines de 2015, en el escenario alto la capacidad nucleoelectrica mundial llegaría en 2030 a 598 GW(e), aumentando un 56 %. En cambio, en el escenario bajo, la capacidad nuclear mundial aumentaría un 1,9 %, situándose en 390 GW(e). La capacidad nueva que se añadirá efectivamente en los próximos 14 años será mucho mayor que el aumento neto de la capacidad nuclear mundial, puesto que habrá que sustituir muchos reactores nucleares de potencia que se están retirando del servicio. En el escenario bajo, se añadirán unos 150 GW(e) de capacidad nueva, mientras que en el alto la cifra correspondiente sería de 300 GW(e). Extendiendo estas proyecciones a 2050, la capacidad nuclear aumentaría a 898 GW(e) en el escenario alto, y se mantendría aproximadamente en el nivel actual, en el bajo.

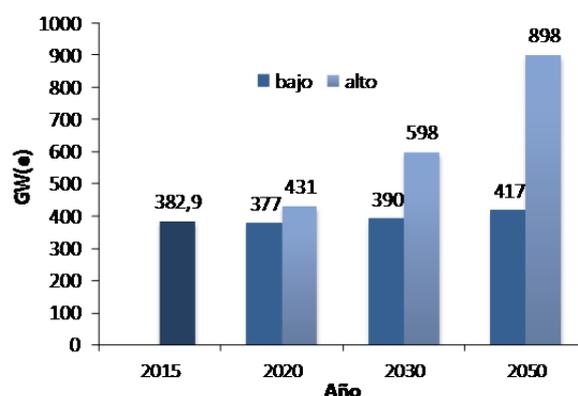


Fig. A-3. Proyecciones de la capacidad nuclear mundial (Fuente: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Colección de Datos de Referencia del OIEA N° 1, edición de 2016).

17. Estas proyecciones son fruto del trabajo de un grupo de expertos que el Organismo convoca cada año, y se obtienen agregando las evaluaciones de los distintos países. Los expertos examinan todos los reactores en funcionamiento, las posibles prórrogas de licencias, las paradas planificadas y los proyectos de construcción plausibles previstos para los decenios siguientes. Las proyecciones no pretenden ser predictivas ni reflejar toda la gama de posibles escenarios futuros, desde los casos viables más bajos hasta los más altos. A pesar de las considerables incertidumbres de estas proyecciones, los escenarios altos del OIEA, de la Agencia Internacional de Energía (AIE) de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y de la Asociación Nuclear Mundial (WNA) indican para 2030 un posible aumento de la capacidad nucleoelectrica mundial de 600 a 700 GW(e) (fig. A-4).

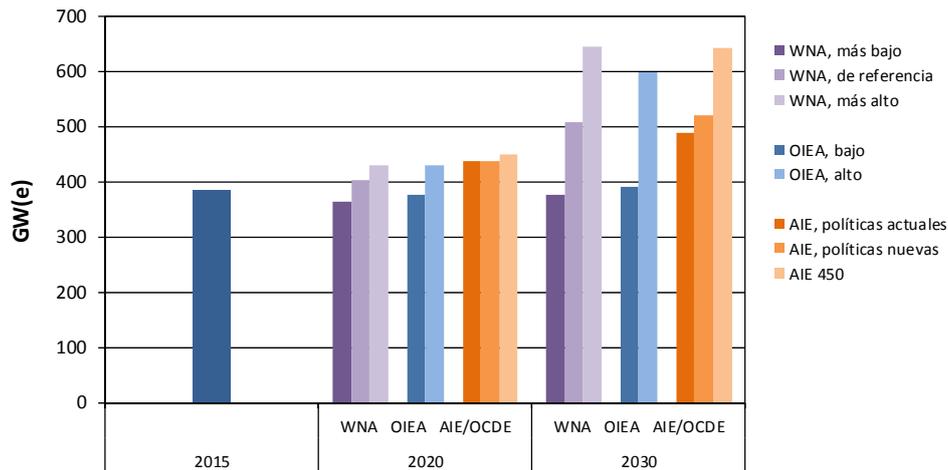


Fig. A-4. Comparación de las proyecciones de la capacidad nucleoelectrica más recientes del OIEA con los escenarios de la AIE/OCDE de 2016 y las proyecciones de la WNA (las cifras de la AIE/OCDE se basan en la capacidad bruta).

18. Con la entrada en vigor del Acuerdo de París el 4 de noviembre de 2016, las Partes deben ahora preparar, comunicar y mantener las sucesivas contribuciones determinadas a nivel nacional que tengan previsto efectuar a fin de mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales². El Acuerdo de París proporciona el marco para un aumento incremental de los esfuerzos de mitigación del cambio climático hasta que se alcance el objetivo de los 2 °C. Esto será necesario, ya que los planes de mitigación actuales distan mucho de ser suficientes para alcanzar ese objetivo.³

19. La energía nucleoelectrica puede contribuir considerablemente al cumplimiento del objetivo de los 2 °C y al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas⁴, gracias a los efectos beneficiosos comprobados de sus bajas emisiones de carbono y a su gran capacidad y su producción distribuable.⁵ Sin embargo, para aprovechar plenamente el potencial de la energía nucleoelectrica se requiere una expansión importante, que se corresponda con las proyecciones mencionadas para el escenario de alta capacidad (898 GW(e) en 2050). Alcanzar esas capacidades no será tarea fácil, porque las centrales existentes necesitarán mejoras y prolongaciones de la vida útil para poder seguir funcionando, la capacidad nuclear que se retire del servicio deberá ser sustituida y se requerirá una oleada de nuevas construcciones para atender la creciente demanda de energía de las economías en desarrollo. Esta no sería una inversión sin precedentes, pero probablemente requiera apoyo gubernamental, nuevos arreglos contractuales para reducir los riesgos de los inversores y un precio de las emisiones de carbono que mejore la rentabilidad económica de las opciones de bajas emisiones, como la energía nucleoelectrica.

20. En el Acuerdo de París se señala que la innovación es un elemento clave para alcanzar el objetivo de los 2 °C. Las tecnologías innovadoras de producción de energía nucleoelectrica, como los diseños

² El Acuerdo de París puede consultarse en http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php.

³ El folleto del Organismo *Climate Change and Nuclear Power 2016* está disponible en <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11090/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2016>.

⁴ Para obtener más información sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones, véase <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

⁵ La publicación del Organismo *Nuclear Power and Sustainable Development (2016)* está disponible en <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11084/Nuclear-Power-and-Sustainable-Development>.

evolutivos, los reactores pequeños y medianos o modulares y los ciclos del combustible avanzados, podrían contribuir más eficientemente a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y abrir paso al uso de la energía nucleoelectrónica en nuevas aplicaciones. Por ejemplo, esta energía puede reducir aún más las emisiones de carbono suministrando el calor requerido para los procesos industriales, y puede utilizarse también en la producción de agua desalada para las ciudades de climas secos. Sin embargo, se necesitan más inversiones en actividades de investigación, desarrollo y demostración.

A.3. Ciclo del combustible

A.3.1. Parte inicial

Recursos y producción de uranio

21. La vigésima sexta edición de la publicación conjunta bienal de la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE y el OIEA, *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*, conocida también como el ‘Libro Rojo’, apareció en noviembre de 2016⁶. Una conclusión fundamental de este informe es que los recursos actualmente identificados como recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg de U son más que suficientes para atender la demanda de los escenarios de alta capacidad antes mencionados. Los principales retos, a este respecto, son la inversión y la competencia técnica que se requerirán para poner en producción esos recursos, especialmente en vista de la actual depresión del mercado del uranio. La capacidad de producción proyectada, que es superior a la capacidad existente y a la comprometida, es suficiente para cubrir las necesidades del escenario de alta demanda. Las capacidades de producción existente y comprometida bastan para cubrir las necesidades del escenario de baja demanda.

22. Los precios al contado del uranio no habían estado tan bajos como ahora desde 2004. En 2016 se mantuvieron entre 75 dólares/kg y 42 dólares/kg. Los bajos precios redujeron considerablemente la capacidad de las empresas de conseguir fondos para la exploración, los estudios de viabilidad y el desarrollo de nuevos proyectos de expansión.

23. Muchos proyectos relacionados con el uranio quedaron suspendidos, o reducidos a actividades con pocas repercusiones financieras, mientras se realizaban pruebas y estudios adicionales, y algunos que se habían puesto en marcha o que habían alcanzado fases avanzadas en la construcción fueron puestos en estado de servicio y mantenimiento. En 2015 se produjeron 60 496 toneladas de uranio metálico (t U), la cifra más alta del último decenio, en comparación con 56 041 t U en 2014 y 59 331 t U en 2013.

24. Kazajstán sigue siendo el principal productor de uranio del mundo. Su producción, procedente casi exclusivamente de sus minas de lixiviación *in situ*, aumentó con rapidez entre 2000 y 2012; en los últimos años los aumentos han sido modestos, con una producción 24 455 t U prevista para 2016, y una cifra similar para 2017.

25. La capacidad de producción anual de Cigar Lake en el Canadá (la mina de uranio de más alta calidad del mundo, que inició su producción comercial en mayo de 2015) es actualmente de 5000 t U/año y se prevé que aumentará a 6900 t U/año de aquí a 2018. Con los alentadores resultados que siguió dando la exploración de uranio en la Cuenta de Athabasca, el Canadá mantuvo su posición de segundo productor de uranio del mundo.

26. En Namibia continuó en 2016 la puesta en servicio de la mina de Husab recientemente construida, llegándose al punto de producción inicial, y se espera que la tasa aumente en los

⁶ El informe *Uranium 2016: Resources, Production and Demand* está disponible en <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>

próximos 24 meses, hasta 2018. La plena capacidad podría ser de 5770 t U/año, con una vida útil probable de más de 20 años. Las minas de uranio de Rössing y Langer Heinrich de Namibia prosiguieron sus operaciones en 2016. En algunos de los otros yacimientos de uranio de este país continuaron los estudios de viabilidad, a un ritmo moderado.

27. En Australia, la mina de uranio de lixiviación *in situ* de Four Mile siguió funcionando con una capacidad anual de aproximadamente 1000 t U/año en régimen de plena producción. En el proyecto Ranger, el explotador, Energy Resources of Australia, continuó procesando sus existencias de mena para cumplir sus obligaciones de venta, y ha avanzado en la rehabilitación de las partes del emplazamiento que ya no están en explotación. En 2016 la producción no llegó a 2500 t U, frente a unas cifras de entre 4000 y 6000 t U/año de 1997 a 2009. Según los arreglos actuales, las actividades de extracción y procesamiento deberán cesar en enero de 2020, y la rehabilitación habrá de concluir dentro de los cinco años siguientes. Los explotadores de la mina de cobre, uranio, oro y plata de Olympic Dam prosiguieron las operaciones convencionales, mientras continuaban los ensayos para la posible lixiviación en pila de una parte de sus menas. Se hicieron progresos en los estudios y los procesos de aprobación de varios yacimientos de uranio de Australia Occidental, pero no se han anunciado fechas definitivas para la construcción y la apertura.

28. En Groenlandia (Reino de Dinamarca) se siguió avanzando en los estudios de viabilidad y las aprobaciones del proyecto de tierras raras, metales comunes y uranio del yacimiento de Kvanefjeld. En noviembre de 2016 se celebró en Copenhague el Octavo Taller de Evaluación de Recursos Minerales, para evaluar los posibles recursos de uranio de la nación.

29. China prosiguió sus actividades de exploración de uranio y aumentó el gasto en desarrollo tanto a nivel nacional como en el extranjero. Recientemente se ha comunicado un aumento importante (de más del 100 %) de los recursos deducidos, como resultado de la intensificación de las actividades de exploración en varias cuencas sedimentarias del país. Los gastos de desarrollo en el extranjero se mantuvieron altos (más de 1500 millones de dólares en 2014 y 2015), debido principalmente al desarrollo de la mina de Husab en Namibia.

30. La historia demuestra que una proporción importante de los recursos de uranio identificados no llega nunca a explotarse, por razones técnicas, sociales o políticas. Como parte de los esfuerzos por aumentar la seguridad de los suministros nacionales e internacionales, la Argentina y los Estados Unidos de América tienen varios proyectos activos destinados a evaluar los recursos de uranio no descubiertos. El Organismo siguió colaborando con los principales actores para dar a conocer esas técnicas de evaluación a otros Estados Miembros a través de talleres de capacitación y publicaciones, como el taller de Copenhague antes mencionado.

Conversión y enriquecimiento

31. El Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, y el Reino Unido tienen plantas de conversión a escala comercial en funcionamiento. Cinco empresas ofrecen servicios comerciales de enriquecimiento: la Corporación Nuclear Nacional de China (China), AREVA (Francia), la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom” (Federación de Rusia), USEC (Estados Unidos de América) y URENCO (Europa y Estados Unidos de América). Hay pequeñas instalaciones de conversión y enriquecimiento en funcionamiento en la Argentina, el Brasil, la India, el Japón, el Pakistán y la República Islámica del Irán.

32. El Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos, junto con sus asociados en una empresa conjunta Westinghouse y Fluor Corporation, ha seleccionado a la consultora de diseño, ingeniería y gestión de proyectos Atkins, con sede en el Reino Unido, para la explotación de las instalaciones de conversión de hexafluoruro de uranio empobrecido en su planta de enriquecimiento por difusión gaseosa de Paducah, en Kentucky, y en la planta de enriquecimiento por difusión gaseosa

de Portsmouth, en Piketon, Ohio. La empresa conjunta, registrada con el nombre de Mid-America Conversion Services, explotará las dos instalaciones para convertir las existencias del DOE (aproximadamente 765 000 t) de hexafluoruro de uranio empobrecido, un coproducto del proceso de enriquecimiento del uranio, en óxido de uranio empobrecido para su posible reutilización, almacenamiento o disposición final en el futuro.

33. La empresa Centrus Energy Corporation, con sede en los Estados Unidos, ha firmado un contrato con UT-Battelle, el explotador del Laboratorio Nacional de Oak Ridge del DOE, para seguir avanzando hacia el enriquecimiento del uranio a escala comercial con ayuda de su tecnología 'American Centrifuge'. A comienzos de 2016, Centrus concluyó una lograda demostración de tres años de una cascada completa de 120 centrifugadoras avanzadas en su instalación de Piketon, Ohio, que confirmó el rendimiento y la fiabilidad a largo plazo de las máquinas en condiciones reales de funcionamiento. Centrus sigue estudiando formas de perfeccionar la tecnología y otros modos de desplegar la capacidad de enriquecimiento comercial con mejor relación costo-eficacia, aprovechando el período actual en que el mercado no necesita una ampliación de la capacidad.

Fabricación de combustible

34. En enero de 2016, Lightbridge, una empresa estadounidense de desarrollo de combustible nuclear, recibió la aprobación reglamentaria definitiva para poner a prueba su combustible metálico recientemente desarrollado en el reactor de investigación de Halden, en Noruega (el comienzo de la irradiación está previsto para 2017). El combustible metálico avanzado de Lightbridge está hecho de una aleación de circonio y uranio y utiliza una composición especial y una geometría de las barras de combustible que, según sostiene la empresa, le permite funcionar a una densidad de potencia mayor que la de los combustibles de óxido de uranio que se utilizan en la actualidad. Posteriormente, en julio de 2016, Lightbridge recibió de la Oficina Europea de Patentes la aprobación de una patente clave para su diseño de las barras de combustible nuclear metálico.

35. En enero de 2016, Westinghouse Electric Company anunció que su instalación de fabricación de combustible nuclear de Springfields, en el Reino Unido, había cumplido los requisitos necesarios para la fabricación de los conjuntos combustibles adecuados al diseño de su reactor modular pequeño. En febrero de 2016, la compañía nacional checa de electricidad ČEZ adjudicó a Westinghouse Electric Company un contrato para el suministro de seis conjuntos de ensayo inicial a su central nuclear de Temelín, compuesta por dos unidades de WWER-1000 de diseño ruso.

36. En marzo de 2016, la Compañía de Combustibles Nucleares del Norte de China, una sucursal de la Corporación Nuclear Nacional de China, puso en marcha en su central de Baotou una línea piloto de producción de elementos combustibles para el reactor modular de lecho de bolas de alta temperatura de China, una central nuclear de demostración de reactores de alta temperatura refrigerados por gas situada en Shidaowan. La central de Baotou también produjo un prototipo de conjunto combustible para el diseño de reactor de agua a presión CAP1400 de China, cuyo funcionamiento está ahora en fase de verificación. En mayo de 2016, la Compañía de Combustibles Nucleares del Norte de China terminó su primera línea de producción de combustible AP1000, dos meses después de que la Administración Nacional de Seguridad Nuclear de China diera su aprobación a la introducción de uranio en la línea de producción de 400 t U/año. La Compañía de Combustibles Nucleares del Norte de China fabricará dos series de conjuntos simulados antes de iniciar la etapa de plena producción.

37. En abril de 2016, Westinghouse Electric Company anunció la ampliación de su fábrica de combustible nuclear de Västerås (Suecia). Esta empresa con sede en los Estados Unidos, en que Toshiba, del Japón, tiene una participación mayoritaria, explicó que la ampliación era una respuesta a la creciente demanda de diversificación del suministro de combustible nuclear para los reactores WWER-1000 en Europa.

