

EXAMEN DE LA TECNOLOGÍA NUCLEAR DE

2019



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Examen de la Tecnología Nuclear de 2019

GC(63)/INF/2

Impreso por el OIEA en Austria
Agosto de 2019

IAEA/NTR/2019

PREFACIO

En respuesta a lo solicitado por los Estados Miembros, la Secretaría elabora cada año un amplio *Examen de la Tecnología Nuclear*.

En el *Examen de la Tecnología Nuclear de 2019* se destacan acontecimientos notables que se produjeron en el mundo en 2018 en los siguientes temas: las aplicaciones eléctricas, los datos atómicos y nucleares, las aplicaciones de aceleradores y reactores de investigación, las técnicas nucleares en la gestión de los alimentos, el suelo y el ganado, el diagnóstico y el tratamiento del cáncer, las novedades habidas en el estudio de los isótopos en la precipitación, los efectos de la acidificación de los océanos y la preservación del patrimonio cultural.

La versión preliminar se presentó a la Junta de Gobernadores en su reunión de marzo de 2019 en el documento GOV/2019/4. La presente versión definitiva se elaboró teniendo en cuenta las deliberaciones habidas durante la Junta de Gobernadores, así como las observaciones recibidas de los Estados Miembros.

Índice

Resumen ejecutivo	1
Examen de la Tecnología Nuclear de 2019	1
Informe principal.....	1
A. Aplicaciones eléctricas	1
A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad.....	1
A.1.1. Países con centrales nucleares en funcionamiento	3
A.1.2. Países en fase de ampliación	4
A.1.3. Países en fase de incorporación.....	6
A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica.....	7
A.3. Ciclo del combustible	8
A.3.1. Parte inicial.....	8
A.3.2. Garantía del suministro.....	11
A.3.3. Parte final	11
A.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos	13
A.4.1. Clausura de instalaciones nucleares	13
A.4.2. Rehabilitación.....	14
A.4.3. Gestión de desechos radiactivos.....	15
B. Datos atómicos y nucleares	18
C. Aplicaciones de los aceleradores y de los reactores de investigación.....	20
C.1. Aceleradores e instrumentación conexas	20
C.1.1. Tecnologías novedosas con ingeniería de haces iónicos	20
C.1.2. Simulación de daños en los materiales de los reactores con aceleradores.....	20
C.1.3. Monitorización de la contaminación del aire a gran escala con técnicas analíticas nucleares	21
C.1.4. Mediciones sobre el terreno para la caracterización de la contaminación superficial.....	22
C.2. Reactores de investigación	23
C.2.1. Nuevas tecnologías de los moderadores para la producción de neutrones fríos.....	26
D. Tecnologías de la radiación.....	26
D.1. Tomografía por rayos cósmicos: una sonda procedente de las estrellas.....	26
D.1.1. Aplicaciones	27
E. Salud humana	29
E.1. Servicios de calibración para la mamografía por rayos X moderna	29
E.1.1. Antecedentes.....	29
E.1.2. Calidades del haz de radiación.....	30
E.1.3. Dosímetros	30
E.1.4. Calibraciones.....	31
E.1.5. Otras novedades	31

E.2. Cirugía radioguiada en el cáncer ginecológico	32
E.2.1. Antecedentes	32
E.2.2. Cáncer cervicouterino	32
E.2.3. Cáncer del endometrio	32
E.2.4. Cáncer ovárico	33
E.2.5. Tendencias futuras	33
F. Alimentación y agricultura.....	34
F.1. Nuevos adelantos apuntan a un cambio de paradigma en la irradiación fitosanitaria y de los alimentos	34
F.2. Tecnologías nucleares para la rápida adaptación de los cultivos y los sistemas de cultivo al cambio climático	37
F.2.1. Fitomejoramiento por mutaciones asistido por marcador para el desarrollo más rápido de variedades adaptadas al clima	37
F.2.2. Tomografía computarizada de rayos X para el fenotipado ultrarrápido no invasivo de especies vegetales.....	38
F.3. Aplicación innovadora de tecnologías nucleares e isotópicas en la nutrición animal.....	39
F.3.1. Técnicas nucleares para investigar y mejorar la nutrición de los animales de pastoreo	40
F.3.2. Los n-alcanos ayudan a estimar el consumo de alimentos, la digestibilidad y la selección de la dieta	40
F.3.3. El análisis por NIRS de los residuos de nutrientes en las heces ayuda a estimar el contenido de nutrientes, el consumo de alimentos voluntario y la selección de la dieta	41
F.3.4. La fluorescencia de rayos X por energía dispersiva determina con exactitud el contenido de minerales de los forrajes.....	41