38. En mayo de 2016, Global Nuclear Fuel – Americas (GNF-A) concertó un acuerdo con la compañía rusa de combustible nuclear TVEL (una sucursal de la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom”) para producir en los Estados Unidos de América combustible TVS Kvadrat para los reactores de agua a presión (PWR) de Westinghouse. Como parte del consorcio, GNF-A gestionará el proyecto en los Estados Unidos de América, centrándose en la concesión de las licencias y en la garantía de la calidad, así como en la prestación de servicios de ingeniería, mientras que TVEL aportará su competencia en el diseño y su apoyo técnico, y fabricará los primeros lotes de conjuntos para los programas de producción piloto. TVEL firmó también un contrato en diciembre de 2016 con la compañía eléctrica sueca Vattenfall, convirtiéndose así en la tercera empresa, tras AREVA y Westinghouse, que suministra combustible para las unidades 3 y 4 de la central nuclear de Ringhals.

39. En junio de 2016, Indústrias Nucleares do Brasil firmó un contrato con la empresa estatal argentina CONUAR para exportar uranio enriquecido. El acuerdo comprende la exportación de cuatro toneladas de polvo de dióxido de uranio para su uso en la primera carga de combustible en el reactor modular CAREM de la Argentina.

40. En junio de 2016, Machine Building Plant (MSZ), una sucursal de TVEL con sede en Elektrostal (Federación de Rusia), concluyó los ensayos de aceptación de las pastillas de combustible para la central nuclear del Reino Unido Sizewell B, una central de una sola unidad que cubre el 3 % de la demanda total de electricidad del Reino Unido. MSZ también finalizó los ensayos de aceptación de los componentes de sus conjuntos combustibles experimentales ETVS-14 y ETVS-15 con combustible denso de mezcla de nitruros de uranio y plutonio (que se ensamblarán en el Grupo Siberiano de Empresas Químicas) para su funcionamiento experimental en el reactor rápido BN-600 de la central nuclear de Beloyarsk y en el futuro reactor BREST-OD-300 refrigerado por plomo.

41. También en junio de 2016, se cargaron tres conjuntos combustibles experimentales con combustible REMIX (mezcla regenerada) en la unidad 3 de la central nuclear rusa de Balakovo, durante una parada de mantenimiento programada. El combustible REMIX se produce a partir de una mezcla no separada de uranio y plutonio (obtenida por el reprocesamiento de combustible gastado), dopada con una pequeña cantidad de uranio enriquecido. Cada conjunto combustible experimental consta de seis barras de combustible REMIX, junto con barras de combustible de uranio estándar. El combustible REMIX permanecerá en la unidad Balakovo 3 durante por lo menos dos ciclos del combustible (alrededor de tres años) y los conjuntos irradiados se someterán luego a exámenes postirradiación. La tecnología del combustible REMIX ayudará a la Federación de Rusia a establecer un ciclo del combustible nuclear cerrado y a reducir al mínimo el volumen de desechos radiactivos que produce.

42. En junio de 2016, el Tribunal Superior de Fukuoka, del Japón, confirmó la decisión del tribunal de distrito de Saga de que se podía utilizar combustible de óxidos mixtos (MOX) en la unidad 3 (fuera de línea desde 2010) de la central nuclear de Genkai de la Compañía de Energía Eléctrica de Kyushu, cuya nueva puesta en servicio está siendo examinada por la Autoridad de Reglamentación Nuclear. En septiembre de 2016, la Compañía de Energía Eléctrica de Shikoku reanudó la explotación comercial de la unidad 3 de la central nuclear de Ikata, utilizando en parte combustible MOX.

43. En octubre de 2016, Lightbridge y AREVA NP, de Francia, firmaron un acuerdo para constituir una empresa conjunta a partes iguales con sede en los Estados Unidos, con el objetivo de desarrollar, fabricar y comercializar conjuntos combustibles para la mayoría de los tipos de reactores de agua ligera, entre ellos los PWR, los reactores de agua en ebullición, los reactores pequeños y medianos o modulares y los reactores de investigación.

44. También en julio de 2016, la Instalación de Concentrados Químicos de Novosibirsk, que forma parte de TVEL, comenzó a producir la nueva generación del combustible nuclear TVS-2M para la unidad 3 de la central nuclear de Tianwan en China, que está en construcción y que se prevé poner en servicio en 2018. Con su mayor tasa de quemado, este combustible alarga los períodos de funcionamiento entre las paradas de recarga.

45. En agosto de 2016, la Compañía Nacional de Generación de Energía Nuclear “Energoatom” de Ucrania firmó un contrato con la empresa europea de enriquecimiento de uranio URENCO. En virtud del contrato, URENCO suministrará a la instalación de fabricación de Westinghouse en Västerås (Suecia) uranio enriquecido para producir combustible nuclear destinado a Energoatom.

46. La Compañía de Energía Eléctrica de Kansai del Japón anunció el 30 de agosto de 2016 que AREVA había comenzado a fabricar en su instalación Melox, en Francia, 16 conjuntos combustibles de MOX para la unidad 4 de la central nuclear de Takahama.

47. En septiembre de 2016, la Planta Metalúrgica de Ulba (UMP), una sucursal de la empresa nacional de producción de uranio de Kazajstán Kazatomprom, y la Compañía de Recursos de Uranio de CGNPC, una sucursal de la Corporación General de Energía Nucleoeléctrica de China (CGNPC), firmaron un acuerdo para establecer, en la instalación ya existente de UMP, una planta de producción de conjuntos combustibles con una capacidad de 200 toneladas por año, para suministrar pastillas de combustible a los reactores nucleares de potencia de China.

48. Una novedad digna de mención en el sector de la tecnología del combustible de los reactores de agua pesada a presión es que la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina concluyó recientemente con éxito una prueba de resistencia de 1500 horas de duración en un circuito de alta presión destinada a verificar un nuevo diseño de combustible para la central nuclear Atucha-2 con diferentes rejillas espaciadoras. Los principales objetivos del nuevo diseño son simplificar el proceso de fabricación del combustible y reducir el costo.

A.3.2. Garantía del suministro

49. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores del Organismo aprobó la resolución GOV/2010/70, en que dio su visto bueno al establecimiento del Banco de Uranio Poco Enriquecido (UPE) del OIEA tal como se expone en el documento GOV/2010/67. En junio de 2015, la Junta de Gobernadores aprobó un acuerdo entre el Organismo y Kazajstán como Estado anfitrión del Banco de UPE del OIEA, y en diciembre de ese año el Organismo y Kazajstán finalizaron el marco jurídico básico para establecer ese Banco en el emplazamiento de la UMP en Ust-Kamenogorsk. Desde entonces, el Organismo y Kazajstán han hecho progresos en la ejecución del proyecto.

50. En enero de 2016, Kazajstán promulgó la Ley sobre el Uso de la Energía Atómica. Tras la aprobación de esta nueva ley, se inició una mejora del marco regulador, y ya se han promulgado varios reglamentos, mientras que otros se encuentran en la fase final de examen. Un estudio de viabilidad indicó que la construcción de una nueva instalación de almacenamiento para el Banco de UPE del OIEA sería más eficaz en relación con el costo que la mejora de una ya existente, y permitiría establecer arreglos de seguridad simplificados y robustos e incorporar mejores elementos de seguridad en el diseño. En marzo de 2016, un grupo del Organismo realizó una misión a la UMP para evaluar los avances en los trabajos relacionados con el diseño de una nueva instalación de almacenamiento y llegó a la conclusión de que el diseño preveía medidas adecuadas para garantizar la seguridad nuclear. La construcción de la nueva instalación de almacenamiento comenzó en el verano de 2016, y Kazajstán prevé que esta instalación entrará en servicio y estará lista para recibir UPE en el segundo semestre de 2017. El Organismo ha comenzado ahora las actividades de preparación para la adquisición del UPE que se almacenará en el Banco de UPE del OIEA. Se está finalizando un programa de gestión de cilindros que garantizará la seguridad física y tecnológica a largo plazo de los cilindros *in situ*, así como durante el transporte posterior, sin necesidad de proceder periódicamente a la decantación del UPE de los cilindros.

51. En el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2012* (documento GC(56)/INF/3) se describen otros mecanismos de garantía del suministro que se han establecido.

A.3.3. Parte final

Gestión del combustible gastado

52. La duración del almacenamiento se prolonga a menudo más allá de la vida útil de las instalaciones de almacenamiento autorizada inicialmente, o incluso más allá de su vida de diseño. La gestión del envejecimiento ha adquirido una importancia prioritaria en los últimos años, debido al largo período de tiempo necesario para desarrollar soluciones de reciclado avanzadas o establecer instalaciones de disposición final. Esto ha ocurrido especialmente en los Estados en que se han establecido sistemas de almacenamiento en seco para un período relativamente breve.

53. A fin de mantener la seguridad en el tiempo, se están elaborando orientaciones sobre la gestión del envejecimiento y los proyectos de investigación y desarrollo (I+D) que pueden respaldarla, particularmente en Alemania y los Estados Unidos de América. Por ejemplo, la NRC elaboró un informe sobre la gestión de los procesos de envejecimiento en el almacenamiento, titulado *Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report*, que publicó en septiembre de 2016 para recabar observaciones, al objeto de ayudar a los explotadores independientes de instalaciones de almacenamiento de combustible a renovar sus licencias. A fin de desarrollar la base técnica y la metodología para la orientación que se deberá dar a los Estados Miembros, el Organismo inició también en octubre de 2016 un proyecto coordinado de investigación sobre los programas de gestión del envejecimiento para los sistemas de almacenamiento en seco del combustible gastado.

54. Se estima que el combustible gastado almacenado ascendía al final de 2016 a 273 000 toneladas de metal pesado, y que se acumula a razón de unas 7000 toneladas por año.⁷ En 2016 entraron en servicio otras cinco instalaciones de almacenamiento del combustible gastado fuera del emplazamiento del reactor. Las cinco son instalaciones de almacenamiento en seco y utilizan la tecnología de los cofres de hormigón. Están situadas en Ignalina (Lituania), Palo Verde (México), Sizewell (Reino Unido), Watts Bar (Estados Unidos de América) y Summer (Estados Unidos de América). En la figura A-5 se ilustra la distribución de las 151 instalaciones de almacenamiento fuera del emplazamiento del reactor existentes en 27 países. Los Estados Unidos de América, que tienen ahora 70 instalaciones de almacenamiento en seco, en que mantienen alrededor del 36 % de su inventario total de combustible gastado, siguen estableciendo nuevas instalaciones de almacenamiento en seco año tras año. Las proyecciones actuales indican que para 2020 habrá en los Estados Unidos de América 74 instalaciones independientes de almacenamiento en seco de combustible gastado.

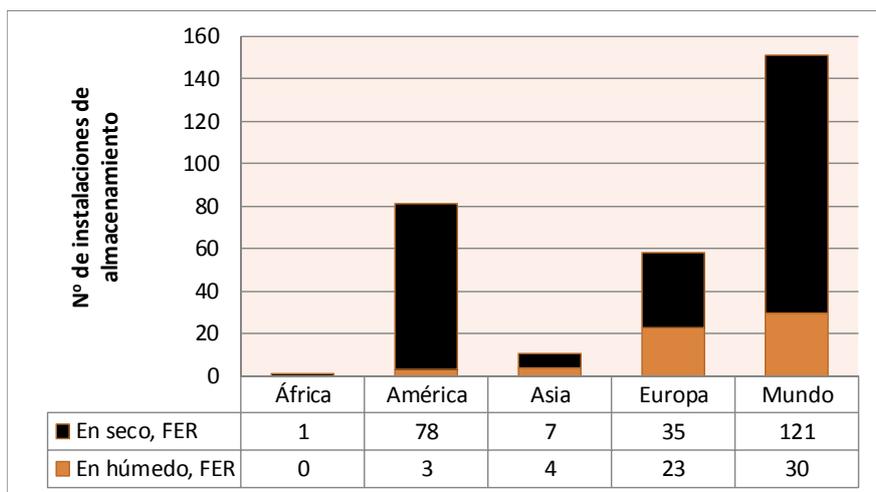


Fig. A-5. Distribución mundial de las instalaciones de almacenamiento de combustible gastado fuera del emplazamiento de los reactores (FER).

⁷ Anualmente se descargan de las centrales nucleares de todo el mundo alrededor de 10 000 toneladas de metal pesado.

55. Por diversos motivos, ha habido retrasos en la puesta en servicio de nuevas instalaciones de almacenamiento fuera del emplazamiento del reactor en España, el Japón y Ucrania. En el caso de uno de esos proyectos, la instalación de almacenamiento fuera del emplazamiento del reactor Mutsu del Japón, la puesta en servicio está ahora prevista para 2019.

56. En 2016 comenzaron los preparativos para la retirada del combustible de la central nuclear de Wylfa, en el Reino Unido, después de la parada de su último reactor operativo, el 30 de diciembre de 2015. Esta central nuclear, que data de los años setenta, tiene los almacenes en seco más antiguos de combustible gastado procedente de reactores de potencia. La meta es retirar el combustible de los núcleos de los reactores y de los almacenes en seco antes del final de 2018. El Departamento de Empresas, Energía y Estrategia Industrial del Reino Unido ha puesto en marcha un nuevo programa británico de investigación e innovación nuclear. La fase inicial de este programa, dotada de 20 millones de libras esterlinas (25 millones de dólares) para el período de 2016 a 2018, abarca cinco temas principales: los combustibles avanzados, los materiales y la fabricación, el diseño de los reactores, el reciclado avanzado y un conjunto de herramientas estratégicas. Esto forma parte del compromiso más amplio del Gobierno de duplicar el gasto del Reino Unido en la innovación energética, que se prevé superará los 40 millones de libras esterlinas (50 millones de dólares) anuales en 2021.

57. La Federación de Rusia ha establecido un nuevo programa para la gestión de su combustible nuclear gastado, que abarca el período 'de 2016 a 2018 y hasta 2020', a fin de reemplazar el programa anterior, que había expirado. El nuevo programa comprende el transporte de los materiales de combustible nuclear gastado de las centrales nucleares rusas ya sea a la planta de reprocesamiento de Mayak, en Ozersk, o a las instalaciones de almacenamiento provisional centralizado del Complejo Minero y Químico en Zheleznogorsk, para su reprocesamiento ulterior. El emplazamiento del Complejo Minero y Químico tiene piscinas de agua que pueden utilizarse para el almacenamiento futuro del combustible nuclear gastado de los reactores WWER-1000 de las centrales nucleares de Balakovo, Kalinin, Novovoronezh y Rostov, así como del reactor rápido BN-600 de Beloyarsk. El emplazamiento del Complejo Minero y Químico también tiene, desde 2012, una instalación de almacenamiento provisional en seco centralizada, para un total de hasta 8129 toneladas de combustible nuclear gastado ruso de los reactores RBMK-1000 de las centrales nucleares de Leningrado, Kursk y Smolensk. La planta de reprocesamiento de Mayak ha aumentado su productividad en un 35 %. En 2016 recibió por primera vez combustible nuclear gastado procedente del reactor RBMK-1000 de la central nuclear de Leningrado. También comenzó el reprocesamiento del combustible gastado de uranio y circonio de los rompehielos soviéticos y rusos que se ha acumulado por decenios en las instalaciones de almacenamiento.

58. Lituania ha construido, cerca de su central nuclear de Ignalina, ahora en régimen de parada, una instalación de almacenamiento provisional de combustible gastado para conservar el combustible nuclear gastado que se descargue de las unidades 1 y 2 de la central. La capacidad de almacenamiento consiste en unos 190 cofres de hormigón armado, con espacio para alrededor de 17 000 conjuntos combustibles que se almacenarán por 50 años. Habiendo concluido el ensayo frío en junio de 2016, la instalación está en una fase avanzada de la puesta en servicio.

59. Debido principalmente a las dificultades financieras y a los problemas de asignación de tierras en la zona de exclusión de la central nuclear de Chernóbil, el proyecto de construcción de la instalación central de almacenamiento de combustible gastado de Ucrania se ha retrasado hasta el final de 2018.

60. En China, el trabajo preliminar de selección del emplazamiento de una nueva planta de reprocesamiento del combustible nuclear en Lianyungang, en la Provincia de Jiangsu, ha sido suspendido por problemas relacionados con la aceptación pública. Sin embargo, los planes de construcción siguen en pie, ya que hay otras cinco provincias chinas en estudio para acoger este proyecto.

A.3.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos

Clausura de instalaciones nucleares

61. En el mundo hay 158 reactores de potencia que ya están o se están poniendo en régimen de parada; de ellos, 17 están completamente clausurados. Más de 150 instalaciones del ciclo del combustible nuclear están en régimen de parada definitiva o en fase de clausura, y 127 ya están completamente clausuradas. También hay más de 180 reactores de investigación parados o en fase de clausura. Más de 300 reactores de investigación y conjuntos críticos han sido completamente clausurados.

62. Durante 2016 se aplicaron enfoques innovadores en la central nuclear de Dungeness A del Reino Unido, como el uso de buzos para limpiar las antiguas piscinas de refrigeración. Se está prestando apoyo continuo para nuevos trabajos de I+D, principalmente en los países con programas nucleoelectrónicos de larga data, como Bélgica, España, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, el Japón y el Reino Unido. Un ejemplo reciente es la iniciativa RACE (Aplicaciones a Distancia para Entornos Difíciles) del Reino Unido, que comenzó oficialmente en mayo de 2016.

63. La clausura de una central nuclear después de un accidente es una cuestión específica y difícil, que varios países están teniendo que afrontar actualmente. En el Japón se hicieron progresos notables en los preparativos para la clausura de la central nuclear de Fukushima Daiichi (véase la información más detallada consignada en el recuadro). Otro ejemplo de actividades posteriores a un accidente es la terminación, después de varios años de obras y con apoyo de donantes internacionales, del nuevo confinamiento seguro para la unidad 4 de la central nuclear de Chernóbil en Ucrania.



Fig. A-6. Nuevo confinamiento seguro en torno a la unidad 4 de la central nuclear de Chernóbil (izquierda, vista desde el sitio de construcción; derecha, vista desde la unidad 3). La estructura mide 108 metros de altura, 162 metros de longitud y 257 metros de anchura, y pesa alrededor de 36 000 toneladas (Fotografías: central nuclear de Chernóbil).

64. También continúa la ejecución de proyectos de clausura en Bulgaria, Eslovaquia y Lituania, donde algunas centrales nucleares fueron puestas en régimen de parada antes del final de su vida de diseño, y se está prestando apoyo financiero para ello por conducto del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo.

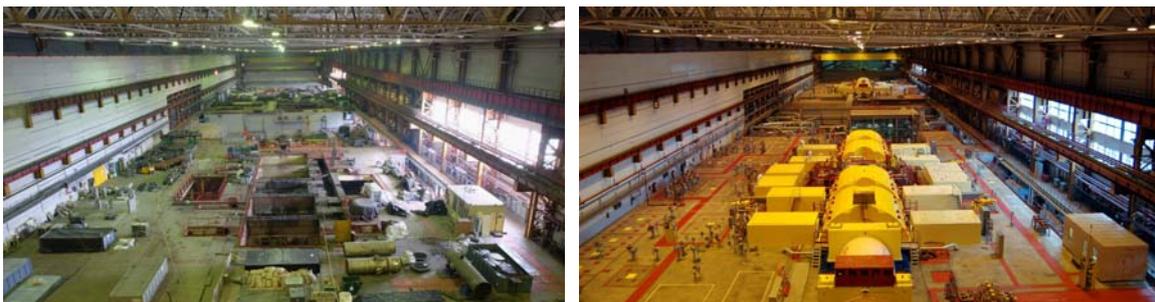


Fig. A-7. Actividades de desmantelamiento en las salas de turbinas de las unidades 1 (izquierda) y 2 (derecha) de la central nuclear de Ignalina, en Lituania (Fotografías: central nuclear de Ignalina).

Progresos realizados en la clausura de la central nuclear de Fukushima Daiichi

Cuatro de los seis reactores de la central nuclear de Fukushima Daiichi sufrieron daños al núcleo y/o explosiones de hidrógeno. La clausura de estos reactores es un proyecto sin precedentes, que se está ejecutando en el marco de la Hoja de ruta a medio y largo plazo⁸ y del Plan Técnico Estratégico⁹ aprobados por las autoridades japonesas. En un evento paralelo a la sexagésima reunión ordinaria de la Conferencia General del Organismo, celebrada en septiembre de 2016, representantes del Japón destacaron los progresos realizados y presentaron los planes para hacer frente a algunos retos, como el de extraer los restos de combustible, con la cooperación de la comunidad internacional.

Un problema importante es el agua contaminada, que se genera por el agua subterránea que entra en los edificios de los reactores y se mezcla con el refrigerante utilizado para enfriar los restos de combustible. El agua contaminada se trata con un sistema de eliminación de nucleidos. Como parte de los esfuerzos desplegados para mantener el agua lejos de las fuentes contaminadas, se han instalado tuberías de congelación en los muros impermeables del lado de la tierra para bloquear el agua subterránea, y en marzo de 2016 se inició la congelación parcial de los muros. Para evitar las fugas de agua contaminada, en octubre de 2015 se cerraron los muros impermeables del lado del mar.

Los 1535 conjuntos combustibles que estaban almacenados en la piscina de la unidad 4 fueron retirados en su totalidad en 2014. En preparación para la retirada de los conjuntos combustibles de la unidad 1 (392 conjuntos), la unidad 2 (615 conjuntos) y la unidad 3 (566 conjuntos), se ha comenzado a trabajar en la descontaminación y el blindaje de los pisos de recarga, para reducir en mayor medida la dosis de radiación.

Con ayuda de la tomografía por muones y la robótica se han estudiado las condiciones internas de las vasijas de contención primaria de los reactores. Un robot que inspeccionó la vasija de contención primaria de la unidad 1 confirmó que no había grandes daños en equipos tales como las bombas de recirculación del lazo primario, y que grandes superficies del fondo del pozo seco estaban cubiertas de sedimentos. La tomografía por muones realizada en la unidad 2 permitió detectar una sombra correspondiente a una sustancia de alta densidad en el fondo de la vasija de presión del reactor, que parece ser el resto del combustible.



Fig. A-8. Robot capaz de cambiar de forma utilizado para inspeccionar el interior de la vasija de contención primaria de la unidad 1 (Fotografías: Instituto Internacional de Investigación sobre la Clausura de Instalaciones Nucleares, Japón).

Se está trabajando intensamente en la descontaminación para mejorar el entorno del emplazamiento. Con una dosis efectiva adicional, dentro del límite del emplazamiento, de menos de 1 mSv/año, ya no es necesario llevar máscaras completas ni ropa protectora en alrededor de un 90 % del emplazamiento.

⁸ El documento *Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station*, publicado por el Consejo Interministerial para Cuestiones relativas al Agua Contaminada y a la Clausura el 12 de junio de 2015, está disponible en http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20150725_01b.pdf.

⁹ Un resumen del documento *Technical Strategic Plan 2016 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.*, publicado por la Corporación de Indemnización por Daños Nucleares y Facilitación de la Clausura el 13 de julio de 2016, está disponible en http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20160926_SP2016esum.pdf.

El Consejo para la Asociación en la I+D sobre la Clausura fue establecido por la Corporación de Indemnización por Daños Nucleares y Facilitación de la Clausura para potenciar la I+D mediante la promoción de la colaboración con las instituciones pertinentes. El Organismo de Energía Atómica del Japón (JAEA) estableció una nueva organización mundial de I+D, con sede en el Japón, denominada Laboratorios Colaborativos de Ciencia Avanzada para la Clausura. Además, el JAEA puso en marcha el Centro de Desarrollo de Tecnología de Control Remoto de Naraha, donde se realizarán el desarrollo y las pruebas de verificación del equipo de operaciones a distancia, como los robots, y de los procesos conexos. El JAEA inició también la construcción del Centro de Análisis e Investigación de Okuma.

Gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso

65. Se estudiaron más a fondo las opciones para la gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso, al término de su vida útil, incluida su disposición final junto con otros desechos en instalaciones adecuadas. Las opciones de reciclado y repatriación han aumentado. En varios países, como Filipinas, Ghana y Malasia, hay proyectos de disposición final en pozos barrenados en diversas fases de desarrollo.

66. En 2016 se realizaron con éxito varias operaciones de retirada de fuentes radiactivas selladas en desuso de los locales en que se habían utilizado, para someterlas a control en condiciones de almacenamiento adecuadas. También se efectuó la repatriación de cuatro fuentes radiactivas selladas en desuso de la categoría 1 fabricadas en Francia: una del Líbano, una de Túnez y dos del Camerún. Una fuente radiactiva sellada en desuso de la categoría 1 fue retirada de un cabezal de teleterapia en Uganda y trasladada a un lugar de almacenamiento seguro. Dos fuentes de la categoría 1 retiradas de un hospital fueron almacenadas en un lugar seguro en Jordania. En varios Estados Miembros, entre ellos Albania, Burkina Faso, el Líbano y la ex República Yugoslava de Macedonia, se ha iniciado la retirada de fuentes de las categorías 1 y 2, y se espera concluirla en 2017.

67. Se han hecho progresos importantes en la incorporación de una celda caliente móvil en diversos diseños de disposición final en pozos barrenados, lo que reducirá al mínimo la manipulación de las fuentes y eliminará el transporte innecesario. Además, se ha diseñado un conjunto de herramientas móvil para facilitar las operaciones de acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 3 a 5 y apoyar la preparación para la disposición final en pozos barrenados.

68. En Filipinas, Indonesia, Malasia, Nepal, Tailandia y Viet Nam concluyeron las operaciones de acondicionamiento de fuentes radiactivas selladas en desuso y el personal local recibió una capacitación adecuada.

69. El Organismo amplió el acceso al Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados, haciéndolo extensivo a un grupo más amplio de usuarios de los Estados Miembros para facilitar la identificación de las fuentes radiactivas selladas en desuso que se encuentran sobre el terreno. En 2016 se comenzaron a añadir al catálogo nuevos detalles sobre las fuentes y los dispositivos, para aumentar aún más su utilidad.

70. La operación de retirada de fuentes radiactivas selladas en desuso de alta actividad del Brasil comenzó en octubre de 2016 y debería finalizar en febrero de 2017. En virtud del acuerdo de cooperación trilateral entre el Brasil, el Canadá y los Estados Unidos de América, se procesarán y despacharán al extranjero más de 80 fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 1 y 2 de origen canadiense y estadounidense. Las primeras se enviarán a la empresa Gamma-Service Recycling de Leipzig (Alemania), mientras que las segundas se repatriarán a los Estados Unidos de América. Esta operación correrá a cargo de grupos capacitados de la South African Nuclear Energy Corporation.

Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos

71. La Argentina ha iniciado la puesta en marcha, en el Centro Atómico Ezeiza, de una instalación para el hormigonado y la compactación de desechos de actividad baja procedentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (principalmente de los reactores de investigación, la producción de radioisótopos y las actividades de investigación) y de otros generadores externos (empleados en la fabricación de combustible y en aplicaciones médicas, industriales y de investigación).

72. La Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear de Finlandia concedió una licencia para la plena explotación de la instalación de solidificación de Fortum, en la central nuclear de Loviisa. La instalación tratará los desechos líquidos de actividad baja e intermedia, ya existentes y futuros (incluidos los lodos y las resinas de intercambio iónico), generados por las operaciones de la central. Esta instalación es un buen ejemplo de cómo la planificación de la gestión integrada de los desechos conduce al establecimiento de una instalación única diseñada para gestionar eficazmente los desechos heredados del pasado, los que se producen en el presente y los que se generarán en el futuro.

73. La reducción al mínimo de los desechos es un objetivo fundamental en Fukushima Daiichi, donde diariamente se producen grandes cantidades de desechos sólidos consistentes en artículos tales como la ropa protectora (guantes, trajes de protección) y los materiales utilizados en las operaciones (papel, plásticos, trapos, madera). Por consiguiente, la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio ha puesto en servicio recientemente una instalación de incineración de desechos sólidos de diversos tipos compuesta por dos líneas, cada una de ellas con capacidad para procesar 300 kilogramos de desechos por hora. La ceniza resultante representa una pequeña fracción del volumen inicial y se almacenará en bidones en el emplazamiento, a la espera de su disposición final.

74. Australia ha terminado el diseño de una planta integrada completa para tratar los desechos de su instalación de producción de molibdeno 99 con la tecnología ‘synroc’. El comienzo de la construcción está previsto para 2017. El proceso ‘synroc’ inmoviliza los desechos radiactivos líquidos en una matriz duradera de roca sintética, para su disposición final.

75. En la central de Sellafield, en el Reino Unido, se ha puesto en servicio una planta de vitrificación en contenedores. La vitrificación es una tecnología afianzada que inmoviliza líquidos y lodos en una forma vítrea duradera para su disposición final. El sistema de vitrificación en contenedores GeoMelt está diseñado para tratar los flujos menores de desechos problemáticos para los que no existe actualmente ninguna vía de disposición final.

76. Sellafield Ltd (Reino Unido) anunció en marzo de 2016 que había trasladado la totalidad de su combustible nuclear histórico no embalado de su Piscina de Almacenamiento de Combustible de las Pilas a un edificio de almacenamiento moderno. Ello rebajó un 70 % los niveles de radiactividad de la piscina de combustible gastado, en servicio desde hace 68 años, reduciendo significativamente los riesgos para las personas y el medio ambiente.

Disposición final de desechos radiactivos

77. En todo el mundo hay instalaciones de disposición final en funcionamiento para todas las categorías de desechos radiactivos, salvo los desechos de actividad alta y/o el combustible gastado (declarado como desecho). Entre ellas se cuentan las instalaciones de disposición final en zanjas para desechos de actividad muy baja (por ej., en España, los Estados Unidos de América, Francia y Suecia) o para desechos de actividad baja en zonas áridas (por ej., en los Estados Unidos de América y Sudáfrica); las estructuras artificiales cerca de la superficie para desechos de actividad baja (por ej., en China, Eslovaquia, España, Francia, Hungría, la India, el Japón, Polonia, el Reino Unido y la República Checa); y las estructuras artificiales para desechos de actividad baja e intermedia situadas en formaciones geológicas a diversas profundidades (por ej., en Alemania, los Estados Unidos de América, Finlandia, Hungría, Noruega, la República Checa y la República de Corea).

78. Otras instalaciones de disposición final para desechos de actividad baja e intermedia, como las de Alemania (Konrad), Bélgica (Dessel), Bulgaria (Radiana), el Canadá (Kincardine), Eslovenia (Vrbina), Lituania (Stabatiškės), la República Islámica del Irán (Talmesi) y Rumania (Saligny), se encuentran en diferentes fases de la concesión de licencias o la construcción.

79. Las opciones para la disposición final de los desechos de materiales radiactivos naturales varían según los reglamentos nacionales, y abarcan desde instalaciones de disposición final en zanjas hasta estructuras artificiales subsuperficiales, como en Noruega.

80. En Australia, el Gobierno de Australia Meridional recibió el informe de su Real Comisión del Ciclo del Combustible Nuclear y anunció que aplicaría nueve de las doce recomendaciones formuladas. Una de ellas se refiere a la continuación de las investigaciones para evaluar la oportunidad de establecer instalaciones internacionales de almacenamiento y de disposición final de combustible nuclear gastado y desechos de actividad intermedia en Australia Meridional.

81. La Empresa Estatal de Desechos Radiactivos de Bulgaria recibió una licencia y comenzó a construir una instalación de disposición final cerca de la superficie para desechos de actividad baja en el emplazamiento de Radiana, cerca de la central nuclear de Kozloduy.

82. En el Canadá, se prevé que para fines de 2017 el gobierno federal adoptará una decisión sobre la evaluación ambiental del repositorio geológico profundo para desechos de actividad baja e intermedia (LILW) propuesto por Ontario Power Generation en el emplazamiento de Bruce en Kincardine, Ontario. Asimismo, se inició una evaluación ambiental de la propuesta de los Laboratorios Nacionales Canadienses de establecer una instalación de disposición final cerca de la superficie para desechos radiactivos de actividad baja y otros desechos compatibles en el emplazamiento de Chalk River.

83. En China hubo avances en el desarrollo del programa de disposición final geológica profunda, con la decisión de construir una instalación subterránea de investigación en una formación cristalina en la zona de Beishan, donde se han realizado investigaciones y un proceso iterativo de selección del emplazamiento en una formación sedimentaria receptora.

84. El Gobierno de Estonia decidió en marzo de 2016 que la futura instalación de disposición final del país se situaría en el emplazamiento de la actual instalación de almacenamiento central, en el centro submarino de Paldiski.

85. En Finlandia, en diciembre de 2016 comenzaron en Olkiluoto los trabajos de construcción de la primera instalación de disposición final geológica de combustible nuclear gastado que habrá en el mundo.

86. A solicitud de la Autoridad de Seguridad Nuclear francesa, el Organismo realizó en noviembre de 2016 un examen por homólogos del dossier de opciones de seguridad del proyecto de disposición final geológica para desechos de actividad alta Cigéo.

87. El Gobierno de Alemania recibió el informe de su comisión nacional sobre el almacenamiento de desechos muy radiactivos, en que se recomendaba la realización de un proceso nacional de selección de un emplazamiento para un repositorio geológico profundo. El informe contenía recomendaciones detalladas sobre los criterios de exclusión por motivos de seguridad y los criterios para la evaluación comparativa que deberían tomarse en consideración, así como sobre los procesos de interacción con los interesados que deberían establecerse para lograr una amplia aceptación pública de las decisiones sobre el emplazamiento. El Gobierno recibió también un informe sobre la estimación de los costos y la financiación de las responsabilidades nacionales en la parte final del ciclo, incluida la disposición final de los desechos radiactivos.

88. En la República Islámica del Irán prosigue la construcción de la instalación de disposición final cerca de la superficie en Talmesi, y se han aceptado los primeros contenedores de desechos para el almacenamiento *in situ*, a la espera de que comiencen las operaciones de disposición final.

89. La República de Corea estableció su política nacional sobre la gestión de los desechos de actividad alta, basándose en las recomendaciones de su Comisión sobre Participación Pública en la Gestión del Combustible Nuclear Gastado. La política presenta un cronograma para el desarrollo de un programa de disposición final geológica, que incluye la selección de un emplazamiento para un laboratorio de investigación subterráneo y la construcción y explotación de una instalación de disposición final geológica. La segunda etapa de la instalación para la disposición final de desechos de actividad baja e intermedia de Wolsong, que prevé la construcción de cámaras acorazadas cerca de la superficie, está actualmente en la fase de examen de la solicitud de licencia.

90. La Federación de Rusia está haciendo progresos en su estrategia de establecer una red de instalaciones de disposición final cerca de la superficie en todo el país. El Operador Nacional para la Gestión de los Desechos Radiactivos ha obtenido dos licencias para la disposición final cerca de la superficie en un emplazamiento nuclear ya existente en la región de los Urales, y sigue tramitando las solicitudes de licencia para la disposición final en otros dos emplazamientos nucleares ya existentes. Además, se está evaluando una solicitud de licencia para una instalación subterránea de investigación, como primera parte de la futura instalación de disposición final geológica profunda que está previsto establecer cerca de Krasnoyarsk.

91. En junio de 2016, la Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica aprobó la solicitud de licencia para el repositorio geológico profundo de combustible gastado, y para 2017 está programada una nueva audiencia. El proceso de concesión de la licencia para la ampliación del repositorio de desechos de actividad baja e intermedia de período corto, conocido como Repositorio Final de Desechos Radiactivos de Período Corto, aún no ha terminado.

92. Suiza ha avanzado en la segunda etapa del proceso de selección de un emplazamiento para su repositorio geológico profundo. Para ello trabajó activamente con las ‘Conferencias Regionales’ de los interesados de las regiones en estudio, llevó a cabo su campaña de caracterización sísmica en 3D de los emplazamientos y obtuvo las licencias de perforación para su programa de caracterización mediante pozos barrenados. Las evaluaciones comparativas se basan en 13 criterios y 49 indicadores, conforme a lo establecido por la autoridad de seguridad nacional.

93. En julio de 2016, la autoridad de planificación de Cumbria (Reino Unido) aprobó la construcción de dos nuevas cámaras acorazadas en el repositorio de desechos de actividad baja del Reino Unido, junto con la ampliación de una tercera cámara. Ello asegurará el futuro de la instalación, cercana al pueblo de Drigg, hasta 2050. El inicio de las obras de construcción está previsto para 2017.

A.4. Seguridad

94. En todo el mundo se siguió avanzando en el fortalecimiento y la mejora de la seguridad de las centrales nucleares. Ello incluyó la determinación y aplicación de las lecciones aprendidas del accidente nuclear de Fukushima Daiichi, la mejora de la eficacia de la defensa en profundidad, el fortalecimiento de la capacidad de preparación y respuesta para casos de emergencia, el mantenimiento y la mejora de la creación de capacidad, y la protección de las personas y del medio ambiente contra la radiación ionizante.

95. El Organismo ha definido las prioridades de la seguridad nuclear para reforzar el marco mundial de seguridad nuclear. Esas prioridades abarcan toda la gama de actividades del Organismo en las esferas de la seguridad nuclear, radiológica, del transporte y de los desechos. El Organismo publicó una revisión de los Requisitos de Seguridad de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* para incorporar las

lecciones aprendidas del accidente nuclear de Fukushima Daiichi. Estas publicaciones comprenden cinco Requisitos de Seguridad aplicables a las centrales nucleares que aparecieron como revisiones específicas ‘por enmienda’. Además, se publicaron revisiones completas de otros dos Requisitos de Seguridad, uno relacionado con el liderazgo y la gestión en pro de la seguridad y el otro con la seguridad de los reactores de investigación. Ha continuado el examen y la revisión de las Guías de Seguridad correspondientes¹⁰.

96. El análisis de los datos procedentes del Sistema Internacional de Notificación relacionado con la Experiencia Operacional en lo que respecta a las centrales nucleares indica la persistencia de varios aspectos problemáticos, como las vulnerabilidades del diseño de las centrales o de sus prácticas operacionales en algunas situaciones de riesgo externo, así como en la ejecución de modificaciones en las centrales. Los datos también indican que la vigilancia de los contratistas sigue siendo un problema y que el número de incidentes relacionados con la degradación de los componentes por envejecimiento va en aumento.

97. En un creciente número de reactores nucleares de potencia de todo el mundo se están aplicando programas de explotación a largo plazo y gestión del envejecimiento. Al final de 2016, el 46 % de los 450 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo llevaban entre 30 y 40 años en explotación, y otro 15 % llevaba más de 40 años.

98. El Grupo Internacional de Seguridad Nuclear (INSAG) observó que se estaban desarrollando diseños de reactores modernos para reducir a niveles muy bajos los riesgos relacionados con sucesos internos. La principal fuente de riesgos radicará probablemente en los sucesos externos, lo que justificará que se siga prestando atención a esos sucesos en los próximos años. Los expertos que asisten a las reuniones técnicas del Organismo siguen expresando interés en abordar las lecciones aprendidas del accidente de Fukushima Daiichi en relación con: a) las incertidumbres relacionadas con la evaluación de los riesgos extremos; b) la necesidad de utilizar datos históricos y prehistóricos en la evaluación de los riesgos externos; c) la consideración de combinaciones de riesgos externos; d) la consideración de los efectos de los riesgos externos en los emplazamientos con unidades múltiples; y e) el uso de enfoques probabilistas para el análisis de los sucesos externos.

99. La seguridad operacional de las centrales nucleares continúa siendo alta, como lo demuestran los indicadores de seguridad recopilados por el Organismo y la Asociación Mundial de Operadores Nucleares. La figura A-9 muestra el número de paradas de emergencia o disparos manuales y automáticos no previstos registrados por cada 7000 horas de funcionamiento (aproximadamente un año) por unidad. Las paradas de emergencia son solo uno de los varios indicadores posibles del comportamiento de la seguridad, pero se utilizan comúnmente como medida del éxito en la mejora de la seguridad de las centrales, expresada en términos de la reducción del número de transitorios termohidráulicos y de reactividad no deseados y no previstos que requirieron la parada de emergencia del reactor.

¹⁰ En el *Examen de la Seguridad Nuclear de 2017* (GOV/2017/3) del OIEA figuran más detalles al respecto.

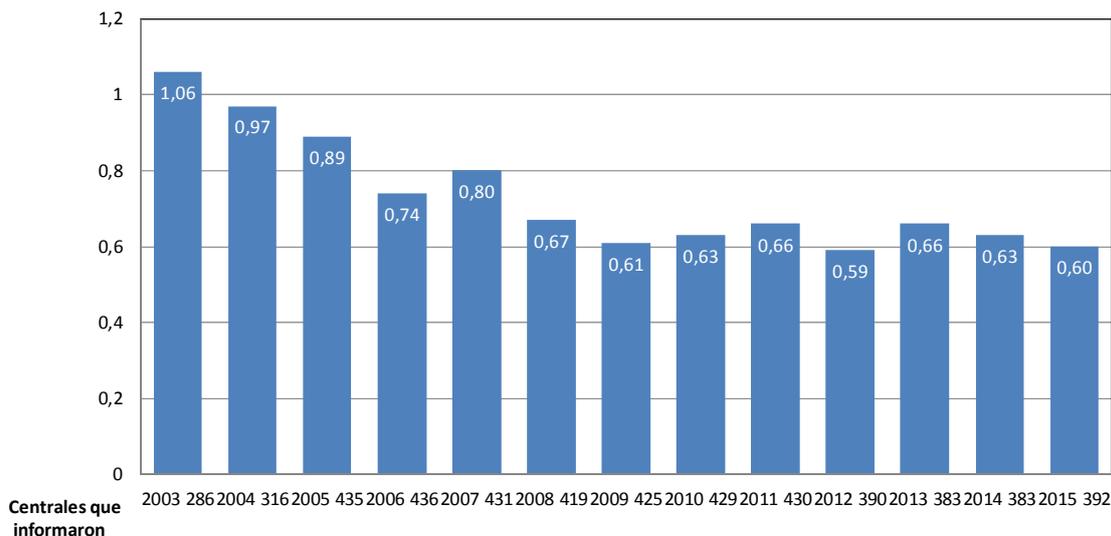


Fig. A-9. Tasa media de paradas de emergencia: número de paradas de emergencia automáticas y manuales registradas por cada 7000 horas de funcionamiento de una unidad (Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA: www.iaea.org/pris).

100. En varios Estados Miembros se están registrando dosis colectivas derivadas de los usos médicos de la radiación que superan las dosis causadas por la radiación natural de fondo y por otras fuentes humanas. Dado el aumento de los usos pacíficos de la tecnología de la radiación, se prevé que el número de Estados Miembros en esa situación crecerá. Un porcentaje importante (entre el 20 % y el 50 % en algunas zonas) de la exposición médica individual puede evitarse con una selección más adecuada de los procedimientos médicos y con medidas eficaces de protección radiológica. Los enfoques establecidos para optimizar la protección radiológica de los pacientes en el diagnóstico por imágenes se han aplicado solo en parte a nivel mundial, y es preciso seguir promoviendo su uso correcto y más amplio a fin de mejorar la seguridad y la calidad.

101. Las tecnologías y los procedimientos radioterapéuticos complejos están llegando cada vez más a regiones en que nunca antes se habían utilizado, lo que crea la necesidad de establecer medidas de seguridad adecuadas. Aunque hay amplio acuerdo entre los expertos en que la radioterapia es una forma eficaz de tratamiento, también se reconoce que es preciso reforzar aún más las medidas de seguridad.

B. Datos atómicos y nucleares

102. La Organización Internacional de Colaboración para una Biblioteca de Datos Evaluados (CIELO), coordinada por la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE (AEN de la OCDE), ha estimulado los avances en las evaluaciones de la sección eficaz de captura de neutrones de los nucleidos que revisten particular interés para las tecnologías nucleares: los isótopos del oxígeno, el hierro, el uranio y el plutonio. Gracias al esfuerzo, coordinado por CIELO, de los expertos en ciencias nucleares de todo el mundo, se ha logrado mejorar la exactitud de las simulaciones en gran escala de la criticidad nuclear y el transporte de neutrones. Las evaluaciones de CIELO se toman en consideración para su inclusión en las bibliotecas mundiales de datos nucleares, como la del Archivo de Datos Nucleares Evaluados ENDF/B-VIII (Estados Unidos de América), la Biblioteca de Datos Neutrónicos Evaluados del Japón, la Base de Datos Conjunta sobre Datos Evaluados de Fisión y Fusión (AEN de la OCDE), la Biblioteca de Datos Nucleares Evaluados de China, y la Biblioteca de Datos Nucleares Evaluados basada en TALYS (Comisión Europea/OIEA).

103. La Red Internacional de Evaluadores de Datos de Estructuras y Desintegración Nucleares (NSDD) es una iniciativa mundial de colaboración en la investigación y evaluación de la estructura básica y las propiedades de decaimiento radiactivo de los nucleidos. La utilización de la base de datos de la NSDD por los científicos nucleares ha recibido recientemente un gran impulso gracias a la conexión de la base de datos con aplicaciones de la tecnología de las comunicaciones moderna, como el sitio web LiveChart del Organismo y Isotope Browser, lanzado por el Organismo en 2013. Esta última aplicación, disponible gratuitamente para los sistemas operativos de Android y iOS, permite recuperar información sobre los nucleidos desde un dispositivo móvil y ha sido descargada ya alrededor de 40 000 veces.

104. La base de datos EXFOR (Datos Experimentales sobre Reacciones Nucleares) contiene ahora más de 22 000 conjuntos de datos de reacciones nucleares experimentales, recopilados desde 1935 hasta la fecha. Esta información sin paralelo es la base de las bibliotecas de datos nucleares que se utilizan para todas las tecnologías nucleares, principalmente para el análisis de centrales nucleares, las cuestiones relativas al ciclo del combustible, los diseños de reactores innovadores, la fusión y la producción de isótopos de uso médico. Se han establecido nuevas asociaciones de colaboración, especialmente en China y la India, para actualizar esa base de datos.

105. Actualmente, un enfoque innovador del análisis de los daños por irradiación basado en los datos nucleares está tendiendo puentes entre la física a escalas de magnitud completamente diferentes. Gracias a la potencia de las computadoras actuales, es posible ahora estimar funciones de la respuesta a daños — como los patrones de desplazamientos por átomo (dpa) NRT¹¹ y arc (corregidos para tener en cuenta la recombinación atómica) y las sustituciones por átomo, así como el kerma (la energía cinética liberada por unidad de masa) y la producción de gas — con una base científica mejor, incluida una expresión cuantitativa de las incertidumbres. Estos adelantos tendrán consecuencias en el blindaje de los reactores de fisión y de fusión, y en el de los aceleradores.

106. Ha habido un aumento notable de las actividades y publicaciones relacionadas con la producción de isótopos de uso médico mediante aceleradores, y en la utilización conexa de bibliotecas de datos nucleares sobre reacciones inducidas por partículas cargadas para determinar las vías óptimas de producción de esos isótopos.

107. La propagación de la incertidumbre de los datos nucleares y atómicos básicos a los dispositivos nucleares a gran escala, empleada tradicionalmente para la criticidad, se utiliza ahora también para otros aspectos de la explotación nuclear segura y fiable. Algunos sectores de investigación destacados en que ahora se tienen en cuenta las estimaciones de la incertidumbre son la evaluación de los daños radiológicos en reactores de fisión y de fusión, el uso de datos atómicos y moleculares para la modelización del hidrógeno y el helio en el plasma de fusión, con resolución de los estados atómicos excitados, y la obtención de datos sobre la erosión y la retención del tritio en los materiales expuestos a un plasma de berilio.

108. En septiembre de 2016 tuvo lugar en Brujas (Bélgica) la Conferencia Internacional sobre Datos Nucleares para la Ciencia y la Tecnología, organizada conjuntamente por el Centro Común de Investigación (CCI) de la Comisión Europea, la AEN de la OCDE y el OIEA, con la asistencia de alrededor de 450 participantes. Se presentaron las novedades más recientes en la tecnología de los datos nucleares, como las posibilidades experimentales en el Instituto de Medidas y Materiales de Referencia del CCI en Geel (Bélgica), y enfoques más sistemáticos para la producción de datos nucleares con el código TALYS.

¹¹ El patrón NRT-dpa es una medida del daño sufrido por un material, y fue propuesto por Norgett, Robinson y Torrens in 1975.

109. Se han desarrollado datos nucleares mejorados para las reacciones inducidas por partículas alfa sobre el flúor, lo que reviste interés para los análisis de salvaguardias.

110. China está dedicando más esfuerzos a la evaluación de los datos nucleares para un reactor de sales fundidas (MSR). Diversas actividades experimentales y de modelización, coordinadas por el Centro de Datos Nucleares de China en Beijing, están concentradas ahora en los datos de interés para el MSR, que tienen un impacto en la seguridad y la economía.

111. La Comisión Europea está invirtiendo en el desarrollo de datos nucleares a amplia escala a través de su proyecto CHANDA, destinado a resolver los retos que plantean esos datos, con la colaboración de laboratorios, universidades y laboratorios de investigación de casi todos los países de la Unión Europea. La atención se centra en la reducción al mínimo de los desechos radiactivos y en los sistemas de neutrones rápidos. La creación de nuevas bibliotecas de datos nucleares permitirá realizar análisis computacionales superiores de los sistemas de reactores avanzados.

C. Aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación

C.1. Aceleradores

112. Los aceleradores de partículas fueron desarrollados para arrojar luz sobre las cuestiones fundamentales planteadas por los científicos que investigaban la estructura interna y las propiedades de los núcleos atómicos y las leyes de la física que rigen las interacciones de la radiación y la materia. Hoy en día, la utilización en todo el mundo de decenas de miles de aceleradores en la industria, la medicina, el medio ambiente y la investigación básica, incluidas la física subatómica y la astrofísica, beneficia a millones de personas en la vida diaria. Para responder a la demanda cada vez mayor de aceleradores en la investigación científica de punta, y mantener y ampliar la extensa gama de aplicaciones que ofrecen grandes beneficios socioeconómicos, es de vital importancia seguir mejorando y promoviendo la tecnología de los aceleradores. Las innovaciones tecnológicas están llevando a los aceleradores a los límites de sus posibilidades en lo que respecta a la energía, el tipo y el tamaño de los haces de partículas acelerados. Otro reto es reducir el tamaño y el costo de los aceleradores para aplicaciones industriales y médicas.

C.1.1. Técnicas novedosas de bombeo y sonda desarrolladas para la investigación *in situ* del deterioro por radiación

113. La comprensión de los efectos de las radiaciones está avanzando gracias a la experimentación y las simulaciones. Una novedad muy interesante es la rápida aparición de técnicas de bombeo y sonda, en que pulsos de iones breves e intensos (procedentes de aceleradores de inducción como el NDCX-II del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley o de aceleradores de plasma impulsados por láser) pueden producir cambios en la dinámica estructural de los materiales que luego es posible rastrear *in situ* con sondas estructurales rápidas, por ejemplo con difracción electrónica ultrarrápida o pulsos intensos de rayos X. Estas nuevas técnicas permiten investigar los efectos de las radiaciones iónicas *in situ*, lo que mejora los conocimientos fundamentales y puede acelerar el desarrollo de nuevos materiales con un mejor comportamiento y una mayor radiorresistencia en entornos de radiación alta.



Fig. C-1. El acelerador NDCX-II¹² del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, Berkeley (Estados Unidos de América) permite estudiar la dinámica estructural de los materiales. La fotografía muestra el acelerador de diez metros de longitud, con la estación terminal, que aloja el blanco, en primer plano (Fotografía: Laboratorio Berkeley).

C.1.2. Nuevos dosímetros biocompatibles con haces iónicos focalizados

114. Las características de los dosímetros fabricados con diamante sintético ofrecen algunas ventajas con respecto a los dispositivos más tradicionales, como su radiorresistencia y su biocompatibilidad, especialmente cuando se utilizan en la radioterapia con protones. Se están empleando haces iónicos focalizados con protones de una amplia gama de energías, de 5 a 250 MeV, para evaluar la idoneidad, como dosímetros exactos, de los dispositivos formados por un único cristal de diamante. Los haces de alta energía corresponden a la práctica clínica, y los haces de baja energía, creados por un sistema de microsonda nuclear de barrido, permiten medir la respuesta detallada del dispositivo para evaluar los nuevos diseños de detectores. Las imágenes obtenidas con la técnica de la carga inducida por haz de iones (IBIC) con un microhaz de 5,5 MeV permiten medir la respuesta detallada del dispositivo junto con la eficiencia de recolección de carga, que puede ser cercana al 100 %.

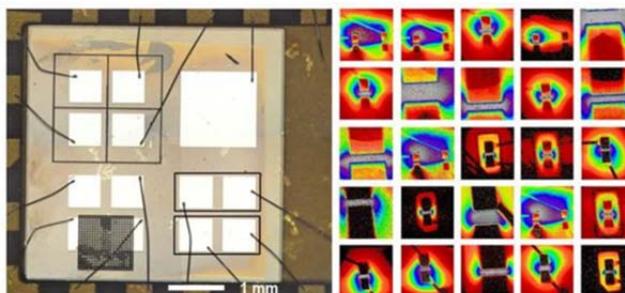


Fig. C-2. Las imágenes muestran un conjunto de prototipos de dosímetros fabricados con diamante sintético industrial y un montaje de mapas de la respuesta a la irradiación de diferentes diseños, medida con la técnica IBIC utilizando una radiación de iones de He⁺ de 5,5 MeV (Fotografías: Prof. D. Jamieson, Universidad de Melbourne; Dr. J. Davis, Universidad de Wollongong; y Dr. D. Prokopovich, ANSTO).

C.1.3. Dispersión neutrónica basada en aceleradores

115. Impulsado por los avances en los aceleradores de protones en el último decenio, el flujo de neutrones promediado en el tiempo de las fuentes de espalación, como la Fuente de Neutrones por Espalación de los Estados Unidos de América y la Fuente Europea de Espalación que estará disponible

¹² Para obtener información más detallada, véase P. A. Seidl, et al., Nucl. Inst. Methods A800 (2015) 98-103.

próximamente en Suecia, ha superado el de los reactores de haz de mayor flujo. El brillo sin precedentes de estas fuentes, unido a la capacidad de penetración del neutrón y a su fuerte momento magnético y dispersión por el hidrógeno, promete avances en los sectores de la energía y los materiales magnéticos, las ciencias de la vida, la arqueología y la geología y los materiales de ingeniería.

116. Para estas aplicaciones, los neutrones tienen que ser moderados, lo que tradicionalmente se hacía con voluminosos moderadores criogénicos, de los que solo se emitía hacia las instalaciones experimentales una pequeña fracción de neutrones. Por ello, la atención se está centrando ahora en una nueva generación de materiales y diseños para los moderadores. Seleccionando uno de los isómeros de espín del hidrógeno, el parahidrógeno, es posible construir moderadores líquidos fríos en forma de barra o de oblea. Estos diseños reducen la absorción de neutrones y permiten una disposición más eficiente de los espectrómetros alrededor de la fuente. Asimismo, el metano sólido es un moderador frío muy eficiente, pero susceptible al deterioro por radiación. Por consiguiente, se están estudiando nuevos materiales y diseños de moderadores sólidos. Se precisa un conocimiento exacto de las secciones eficaces de captura de neutrones de los posibles materiales, y las mediciones necesarias se están llevando a cabo en muchos aceleradores de investigación, por ejemplo en la Argentina, los Estados Unidos de América, el Japón y Sudáfrica. En algunas partes, como la Federación de Rusia, se están desarrollando diseños de prototipos en que es posible inyectar pastillas de estos nuevos materiales en la vasija y luego extraerlas y regenerarlas, como otra forma de resolver el problema del deterioro por radiación.



Fig. C-3. Emplazamiento de la Fuente Europea de Espalación en Lund (Suecia), al mes de octubre de 2016. Alimentada por un acelerador lineal de protones pulsado de 2 GeV con una potencia media de haz de 5 MW, la fuente de neutrones más potente del mundo comenzará a funcionar en 2019 (Fuente: https://dam.ess.lu.se/asset-bank/images/assets/33/40_2S5D41851.jpg).

C.2. Reactores de investigación

117. Las aplicaciones más frecuentes de los reactores de investigación se enumeran en el cuadro C-1. Su potencia puede variar de cero (por ejemplo, en los conjuntos críticos o subcríticos) a aproximadamente 200 MW (t). Los reactores de investigación presentan una variedad de diseños mucho mayor que la de los reactores de potencia, y tienen también distintos modos de funcionamiento, que pueden ser constantes o pulsantes.

118. Según la Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo, se han construido 774 reactores de investigación en 70 países, y 249 de ellos, situados en 56 países, estaban en funcionamiento al 31 de diciembre de 2016. La Federación de Rusia tiene el mayor número de reactores de investigación operativos o en régimen de parada temporal (55), seguida de los Estados Unidos de América (42), China (17) y el Japón (14). Muchos países en desarrollo tienen también reactores de investigación en funcionamiento, 10 de los cuales se encuentran en África. En el mundo hay 64 reactores de investigación que funcionan a niveles de potencia de más de 5 MW y que ofrecen, por lo tanto, flujos neutrónicos altos para diversos productos y servicios.

Cuadro C-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo¹³.

Tipo de aplicación ^a	Número de reactores de investigación ^b	Número de Estados Miembros que tienen estas instalaciones
Enseñanza/capacitación	165	51
Análisis por activación neutrónica	118	51
Producción de radioisótopos	87	43
Radiografía neutrónica	69	37
Irradiación de materiales/combustible	68	27
Dispersión neutrónica	45	30
Geocronología	27	23
Transmutación (dopado del silicio)	24	16
Transmutación (gemas)	17	10
Terapia neutrónica, principalmente I+D	16	11
Otros ^c	120	36

^a Estas aplicaciones se describen con mayor detalle en la publicación del Organismo titulada *Applications of Research Reactors* (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.3, Viena, 2014).

^b De un total de 249 reactores de investigación examinados (230 en funcionamiento y 19 en régimen de parada temporal) al 31 de diciembre de 2016.

^c Otras aplicaciones son la calibración y el ensayo de instrumentos, experimentos de blindaje, mediciones de datos nucleares, visitas públicas y seminarios.

119. Muchos de los reactores de investigación en funcionamiento aún tienen un factor de utilización relativamente bajo y la mitad de ellos tiene más de 40 años de antigüedad. La mayoría requiere una atención continua en lo que respecta a la planificación estratégica, la gestión del envejecimiento, la modernización y la renovación. Los esfuerzos por mejorar la utilización y generar entradas adicionales siguen aumentando. En los tres últimos años, las organizaciones explotadoras de 41 instalaciones con reactores de investigación elaboraron planes estratégicos y los sometieron al examen del Organismo¹⁴.

120. Mediante la colaboración internacional se sigue promoviendo y mejorando el uso de los reactores de investigación para la creación de capacidad nuclear, incluidas, entre otras cosas, la enseñanza y la capacitación. Un ejemplo es el proyecto del Reactor-Laboratorio por Internet (IRL), iniciado en 2015, con reactores anfitriones en América Latina y el Caribe y en Europa. El proyecto tiene por objeto conectar por Internet a universidades e institutos de investigación con reactores de investigación activos dedicados a la enseñanza y la capacitación. La ejecución del proyecto IRL continuó en 2016; se realizaron seis transmisiones en directo en América Latina y el Caribe (con el reactor RA-6 de la CNEA de la Argentina como instalación anfitriona y organizaciones receptoras en Colombia, Cuba y el Ecuador) y cinco transmisiones en directo en Europa y África (con el reactor ISIS de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA) de Francia como instalación anfitriona y organizaciones receptoras en Belarús, Lituania, la República Unida de Tanzania y Túnez). Otro ejemplo es el sistema del ICERR (Centro Internacional basado en Reactores de Investigación designado por el OIEA), facilitado por el Organismo, que tiene por objeto promover la cooperación entre los Estados Miembros para la creación de capacidad nuclear y la realización de actividades colaborativas de I+D. Tras la designación del primer ICERR en 2015 —a saber, CEA, representada por sus centros de investigación de Saclay y Cadarache—, en 2016 se designó como ICERR el Instituto de Investigación sobre Reactores Atómicos de Dimitrovgrad (Federación de Rusia), y el Centro Belga de Investigaciones Nucleares de Mol (Bélgica) pasó a ser candidato para esa designación.

¹³ Según la Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo: <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.

¹⁴ El Organismo revisó su documento de orientación de 2001 titulado *Strategic planning for research reactors: Guidance for reactor managers* (IAEA-TECDOC-1212) para incorporar en él aspectos de los proyectos de reactores nuevos, o de renovación importante de los ya existentes, y dar a conocer las experiencias de las instalaciones bien explotadas a través de numerosos ejemplos. La versión revisada aparecerá como publicación de la Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NG-T-3.16 en 2017.



Fig. C-4. Izquierda: Transmisión en directo a la Comisión de Energía Atómica de Tanzania de un experimento de demostración efectuado en el reactor anfitrión, el reactor de investigación ISIS de la CEA en Saclay (Francia), durante una reunión de coordinación del proyecto de cooperación técnica regional del Organismo RAF/1/005 (Fotografía: OIEA). Derecha: Transmisión en directo de un laboratorio desde el reactor anfitrión RA-6 de la CNEA en Bariloche (Argentina) (Fotografía: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)).

121. Varios países están construyendo nuevos reactores de investigación, como instalaciones nacionales clave para el desarrollo de programas e infraestructura de ciencia y tecnología nucleares, comprendida la energía nucleoelectrónica. Se están construyendo nuevos reactores de investigación en la Arabia Saudita, la Argentina, el Brasil, la Federación de Rusia, Francia, la India y la República de Corea. Varios Estados Miembros, entre ellos Belarús, Bélgica, el Estado Plurinacional de Bolivia, los Estados Unidos de América, los Países Bajos y Viet Nam, tiene planes oficiales para la construcción de nuevos reactores de investigación. Otros, como Azerbaiyán, Bangladesh, Etiopía, Filipinas, Ghana, Kenya, Kuwait, el Líbano, Malasia, Mongolia, Myanmar, Nigeria, la República Unida de Tanzania, el Senegal, Sudáfrica, el Sudán, Tailandia, Tayikistán y Túnez, están estudiando la posibilidad de construir ese tipo de instalaciones.¹⁵ En 2016 se llevó a cabo con éxito la puesta en servicio del reactor de investigación y capacitación de Jordania, un reactor de investigación multipropósito de 5 MW (térmicos) situado en el campus de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Jordania.

122. Las redes y coaliciones regionales de reactores de investigación propiciadas por el Organismo¹⁶ ayudan a fomentar la cooperación internacional y permiten ampliar las comunidades de partes interesadas y de usuarios de los reactores de investigación. En 2016, dos organizaciones con reactores de investigación, la Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO) y el Instituto del Reactor de Delft de los Países Bajos, fueron designadas como centros colaboradores del OIEA en las esferas de las técnicas multianalíticas para el estudio de materiales, los estudios ambientales y las aplicaciones industriales, y las metodologías basadas en la activación neutrónica y los haces de neutrones para los reactores de investigación, respectivamente.

123. Al final de 2016, 97 reactores de investigación habían sido convertidos al uso de combustible de UPE o se encontraban en parada definitiva confirmada, incluida una instalación de producción de molibdeno 99 que empleaba UME. Como logros importantes en 2016 cabe mencionar la conversión al uso de UPE del prototipo chino de reactor miniatura fuente de neutrones (MNSR), que alcanzó la criticidad en marzo, y del reactor WWR-K de Kazajstán, que la alcanzó en abril, y la eliminación de todo el UME del Conjunto Crítico Rápido en el Japón. Junto con China, los Estados Unidos de

¹⁵ La publicación del Organismo *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* (Colección de Energía Nuclear del OIEA N° NP-T-5.1) y una serie de documentos de apoyo tienen por objeto ayudar a los Estados Miembros en esta esfera.

¹⁶ El Organismo ha formado varias coaliciones de reactores de investigación, en el Báltico, el Caribe, África Central, Asia Central, Europa Oriental y la región del Mediterráneo, así como en la Comunidad de Estados Independientes, y redes mundiales de reactores de investigación TRIGA. En relación con estas redes, el Organismo publicó recientemente el informe *History, Development and Future of TRIGA Research Reactors* (Colección de Informes Técnicos 482, OIEA, Viena, 2016).

América y otros países interesados, el Organismo siguió prestando apoyo a Ghana en sus esfuerzos por convertir su MNSR al uso de UPE y extraer el núcleo de UME, lo que se espera que ocurra en 2017. Se iniciaron las actividades de apoyo a la conversión del MNSR de Nigeria.

124. Las actividades encaminadas a reducir al mínimo el uso de uranio muy enriquecido incluyen la devolución del combustible de UME de los reactores de investigación al país de origen en el que fue enriquecido. Al final de 2016 había concluido la extracción de casi 1300 kg de combustible de UME nuevo o irradiado de reactores de investigación en el marco del programa de devolución del combustible de UME de origen estadounidense. En el programa de devolución del combustible de UME de origen ruso se extrajeron en el mismo período 2228 kg de combustible de UME nuevo e irradiado de reactores de investigación. En septiembre de 2016, Polonia, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia y el Organismo devolvieron a la Federación de Rusia los últimos 61 kg de materiales de UME de origen ruso que quedaban en el reactor de investigación Maria de Otwock-Świerk, en Polonia.

125. Para la conversión de los reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se necesitan combustibles de uranio-molibdenuo avanzados. Aunque se han hecho avances sustanciales en este campo, habrá que seguir trabajando en los ensayos de irradiación, los exámenes postirradiación y las técnicas de fabricación para llegar a disponer en el comercio de combustibles de UPE de alta densidad cualificados.

126. Aunque no hubo ninguna escasez importante de molibdeno 99 en 2016, persisten las dificultades operacionales en las instalaciones de procesamiento. La parada de algunas instalaciones globales en 2016 no dio lugar a escasez. El reactor de investigación BR2 de Bélgica, un irradiador importante para la producción de molibdeno 99, reanudó sus operaciones el 19 de julio de 2016, después de una parada de nueve meses para actividades prolongadas de mantenimiento y modernización. El reactor NRU del Canadá dejó de producir molibdeno 99 el 31 de octubre de 2016, pero sigue en estado de “espera en caliente”, como capacidad de producción de reserva para el caso improbable de que se produzca escasez mundial de este isótopo entre el 1 de noviembre de 2016 y el 31 de marzo de 2018. Los otros grandes productores han aumentado su producción para compensar esta pérdida.

127. La conversión de los procesos de producción de molibdeno 99 del uso de UME al de UPE sigue su curso, con la ANSTO (Australia) y la empresa NTP Radioisotopes (Sudáfrica) a la cabeza en el suministro de molibdeno 99 obtenido con UPE. En 2016, la ANSTO hizo progresos considerables en su nueva instalación de producción, y se espera que la construcción esté terminada a principios de 2017. NTP Radioisotopes prosigue la conversión de sus procesos al uso exclusivo de UPE. Otros dos grandes productores, el Instituto de Radioelementos de Bélgica y Mallinckrodt de los Países Bajos, han seguido avanzando en su apoyo a la conversión de sus procesos de producción a escala comercial de UME a UPE.

D. Alimentación y agricultura

D.1. Técnicas nucleares y otras técnicas conexas para determinar la autenticidad de los alimentos

128. La calidad y la inocuidad de los alimentos son preocupaciones importantes tanto para la industria alimentaria como para los consumidores. Las repetidas crisis relacionadas con la autenticidad o la inocuidad de los alimentos pueden poner en peligro la salud pública y causar una pérdida de confianza de la población en la integridad del suministro de alimentos. La globalización del comercio de alimentos ha aumentado la necesidad de sistemas eficaces de control para proteger a los consumidores de la presentación fraudulenta de los productos alimenticios. Los delitos alimentarios —el etiquetado erróneo intencional o la adulteración de los alimentos a gran escala y en forma organizada con fines de

lucro— se han convertido en una actividad delictiva importante que puede causar pérdidas económicas sustanciales y desacreditar a sectores económicos enteros, creando obstáculos al comercio internacional. Aunque los fraudes alimentarios se cometen por afán de lucro, a menudo entrañan también un riesgo en lo que respecta a la inocuidad de los alimentos, porque los productos falsificados o adulterados no se someten a los mismos controles que los auténticos y pueden contener ingredientes no declarados. Como ejemplos cabe citar la adición de melamina a la leche en polvo para aumentar el contenido aparente de proteínas, que ha causado muchos miles de casos de enfermedad y varias muertes infantiles debido a la toxicidad de la melamina; la adulteración del aceite de oliva extravirgen de alta calidad con aceites más baratos, como el de cacahuete, que no se declara en la etiqueta y puede provocar graves reacciones alérgicas; e incluso el arroz falsificado fabricado con almidón de patata y resina sintética industrial.

D.1.1. Técnicas analíticas

129. La necesidad de métodos analíticos que respalden los mecanismos de autenticación y rastreabilidad de los alimentos ha aumentado rápidamente y, con la creciente complejidad de las cadenas de suministro de alimentos y los adelantos en la tecnología y el procesamiento de estos, es probable que siga aumentando en el futuro. Las técnicas nucleares reúnen los atributos fundamentales para verificar la autenticidad de los alimentos.

130. La medición de las relaciones de los isótopos estables naturales de los bioelementos (hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre) de los alimentos puede en muchos casos proporcionar información sobre el origen geográfico y la técnica de producción, mediante la vinculación con las relaciones isotópicas encontradas en el medio ambiente o en el proceso de producción. Los isótopos estables de elementos pesados (como el estroncio) pueden aportar información también sobre la geología de la zona de origen, y esta ‘firma’ se transmite, a través de los suelos, a las plantas y los animales. Debido a que los isótopos estables son características intrínsecas de los átomos presentes en los alimentos, su distribución y sus proporciones son difíciles de manipular con fines fraudulentos.

131. Los perfiles de los elementos presentes en los productos alimenticios ofrecen información importante sobre su inocuidad en lo que respecta a la concentración de elementos potencialmente tóxicos, y pueden dar también información que vincule el alimento a su lugar de producción. La composición multielemental de los tejidos animales refleja, en cierta medida, la de la vegetación que los animales han consumido. Por ejemplo, los metales alcalinos, especialmente el rubidio y el cesio, que fácilmente se movilizan en el suelo y pasan a las plantas, son buenos indicadores de la identidad geográfica.

132. La dactilación metabolómica, que es el análisis de los metabolitos producidos por los procesos celulares o moleculares en un organismo, también se utiliza para verificar la autenticidad. La metabolómica puede ser específica o genérica. En el primer caso, se centra en grupos de metabolitos relacionados entre sí con el fin de obtener información funcional directa para la modelización; en el segundo, el objetivo es detectar en el metaboloma patrones que permitan diferenciar distintos conjuntos de muestras y construir modelos para clasificar las muestras de procedencia desconocida. Un ejemplo es la dactilación generada por centrifugación que utiliza la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) de protón para el examen sistemático de los zumos de fruta y los vinos.

133. Estas técnicas, combinadas con otras tales como la espectroscopia vibracional, el análisis del ADN y la huella microbiana, están demostrando ser de enorme utilidad para la autenticación de los productos alimenticios.

134. Para que estas técnicas sean eficaces, es preciso investigar su aplicación a diferentes productos alimenticios, desarrollar extensas bases de datos que contengan resultados de mediciones efectuadas en productos auténticos, y elaborar modelos y análisis estadísticos robustos.

Técnicas accesibles de prueba de la autenticidad

135. Con los adelantos recientes en la instrumentación analítica, las técnicas analíticas requeridas se están volviendo más accesibles. Algunos instrumentos que antes solo se utilizaban en el laboratorio están apareciendo en versiones de mesa, portátiles o de mano más asequibles, que pueden hacer posible un cribado sistemático. Por ejemplo, en los últimos tiempos han aparecido instrumentos de RMN de mesa a precios relativamente asequibles, con los que se pueden realizar análisis de cribado sistemático que antes requerían instrumentos de RMN caros y de alto campo, con infraestructura y personal especializados. De igual modo, ya están en el comercio espectrómetros del infrarrojo cercano y de fluorescencia de rayos X que están encontrando aplicaciones en los ensayos de los alimentos. Otras técnicas portátiles o de mesa que pueden tener aplicaciones en las pruebas de autenticidad son la espectrometría de movilidad iónica, que emplea una fuente de ionización de níquel 63 y que en los últimos tiempos ha empezado a utilizarse ampliamente para la detección sistemática de explosivos y drogas en los aeropuertos, y la medición de las relaciones isotópicas por espectrometría isotópica molecular de ablación por láser.

136. Gracias a su relación costo-eficacia y su accesibilidad, las técnicas modernas podrían ser utilizadas por los interesados de la industria alimentaria, los reguladores y los consumidores para un examen sistemático de los alimentos en diferentes puntos de la cadena alimentaria, lo que aumentaría significativamente la eficacia de los sistemas de control. De ser necesario, los productos sospechosos podrían luego someterse a pruebas con técnicas de confirmación avanzadas en un laboratorio de referencia, a fin de obtener información más detallada para una investigación de seguimiento.

D.2. Sonda de neutrones de rayos cósmicos: nuevo método para la vigilancia de la humedad del suelo en toda una zona

137. La agricultura absorbe aproximadamente dos tercios del consumo mundial de agua dulce. Para ayudar a hacer frente a los retos del cambio climático mundial y el rápido aumento de la población, las comunidades agrícolas de todo el mundo tienen que maximizar los rendimientos, aumentando al mismo tiempo la eficiencia en el uso del agua mediante el riego. A tal fin, se requerirán métodos de vigilancia de los recursos de humedad del suelo, para hacer un uso más eficiente del agua de riego. Los métodos tradicionales de medición del contenido de agua del suelo requieren el empleo de dispositivos puntuales *in situ*, que transmiten información representativa del contenido de agua en el punto en que se encuentran. En general, este tipo de detección *in situ* no permite captar información sobre el contenido de agua en el suelo de toda una zona, incluida su heterogeneidad natural, a menos que se instale una red de esos dispositivos. La sonda de neutrones de rayos cósmicos (SNRC) es un dispositivo novedoso que capta y cuantifica información sobre el contenido de agua del suelo en toda una zona, a distancia y con una gran extensión espacial (un círculo de aproximadamente 250 m de radio, o 20 ha de superficie), sin los inconvenientes del carácter invasivo y el consumo de tiempo de las redes de dispositivos puntuales tradicionales. Las comunidades pueden sacar provecho de la información sobre la humedad del suelo a la escala que abarca esta sonda y mejorar así la gestión de unos recursos hídricos cada vez más escasos.

138. El método de la sonda de neutrones de rayos cósmicos se basa en la detección de las partículas nucleares de alta energía que entran a la atmósfera desde el cosmos. Muchas de estas partículas chocan con los gases de la atmósfera, perdiendo energía y experimentando una cascada de transformaciones en partículas menos energéticas hasta convertirse en neutrones cerca de la superficie del suelo (fig. D-1). Estos neutrones son absorbidos rápidamente por los átomos de hidrógeno. Por lo tanto, la presencia de hidrógeno en el entorno es el principal medio por el que los neutrones incidentes desaparecen del suelo y de la atmósfera. Esto ocurre con todas las formas de hidrógeno de un determinado ambiente, ya sea que las fuentes de ese hidrógeno cambien rápidamente (como la humedad del suelo) o lentamente (como la vegetación, el agua superficial o el material orgánico del

suelo) o que no cambien para nada con tiempo (el agua de los minerales arcillosos o las estructuras humanas). La sonda de neutrones de rayos cósmicos detecta pasivamente esos neutrones que se mueven a través del suelo y el aire y da recuentos por unidad de tiempo. Debido a que la mayoría del hidrógeno que se encuentra dentro de la Tierra y en su superficie está en forma de moléculas de agua, es posible establecer una relación entre los recuentos de neutrones y la cantidad de agua presente en el suelo de una determinada zona. La metodología de estas sondas comprende un proceso de calibración por el que se elimina la señal del hidrógeno ambiental que no corresponde al contenido de agua del suelo. Este proceso se realiza mediante campañas de muestreo de validación *in situ*.

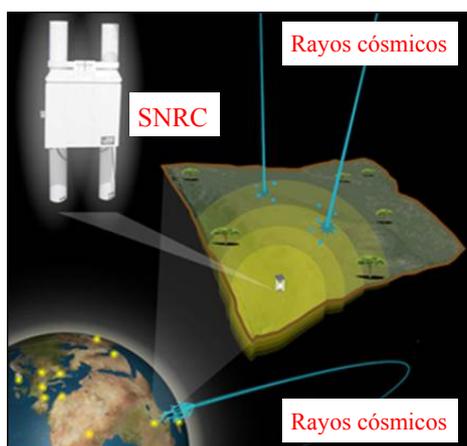


Fig. D-1. Ilustración de los rayos cósmicos incidentes y su interacción con la atmósfera; la sonda de neutrones de rayos cósmicos mide los neutrones que se generan en la superficie del suelo en toda una zona. (Fotografía: OIEA).

139. El uso de la técnica de la sonda de neutrones de rayos cósmicos como instrumento estacionario fijo de vigilancia del agua del suelo en ambientes agrícolas está ya bien establecido en Estados Miembros de todo el mundo¹⁷. Aunque este método tiene una gran capacidad de generar información sobre la humedad del suelo en toda una zona¹⁸, la respuesta de la sonda a la heterogeneidad ambiental natural del contenido de agua del suelo es un tema que se está investigando ampliamente^{19, 20}. Los esfuerzos por mejorar el uso de esta sonda para explorar la heterogeneidad espacial del contenido de agua del suelo han dado lugar a la investigación y el desarrollo de sondas móviles más nuevas y versátiles. Una sonda de neutrones de rayos cósmicos móvil, ya sea en forma de mochila o sujeta a un vehículo, se comporta exactamente de la misma manera que una sonda estacionaria con la misma cobertura espacial. La movilidad confiere a esta técnica la capacidad de estudiar la heterogeneidad de la humedad del suelo en el medio ambiente (fig. D-2), e indica a los científicos y los agricultores dónde está seca la tierra y dónde no, que es lo que se necesita saber para un riego de precisión. Sin embargo, hacen falta más estudios sobre este método móvil, para optimizar su uso y su disponibilidad en los Estados Miembros. La División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura está participando ahora activamente en estos avances.

¹⁷ Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., Rosolem, R.: *COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 4079–4099, 2012.

¹⁸ Franz, T. E., Wahbi, A., Vreughenhil, M., Weltin, G., Heng, L., Oismueller, M., Strauss, P., Dercon, G., Desilets, D., *Using cosmic-ray neutron sensors to monitor landscape scale soil water content in mixed land use agricultural systems*, Appl. & Environ. Soil Sci., Article ID 4323742, 11 pages, 2016.

¹⁹ Desilets, D., Zreda, M., Ferre, T. P. A.: *Nature's Neutron Probe: Land Surface Hydrology at an Elusive Scale with Cosmic-Rays*, Water Resour. Res., 46, W11505, 7 pages, 2010.

²⁰ Avery, W. A., Finkenbiner, C., Franz, T. E., Wang, T., Nguy-Robertson, A. L., Suyker, A., Arkebauer, T., Muñoz-Arriola, F.: *Incorporation of globally available datasets into the roving cosmic-ray neutron probe method for estimating field-scale soil water content*, Hydrol. Earth Syst. Sci., 20, 3859 – 3872, 2016.

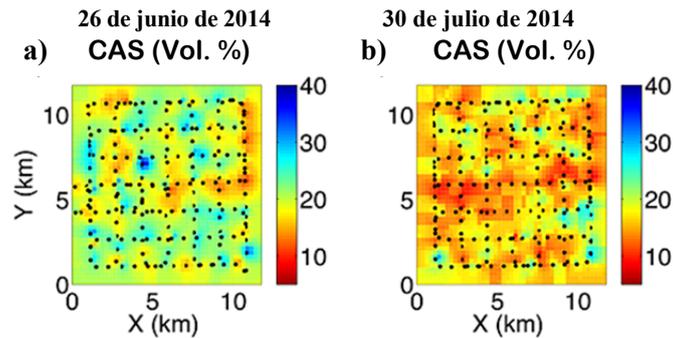


Fig. D-2. Capacidad de una sonda de neutrones de rayos cósmicos móvil de captar y cuantificar la variabilidad espacial del contenido de agua del suelo (CAS) en toda una zona agrícola. Los puntos negros representan los lugares en que se efectuaron las mediciones durante dos periodos de estudio, a un mes de distancia (Fuente: Franz et al., Combined Analysis of Soil Moisture Measurements from Roving and Fixed Cosmic-Ray Neutron Probes for Multiscale Real-Time Monitoring, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 3389–3396, 2015).

D.3. Mapeo de híbridos de irradiación para el desarrollo de herramientas genéticas en apoyo de los programas de mejora del ganado

140. La mejora genética de los animales de granja para aumentar la productividad de leche, carne y fibra se ha basado tradicionalmente en la selección y cría de animales de alto rendimiento. Con los avances recientes de la genómica, es posible ahora estimar el valor de cría de los animales en cuanto nacen, utilizando herramientas genómicas como las micromatrices de ADN. El desarrollo de micromatrices de ADN para la evaluación de los animales requiere la secuenciación y el mapeo de sus genomas. Los mapas genéticos indican la localización exacta de rasgos específicos en los cromosomas de los organismos. Son herramientas esenciales para identificar los genes responsables de enfermedades o de las características productivas y reproductivas.

141. El mapa del genoma puede elaborarse con métodos convencionales o con técnicas radioisotópicas. Los métodos convencionales de mapeo —como el mapeo genético por ligamiento— se basan en los eventos de recombinación natural y exigen el uso de animales con pedigrí en las sucesivas generaciones. En el caso del ganado, esos métodos no solo entrañan enormes costos y tiempos prolongados (debido a los largos intervalos generacionales), sino que también producen mapas de baja resolución. La aplicación de técnicas radioisotópicas ayuda a superar estas limitaciones al simular eventos de recombinación genética y acelerar el proceso de mapeo del genoma con el fin de desarrollar más rápidamente las herramientas necesarias para aumentar la productividad del ganado.

D.3.1. Técnicas radioisotópicas para el mapeo del genoma del ganado

142. La irradiación con cobalto 60 o con rayos X permite dividir aleatoriamente el genoma del ganado en diversos fragmentos. Para ello se utilizan por lo general dosis de radiación de entre 30 Gy y 150 Gy, y los fragmentos de los cromosomas del ganado se recuperan en células de roedores. Los extremos de los cromosomas sanan rápidamente después de la irradiación, y los segmentos se insertan o traslocan en los cromosomas de los roedores cuando las células de las especies ganaderas se funden con las de los roedores. A continuación se analizan entre 90 y 100 de esas células híbridas de roedores y ganado para determinar la presencia o ausencia de marcadores de ADN. Para una dosis dada de radiación, los marcadores más distanciados entre sí en cada cromosoma tienen más probabilidades de quedar separados en fragmentos cromosómicos distintos, y de ir a parar a células híbridas diferentes. La frecuencia de esas separaciones no solo ayuda a estimar la distancia entre los marcadores, sino que también determina su orden en los cromosomas, permitiendo así establecer densos mapas genéticos de

las especies ganaderas. La resolución de esos mapas de híbridos de irradiación depende normalmente de la dosis de radiación utilizada; una dosis más alta aumenta la resolución del mapa. Los mapas de híbridos de irradiación tienen, pues, muchas ventajas, especialmente la de producir mapas de alta resolución de los genomas del ganado a un costo relativamente bajo y en tiempos más breves que los de las técnicas convencionales.

D.3.2. Aplicaciones de los mapas de híbridos de irradiación en la mejora del ganado.

143. Los mapas de híbridos de irradiación de alta resolución han facilitado el desarrollo de micromatrices de ADN que se utilizan ampliamente para mejorar la productividad lechera del ganado vacuno. La tecnología de selección genómica resultante ha revolucionado el sector de la inseminación artificial (IA) al aumentar considerablemente la mejora genética anual en términos de producción de leche. La cuota de mercado de los toros jóvenes engendrados por inseminación artificial utilizando esta tecnología ha superado ya el 50 % en muchos países industrializados, y los países en desarrollo con economías basadas en la producción agropecuaria tienen puesta la mira en aplicar esta nueva tecnología en sus sistemas de producción de ganado lechero. Del mismo modo, se han elaborado mapas genéticos de alta resolución para otras especies ganaderas, como los ovinos, los búfalos y los porcinos. Más recientemente, investigadores de todo el mundo han utilizado los paneles de híbridos de irradiación desarrollados por el Organismo para ensamblar, por primera vez, una secuencia genómica preliminar²¹ y elaborar un mapa de alta resolución del genoma completo²² de las cabras, otra especie ganadera importante en los países en desarrollo. Ello ayudó también a desarrollar una micromatriz de ADN que puede utilizarse para mejorar la especie aumentando su productividad de carne.

D.3.3. Consecuencias para la seguridad alimentaria y los Objetivos de Desarrollo Sostenible

144. Aún se carece de mapas de híbridos de irradiación y de herramientas genómicas para muchas especies ganaderas de importancia agropecuaria, como el camello, el cebú, la alpaca, la llama, el yak, el burro, el gayal y el conejo. Estas especies crecen en los dos principales tipos de entorno extremo, los climas desérticos cálidos y las regiones frías de gran altitud, y contribuyen a la subsistencia de grandes grupos de agricultores marginales. Por ejemplo, el camello cumple una función importante en el sustento de varios millones de pastores nómadas en África y Asia, y la demanda de leche de camello, en particular, está aumentando con rapidez en una serie de países.

145. La elaboración y aplicación de mapas de híbridos por irradiación y de herramientas genómicas ayudarán a establecer programas de cría que aumenten la productividad del ganado y mejoren la seguridad alimentaria. La demanda de paneles de híbridos de irradiación por parte de los Estados Miembros para mapear el genoma de las especies arriba mencionadas ha aumentado mucho en los últimos años. Por conducto de sus laboratorios FAO/OIEA, el Organismo actúa como centro de desarrollo y distribución de esos paneles y de otros recursos necesarios (por ejemplo, los materiales biológicos de referencia pertinentes, los recursos de mapeo y las herramientas informáticas) para sus Estados Miembros.

²¹ Dong, Y., et al. (2013). *Sequencing and automated whole-genome optical mapping of the genome of a domestic goat (Capra hircus)*. Nature Biotechnology 31, 135–141.

²² Du, X., et al. (2014). *An update of the goat genome assembly using dense radiation hybrid maps allows detailed analysis of evolutionary rearrangements in Bovidae*. BMC Genomics 15, 625.



Fig. D-3. (Izquierda) Irradiación de células de camello para construir panel de híbridos de irradiación. (Derecha) A. Extracción de células híbridas vivas de una placa de cultivo. B. Colonia de células híbridas de irradiación para el mapeo genético. (Fotografías: OIEA).

E. Salud humana

E.1. Avances en el manejo del cáncer de próstata. Diagnóstico y terapia

E.1.1. Antecedentes

146. El cáncer de próstata es, a nivel mundial, uno de los tres cánceres más comunes en el hombre y, junto con el cáncer de pulmón, hígado, estómago e intestino, figura entre las causas más frecuentes de muerte por cáncer en el hombre. Después de una prostatectomía o una radioterapia externa, el 54 % de los pacientes experimenta una recidiva bioquímica, definida como un aumento del valor del antígeno prostático específico (PSA) en el suero. La recidiva local en el lecho prostático después de una prostatectomía radical puede predecirse con una exactitud del 80 % aproximadamente. El tipo de terapia que se utiliza no depende solo de los niveles del PSA sino también de otras pruebas de diagnóstico por imágenes, como la ecografía ósea para excluir metástasis, o la tomografía computarizada (TC) o la resonancia magnética para detectar la recidiva local.

147. A pesar de su buena sensibilidad para distinguir entre las recidivas locales y a distancia, las herramientas predictivas disponibles, como los nomogramas, no proporcionan información ni sobre el lugar real de la recidiva (por ejemplo, si es en un nódulo linfático o en el hueso, o dentro o fuera de la pelvis) ni sobre el número efectivo de metástasis. Además, muchos pacientes con cáncer de próstata presentan un aumento del PSA que puede ser compatible con recidivas tanto locales como sistémicas. Por este motivo, no es posible planificar terapias de rescate específicas considerando solo la probabilidad de riesgo indicada por los nomogramas. Así pues, los pacientes suelen ser sometidos a una radioterapia de rescate en el lecho prostático (si hay sospecha de recidiva local) o a un tratamiento sistémico con terapia hormonal, como la privación de andrógenos, si se sospecha una recidiva sistémica.

E.1.2. Diagnóstico

148. La imagenología convencional, como la tomografía computarizada, la centellografía ósea y la resonancia magnética, tiene bajos valores de exactitud en la restadificación de los pacientes con recidiva bioquímica. La tomografía por emisión de positrones (PET)/TC con colina ha demostrado tener una sensibilidad subóptima cuando se practica en pacientes con recidiva bioquímica precoz, es decir, en pacientes con valores bajos del PSA en el suero después de una terapia radical. Durante el decenio pasado, las técnicas de la medicina nuclear, como la PET con ^{11}C -colina y ^{18}F -colina, resultaron ser más exactas que el diagnóstico por imágenes convencional en la restadificación de los

pacientes con recidiva bioquímica, permitiendo diferenciar una recidiva local confinada dentro de la pelvis de una recidiva sistémica.

149. El momento óptimo para los tratamientos de rescate, a fin de obtener los mejores resultados desde el punto de vista del pronóstico, es cuando la extensión de la enfermedad es pequeña, y no cuando los niveles del PSA en el suero llegan a valores detectables después de una terapia radical. En este contexto, puede ser crucial disponer de una prueba diagnóstica capaz de distinguir entre una recaída inicial o recidiva locorregional, potencialmente curable, y una recidiva sistémica, que solo se puede tratar con enfoques paliativos.

E.1.3. Avances y tendencias recientes

150. Recientemente se desarrolló una nueva molécula que tiene por blanco el antígeno prostático específico de membrana (PSMA). El PSMA es una enzima de la membrana que se expresa principalmente en las células del cáncer de la próstata, más que en el tejido prostático sano. En estudios preliminares sobre el diagnóstico de una recidiva precoz de la enfermedad, el recientemente desarrollado ^{68}Ga -PSMA, un inhibidor extracelular del PSMA que se emplea como radiofármaco en la imagenología por PET/TC, ha demostrado tener una exactitud significativamente mayor que la de la técnica de PET-TC con ^{18}F -colina. Estos estudios han documentado también una mejor relación tumor/fondo en la PET-TC con ^{68}Ga -PSMA que en la PET-TC con ^{18}F -colina, para la detección de lesiones sospechosas relacionadas con una recaída.

151. Otros estudios realizados en poblaciones más grandes de pacientes con recidiva bioquímica tras una terapia radical han mostrado la excelente capacidad diagnóstica de la PET-TC con ^{68}Ga -PSMA en la restadificación de los pacientes con recidiva bioquímica de la enfermedad incluso cuando los valores del PSA en el suero son muy bajos. En los últimos meses, el uso de este trazador ha sido objeto de un interés particular y cada vez mayor en la comunidad científica. Este radiofármaco ha demostrado también una alta especificidad (superior al 90 %) en estudios que han utilizado el análisis histológico como patrón de referencia para validar los resultados de la PET (fig. E-1). Por último, en ninguno de los estudios documentados se han notificado sucesos adversos o efectos farmacológicos clínicamente detectables para esta técnica.

152. Por los motivos explicados, el PSMA podría ser un excelente blanco molecular en el desarrollo de radiotrazadores para la imagenología por PET-TC, ya que puede detectar precozmente una recidiva de la enfermedad.

153. El éxito de la aplicación clínica del ^{68}Ga -PSMA en el diagnóstico ha conducido al desarrollo de un tratamiento con la misma molécula, pero marcada con un isótopo de alta energía, como el lutecio 177 o el itrio 90. Los ensayos clínicos han dado muy buenos resultados hasta la fecha, pero se requieren más pruebas para validar este nuevo tratamiento. El uso de una misma molécula para el diagnóstico y el tratamiento se denomina 'tratanóstico', y esto es lo que está ocurriendo con el PSMA en el manejo del cáncer de próstata.

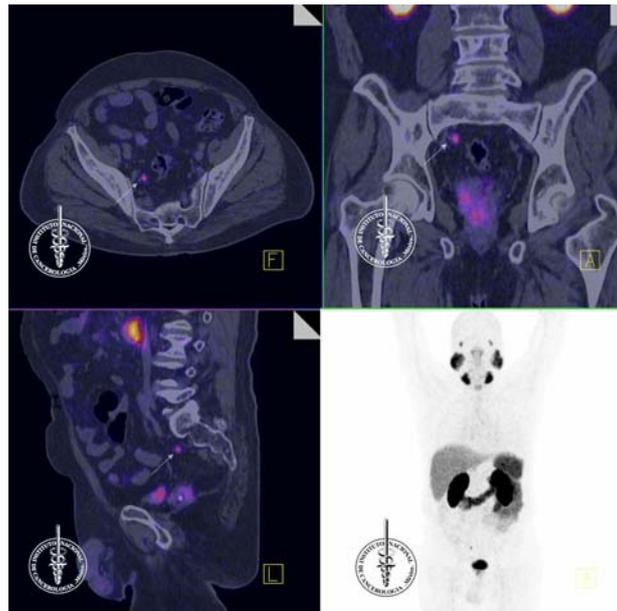


Fig. E-1. Paciente varón con antecedentes de cáncer de próstata, tratado con cirugía y quimioterapia. El estudio de medicina nuclear consistente en una PET-TC con ^{68}Ga -PSMA se realizó para evaluar el seguimiento postoperatorio. La flecha muestra la captación anormal del trazador en un nódulo linfático, lo que indica la recidiva de la enfermedad. (Fotografías: Instituto Nacional del Cáncer de México).

F. Recursos Hídricos

F.1. Novedades en el uso de los isótopos en la precipitación para el estudio de la meteorología y el clima

154. La precipitación es la fuente primordial de toda el agua de los ríos, lagos y acuíferos. Los procesos por los que se forma la precipitación son fundamentalmente de dos tipos: convectivos y estratiformes. La precipitación convectiva, como la de las tormentas, tiene una intensidad alta (mucha lluvia en poco tiempo) pero afecta a una extensión limitada (del orden de 10 km^2 a 25 km^2), mientras que la precipitación estratiforme tiene baja intensidad pero dura mucho más tiempo y cae sobre una superficie mayor (de más de 500 km^2). Se prevé que la precipitación convectiva, que causa más inundaciones y desastres de otro tipo, aumentará con el calentamiento del clima.

155. Debido a las diferencias en las masas atómicas, las relaciones isotópicas del oxígeno y el hidrógeno tienen un comportamiento diferente en las nubes convectivas y en las estratiformes, que deberían, por lo tanto, presentar razones isotópicas distintas. Utilizando la variabilidad isotópica para determinar cuánta lluvia es de tipo convectivo y cuánta de tipo estratiforme, es posible comprender los procesos que ocurren en las nubes y cómo cambian en las diferentes estaciones, lo que mejora la capacidad de elaborar modelos tanto para las simulaciones de las condiciones meteorológicas a corto plazo como para estudiar los efectos del cambio climático a más largo plazo.

156. La posibilidad de emplear la variabilidad isotópica para entender cómo afecta el clima al ciclo hidrológico de la Tierra se reconoció a comienzos de los años cincuenta y fue una de las principales consideraciones para el establecimiento por el Organismo de la Red Mundial sobre Isótopos en la Precipitación (RMIP), en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en 1960. Gracias a los datos isotópicos de la RMIP, se entendió que el hielo polar y continental (de la Antártida,

el Ártico, Groenlandia y las montañas de los Andes y el Himalaya) contiene registros históricos de las variaciones del ciclo hidrológico en respuesta al enfriamiento y calentamiento del clima.

157. Se sabe que los datos isotópicos de la RMIP y otras observaciones de la precipitación son diferentes según el tipo de nube del que esta procede; por ejemplo, no son los mismos en un chubasco breve que en una lluvia lenta y prolongada. Sin embargo, se pensaba que estas diferencias isotópicas no eran suficientes para ayudar a comprender mejor los procesos de las nubes. Trabajos recientes del Organismo²³ han demostrado, en cambio, que existe una correlación sustancial entre las razones isotópicas y los procesos de las nubes que causan la precipitación, y es probable que este nuevo conocimiento aumente de manera considerable la utilidad de los datos de la RMIP para comprender tanto los procesos a corto plazo relacionados con el tiempo atmosférico como los procesos a largo plazo que determinan el clima.

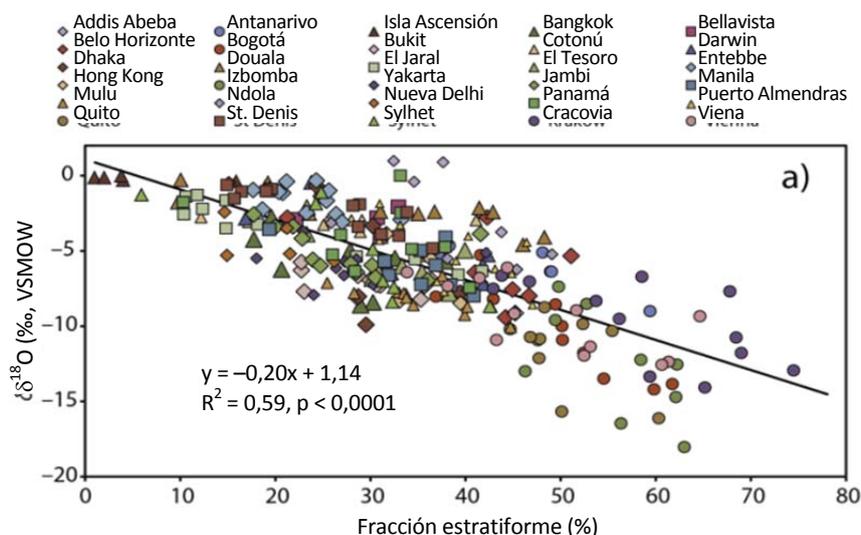


Fig. F-1. Relación entre el contenido medio a largo plazo de oxígeno 18 en muestras mensuales compuestas del agua de lluvia y la fracción correspondiente a la precipitación de tipo estratiforme en un grupo seleccionado de estaciones tropicales y de latitudes medias de la RMIP. La fracción de lluvia restante es de tipo convectivo (Fuente: Aggarwal, P. et al., Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geoscience*, Vol. 9).

158. Los datos del radar a bordo del satélite de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical (TRMM), lanzada conjuntamente por los organismos espaciales del Japón y los Estados Unidos de América en 1998, han sido utilizados para estimar las proporciones de los tipos de lluvia entre 1998 y 2014. Cuando estas proporciones de los tipos de lluvia se combinan con los datos isotópicos de la RMIP para el mismo período de tiempo, se observa una correlación robusta entre los dos parámetros (fig. F-1). La lluvia convectiva tiene relaciones isotópicas más altas, y la de tipo estratiforme las tiene más bajas. La mayor parte de la lluvia recogida a escala diaria o mensual es una mezcla de los dos tipos.

159. Hasta ahora, se pensaba que el contenido de tritio de la precipitación indicaba la mezcla de humedad continental y oceánica. Sin embargo, los estudios recientes antes mencionados revelan que el contenido de tritio varía también según las proporciones de los tipos de lluvia. Se ha determinado que la lluvia convectiva tiene un contenido mayor de tritio cuando las nubes son de gran espesor (extendiéndose verticalmente hasta más 6 km sobre la superficie terrestre), y algunas de las partículas de hielo crecen con la humedad en altitudes superiores a los 5 km, donde el contenido de tritio es

²³ Aggarwal, Pradeep K, Ulrike Romatschke, Luis Araguas-Araguas, Dagnachew Belachew, Frederick J. Longstaffe, Peter Berg, Courtney Schumacher & Aaron Funk, *Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios*, *Nature Geoscience*, Vol. 9, pp 624-629.

naturalmente alto. Esto se debe a que el tritio se produce en la estratosfera y llega a la troposfera (donde se forman las nubes y la precipitación) a través del intercambio de humedad.

160. Las mediciones sistemáticas de los isótopos estables y el tritio en la precipitación diaria o subdiaria ayudarán a entender mejor la variabilidad a corto plazo de la dinámica de las nubes que causa los cambios en las fracciones correspondientes a los dos tipos de lluvia. Los datos isotópicos pueden utilizarse como una herramienta de diagnóstico independiente para vigilar la variabilidad del tipo de precipitación y los efectos del cambio climático en ella.

161. Los avances tecnológicos que emplean la división de la precipitación sobre la base de las variaciones isotópicas ayudarán a mejorar los modelos climáticos (o los modelos de la circulación general) y la simulación de la precipitación convectiva. La información exacta y mejorada en esta esfera puede aumentar la capacidad de los Estados Miembros de predecir y mitigar los efectos del cambio climático.

G. Medio ambiente

G.1. Utilización de herramientas isotópicas para el estudio de la acidificación de los océanos

162. Los océanos del mundo cubren más del 70 % de la superficie de la Tierra y cumplen una función decisiva en la determinación del clima. Sometidos a una ordenación sostenible, desempeñan también un papel importante en la creación de empleos y en la alimentación de la población mundial. Los océanos producen más de la mitad del oxígeno que respiramos, y al mismo tiempo absorben gran parte de calor excedente y de los gases de efecto invernadero importantes, como el dióxido de carbono (CO_2), que producimos. Sin embargo, sabemos que en todos los océanos del mundo están ocurriendo cambios fundamentales en la química del agua de mar.

G.1.1. Acidificación de los océanos - el otro problema del CO_2

163. Desde el comienzo de la revolución industrial, la emisión de CO_2 ha aumentado constantemente, y hoy día la concentración atmosférica de este gas supera las 400 ppm (el 0,04 %). Actualmente, los océanos son capaces de absorber alrededor de una cuarta parte del CO_2 que se emite a la atmósfera por año. A la vez que aumentan constantemente los niveles de CO_2 en la atmósfera, también lo hacen los niveles de este gas en el océano (fig. G-1). Mientras que en un comienzo los científicos se centraron en los efectos beneficiosos de la extracción del CO_2 atmosférico por los océanos, ahora, tras años de observaciones oceánicas, está claro que ese fenómeno tiene también un grave lado negativo: el CO_2 absorbido por los océanos está cambiando la química del agua de mar a través del proceso de acidificación de los océanos.

164. En este proceso se liberan iones de hidrógeno (H^+), que reducen el pH del agua de mar; al mismo tiempo se reducen las concentraciones de iones carbonato (CO_3^{2-}), ya que algunos iones H^+ se combinan con el carbonato para formar bicarbonato (HCO_3^-). Las paleorreconstrucciones indican que el pH del agua de mar se había mantenido relativamente constante por millones de años; sin embargo, en el último siglo y medio, desde el comienzo de la revolución industrial, se ha observado una disminución sistemática del pH en todo el planeta. Aunque el descenso del pH registrado hasta ahora puede parecer relativamente pequeño (0,1 unidades, lo que equivale a un aumento de la acidez de

aproximadamente un 26 %), las mejores proyecciones científicas disponibles actualmente²⁴ indican que, si se mantienen las emisiones, el pH del agua de mar superficial se reducirá probablemente otras 0,4 unidades en este siglo (un aumento de la acidez de alrededor del 150 %).

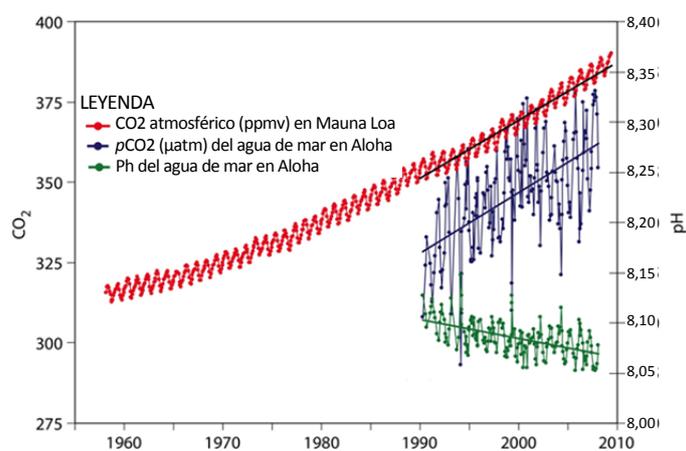


Fig. G-1 Aumento de la $p\text{CO}_2$ atmosférica y disminución del pH de las aguas oceánicas superficiales, medidos en el Observatorio de Mauna Loa, Hawai, y en la estación ALOHA del programa de Series Temporales Oceánicas de Hawai (Fuente: Feely R. A., Doney S. C. y Cooley S. R., 2009. Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high- CO_2 world. *Oceanography* 22(4), 36–47).

G.1.2. Efectos biológicos de la acidificación de los océanos

165. Puesto que la acidificación de los océanos tiene efectos en la química marina global, también afecta a los procesos biológicos esenciales, a veces de manera fundamental. Una amplia variedad de organismos marinos (por ejemplo, muchos moluscos, crustáceos, corales, algas coralinas y foraminíferos) utilizan los iones carbonato para construir sus esqueletos de carbonato de calcio. En particular, los iones carbonato son imprescindibles para la formación de las placas calcificadas de los cocolitóforos, un plancton microscópico que forma parte de la base de la cadena alimentaria marina. Además, los niveles de CO_2 disuelto pueden influir en la fisiología de los organismos marinos, que en muchos casos depende de un pequeño número de parámetros ambientales, como el CO_2 disuelto y el pH.

166. La acidificación sostenida de los océanos puede afectar a los organismos marinos de muchas formas distintas. En los peces, el aumento del CO_2 oceánico puede tener una gran variedad de efectos, alterando, por ejemplo, el comportamiento, la formación de los otolitos (huesos del oído), el crecimiento de los juveniles y el comportamiento de presas y depredadores. En los moluscos con conchas de carbonato de calcio, como las ostras, las almejas y las vieiras, la acidificación de los océanos puede tener efectos perjudiciales en el crecimiento, la fisiología y la supervivencia. En el plancton, del que se nutren otros organismos marinos y que, en algunos casos, forma calcificaciones, la acidificación de los océanos puede tener efectos en el crecimiento, la fisiología y la supervivencia, con posibles repercusiones en toda la red alimentaria; por ejemplo, los pterópodos marinos tienen de por sí un caparazón muy fino, que se disuelve rápidamente en agua de mar con un pH de 7,8, el valor previsto para 2100 según las proyecciones actuales. En los corales, que tienen esqueletos de carbonato de calcio, las condiciones de creciente acidez de los océanos dificultarán la construcción y el mantenimiento de esas estructuras, y también podría verse comprometida su relación simbiótica con los dinoflagelados, con la consiguiente decoloración del coral. Amplias observaciones indican que el aumento del CO_2 tiene un fuerte efecto de decoloración de los corales (fig. G-2).

²⁴ Hoegh-Guldberg, O., et al. (2007). *Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification*, Science 14 Dec 2007:Vol. 318, Issue 5857, pp. 1737-1742 DOI:10.1126/science.1152509.



Fig. G-2 Extensa decoloración de los corales. Islas Marshall. (Fotografía: OIEA).

G.1.3. Aplicación de técnicas nucleares para entender los efectos de la acidificación de los océanos

167. Varios radioisótopos tienen una utilidad sin parangón para cuantificar los efectos biológicos de la acidificación de los océanos; por ejemplo el calcio 45 sirve para estudiar las tasas de calcificación, el carbono 14 para evaluar la producción primaria del fitoplancton marino, el estroncio 85 para determinar las tasas de biomineralización, el cinc 65 para estudiar las tasas metabólicas de los organismos marinos, y una serie de elementos traza radiomarcados (como la plata 110m, el cadmio 109, el cobalto 57, el cobalto 60, manganeso 54 y el selenio 75) para estudiar las tasas de bioacumulación y depuración que dependen del pH. La composición isotópica del boro 10 y el boro 11 en los corales longevos permite reconstruir el pH del agua de mar para comprender las condiciones ambientales del pasado y poner en su contexto los cambios del pH oceánico previstos para el futuro.

168. En los últimos años se han hecho enormes adelantos en el estudio científico de la acidificación de los océanos²⁵. Hoy en día los experimentos se refuerzan utilizando radioisótopos como trazadores múltiples para investigar los efectos que tendrán las disminuciones proyectadas del pH oceánico en los organismos marinos. En los Laboratorios para el Medio Ambiente del Organismo, los experimentos controlados sobre los efectos de la acidificación de los océanos en determinados corales, moluscos y peces muestran cambios metabólicos y fisiológicos pronunciados después de una exposición prolongada a un pH ambiental reducido. Los avances en la aplicación de los radioisótopos, incluidos los estudios con pares de isótopos (por ejemplo, con ^{134,137}Cs), están permitiendo esclarecer la gran variedad de efectos que tendrá la acidificación de los océanos, junto con los factores de estrés acumulativos, como la temperatura y/o el oxígeno disuelto, en los futuros ambientes oceánicos.

H. Tecnologías de la radiación

H.1. Patrimonio cultural: Exploración y preservación con ayuda de tecnologías de la radiación

169. Los objetos del patrimonio cultural son, con frecuencia, artefactos preciados e inestimables que requieren una manipulación cuidadosa y técnicas de preservación sofisticadas. Las técnicas radiológicas permiten efectuar exámenes detallados de los objetos, reforzarlos y mejorar el control de su deterioro o degradación. Cuando es necesario, los artefactos pueden también desinfestarse, para mejorar así su preservación. Las técnicas radiológicas están avanzando y están siendo aceptadas cada vez más por las instituciones encargadas de gestionar los bienes culturales.

²⁵ El Centro Internacional de Coordinación sobre la Acidificación de los Océanos actúa como centro de información en esta esfera, <https://www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2181>.

H.1.1. Exploración y examen

170. Las técnicas radiológicas pueden ayudar a investigar la autenticidad de un cuadro o a averiguar si existe otro estrato bajo la superficie, determinar si un objeto es de oro o está solo revestido en oro, o evaluar la fragilidad de una estatua antigua antes de su transporte, todo ello sin causar ningún daño al objeto. La fluorescencia de rayos X (XRF) puede ayudar a realizar análisis de los elementos de un material y se utiliza con frecuencia en los museos para estudiar una gran variedad de artefactos (fig. H-1).

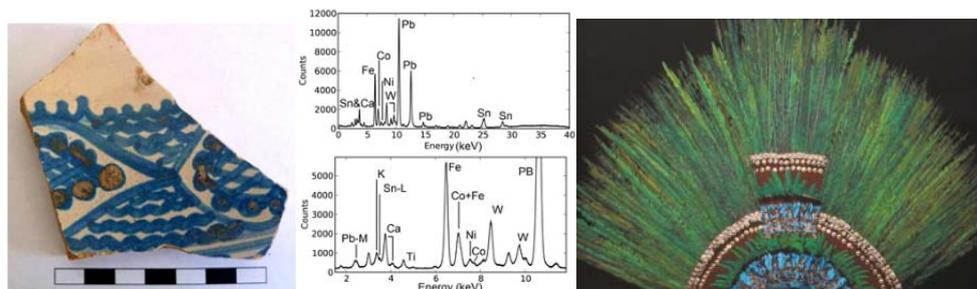


Fig. H-1. Análisis elemental de una pieza de cerámica del siglo VII (izquierda), y raro ornamento de cabeza mexicano del siglo XVI que se analizó con un aparato de XRF de mano para descubrir la ornamentación original en oro y los elementos añadidos posteriormente. (Fotografía: OIEA).

171. Así como las radiografías médicas muestran las partes internas del cuerpo humano, las técnicas radiográficas pueden revelar la estructura interna de las estatuas y sus posibles puntos débiles. Diversas técnicas radiográficas (como la radiografía por rayos X convencional, la radiografía gamma, la radiografía basada en un acelerador, la radioscopía, la radiografía beta o radiografía por electrones secundarios, la radiografía por emisión de electrones, la radiografía neutrónica, la autorradiografía y la tomografía computarizada) ayudan a examinar y explorar las obras de arte (figs. H-2, H-3 y H-4).



Fig. H-2. Los museos utilizan sistemáticamente variaciones de las técnicas de rayos X, por ejemplo la emisión de rayos X inducida por partículas y las técnicas basadas en aceleradores, para estudiar objetos de arte, como en este ejemplo del Museo Civico d'Arte Antica, Turín (Italia). (Fotografía: INFN, Italia).



Fig. H-3. La radiografía indica que la cabeza y el tronco de esta estatua de Júpiter, de Vieil-Évreux (France), están soldados. (Fotografía: J. L. Boutaine).

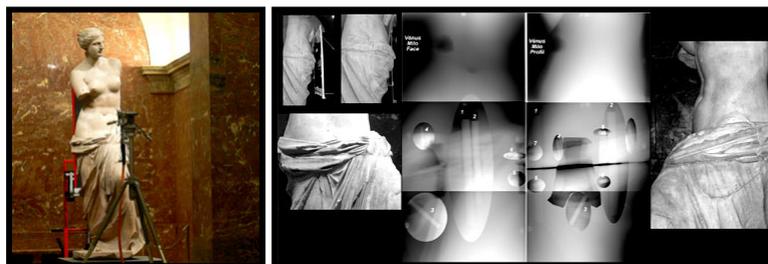


Fig. H-4. Radiografía gamma que muestra la estructura interna de la estatua de la Venus de Milo del Museo del Louvre, en Francia, utilizada para adoptar decisiones antes del transporte. (Fotografías: OIEA)

H.1.2. Uso de técnicas basadas en la radiación para la preservación y consolidación de artefactos.

172. La infección de los artefactos del patrimonio cultural puede acelerar su deterioro y plantear riesgos para la salud de las personas que manipulan esos objetos. Las técnicas convencionales de desinfección que se utilizan en la medicina y la agricultura para tratar grandes cantidades de objetos, por ejemplo, la fumigación, emplean productos químicos tóxicos tales como el formaldehído, el etanol o el óxido de etileno o requieren condiciones muy especiales, como altas temperaturas y presiones, que muchos artefactos culturales no podrían tolerar. Experimentos realizados en los años cincuenta (la irradiación con rayos gamma de insectos xilófagos) indicaron por primera vez el efecto biocida de la radiación ionizante. Con la maduración de la tecnología del tratamiento con radiaciones en la industria, ha aumentado también su uso en la desinfección de artefactos del patrimonio cultural. El tratamiento por irradiación, que es una técnica bien establecida para la esterilización de productos médicos, alimentos e injertos de tejidos, ofrece una opción sin aditivos y a temperatura ambiente para el tratamiento de los objetos del patrimonio cultural. Como la radiación no solo evita el uso de productos químicos tóxicos sino que también permite una penetración uniforme y completa independientemente del tamaño y la forma del objeto y no deja en este ninguna sustancia dañina residual, es una opción atractiva para la preservación del patrimonio cultural, segura para el personal y para el medio ambiente. En las instalaciones en que está aprobada, la descontaminación por irradiación es realizada por personas autorizadas, en condiciones de seguridad.

Desinfección de la momia de Ramsés II

173. La momia de Ramsés II, expuesta en el Museo Egipcio de El Cairo, fue trasladada a Francia en 1976 con motivo de una exposición; allí se descubrió que estaba infestada por larvas, insectos y una gran variedad de hongos, aunque no había bacterias patógenas de ningún tipo. De acuerdo con las autoridades egipcias, el Museo Nacional de Historia Natural de Francia desinfestó la momia en 1977 mediante la irradiación con rayos gamma en el Taller Regional de Conservación Nucléart. Un consorcio de laboratorios y museos de París y Grenoble gestionaron el tratamiento por irradiación tras una cuidadosa labor de planificación y ensayo. A fin de determinar la dosis de irradiación adecuada para erradicar eficazmente todos los hongos (más de sesenta especies) sin afectar a los otros componentes, como el pelo, las telas, la piel y los dientes, de la momia, se tomaron más de 400 muestras de otras momias para realizar ensayos. Debido al gran tamaño (1,72 m de longitud) y la forma desigual de la momia, así como a la presencia de múltiples materiales en su interior, fue necesario realizar complejos cálculos dosimétricos, con modelos matemáticos precisos, para impartir una dosis uniforme de 18 kGy. Tras una validación con dos momias modelo, la momia de Ramsés II fue irradiada y debidamente desinfestada, después de lo cual fue enviada de vuelta a Egipto, donde 40 años más tarde sigue estando en buenas condiciones.

Proyecto RADIART, en Portugal

174. En el Museo Nacional del Azulejo de Lisboa se trataron azulejos portugueses del siglo XVIII con una dosis de radiación de ~ 4 kGy para inactivar tanto las bacterias de la superficie como los hongos del interior, responsables de una coloración verde. El proceso de irradiación tuvo una eficiencia de eliminación microbiana superior al 70 %.

Centro de Investigación de Casaccia, en Italia

175. Los estudios realizados en el Centro de Investigación de Casaccia de la Agencia Nacional Italiana de Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sostenible sobre los efectos de la radiación gamma en los materiales demostraron que la radiación ionizante es sumamente eficiente para erradicar la infestación por insectos dañinos (a dosis de entre 0,2 y 0,5 kGy) y microhongos (a dosis de entre 3 y 8 kGy). Los estudios indicaron que, incluso con una dosis de radiación de 10 kGy, el color de las fotografías impresas en celulosa pura o en papel se mantenía inalterado, independientemente de que el proceso entrañara el uso de albúmina, gelatina de plata, colodión o anilina, quedando así demostrada la utilidad de esta tecnología para tratar fotografías antiguas infestadas por microbios.

Cápsula histórica, en el Brasil

176. En una piedra angular de la ciudad de Rio de Janeiro se encontró una caja de madera y plomo que contenía algunos de los documentos más antiguos jamás hallados de la época del Imperio del Brasil (siglo XIX). La caja fue tratada con una dosis de radiación de 8 a 10 kGy en la Irradiador Gamma Multipropósito de IPEN-CNEN, el Instituto de Investigaciones Energéticas y Nucleares del Brasil, antes de proceder a su restauración (fig. H-5).



Fig. H-5. Tratamiento antimicótico de la cápsula histórica (Fotografía: P. Vasquez, Instituto de Investigaciones Energéticas y Nucleares IPEN/CNEN, São Paulo, Brasil)

Khroma: preservación de una cría de mamut congelada

177. En 2008 se recuperó en Siberia (Federación de Rusia) un espécimen congelado de cría de mamut. Denominada Khroma, por el río en cuya ribera se encontró, esta cría de mamut, de una edad estimada de 50 000 años, es tal vez el espécimen más antiguo que se conoce. Aunque estaba bien conservada, era necesario inactivar toda traza de bacterias u organismos potencialmente patógenos que pudiera contener. Se determinó que la irradiación con rayos gamma era la técnica más apropiada para un tratamiento biocida no destructivo del espécimen completo. En julio de 2010, la cría de mamut congelada fue sometida a una dosis de 20 kGy en Grenoble (Francia), y actualmente está bien preservada y expuesta al público (fig. H-6).



Fig. H-6. La cría de mamut 'Khroma', preservada después de su irradiación en julio de 2010. (Fotografía: Dr. Quoc Khoi TRAN, ARC-Nucléart, CEA-Grenoble).



60 años

IAEA

Átomos para la paz y el desarrollo

www.iaea.org

Organismo Internacional de Energía Atómica
Centro Internacional de Viena, P.O. Box 100
1400 Viena (Austria)

Teléfono: (+43-1) 2600-0

Fax: (+43-1) 2600-7

Correo electrónico: Official.Mail@iaea.org