Resumen ejecutivo

1. Al final de 2018, los 450 reactores nucleares de potencia en funcionamiento tenían una capacidad total de generación de 396,4 GW(e), un nivel sin precedentes, superior en 5 GW(e) al de 2017. En 2018 se conectaron a la red 9 reactores, 7 fueron puestos en régimen de parada definitiva, y se inició la construcción de 5. Las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguieron centradas en Asia, donde se encuentran 35 de los 55 reactores en construcción, así como 58 de los 68 reactores que se han conectado a la red desde 2005.

2. De los 30 Estados Miembros que tienen actualmente centrales nucleares en funcionamiento, 14 están trabajando en la construcción de nuevos reactores o completando proyectos de construcción previamente suspendidos. Otros 28 países están estudiando la posibilidad de incluir la energía nucleoelectrica en su canasta energética, planificando esta medida o trabajando ya activamente en ella. Cuatro países en fase de incorporación están construyendo sus primeras centrales nucleares y varios otros se encuentran en etapas avanzadas de la preparación de la infraestructura.

3. Las proyecciones altas de la capacidad nucleoelectrica mundial elaboradas por el Organismo en 2018 indican un aumento del 30 % con respecto a los niveles actuales para 2030 y una casi duplicación de la capacidad para 2050, mientras que las proyecciones bajas arrojan una disminución de la capacidad durante un decenio aproximadamente, seguida de una recuperación hasta los niveles de 2030 para 2050. Las trayectorias de las emisiones presentadas en un informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático indican la necesidad de ampliar sustancialmente la contribución de la energía nucleoelectrica a la mitigación del cambio climático.

4. Según la 26ª edición del ‘Libro Rojo’ bienal, un autorizado informe de referencia mundial, la oferta mundial de uranio es más que suficiente para atender las necesidades proyectadas en el futuro previsible, independientemente del papel que se decida asignar a la energía nuclear en la satisfacción de la demanda futura de electricidad y en el cumplimiento de los objetivos mundiales relacionados con el clima. Sin embargo, los bajos precios del uranio siguieron restringiendo la capacidad de las empresas de invertir en la exploración, la realización de estudios de viabilidad y la construcción de nuevos proyectos. Las capacidades mundiales de conversión, enriquecimiento y fabricación de combustibles son más que suficientes para satisfacer la demanda en las proyecciones tanto bajas como altas de la capacidad nucleoelectrica instalada.

5. En lo que respecta al Banco de Uranio Poco Enriquecido (UPE) del OIEA, en febrero de 2018 entró en vigor el acuerdo de tránsito con China, y en septiembre y noviembre de 2018 se firmaron los contratos de transporte con las organizaciones autorizadas de la Federación de Rusia y Kazajstán, respectivamente. El Organismo firmó contratos con la compañía nacional nuclear “Kazatomprom S.A.” y con Orano Cycle para la compra de UPE.

6. Hasta la fecha, se han descargado como combustible nuclear gastado de los reactores nucleares alrededor de 400 000 toneladas de metal pesado, de las cuales aproximadamente el 25 % se reprocesa. El resto se almacena ya sea en las piscinas de los reactores o en las 151 instalaciones de almacenamiento de combustible gastado situadas fuera de los emplazamientos en 27 países.

7. Para los próximos años se espera un trabajo considerable en la clausura de reactores de potencia, reactores de investigación, otras instalaciones del ciclo del combustible, conjuntos críticos, aceleradores e instalaciones de irradiación, con las actividades de rehabilitación correspondientes. Tecnologías ya probadas y nuevas están aportando mejoras continuas en estos ámbitos.

8. Varios países hicieron progresos en sus proyectos relacionados con la disposición final geológica profunda de desechos radiactivos de actividad alta y/o de combustible gastado declarado como desecho. Ghana y Malasia alcanzaron hitos en sus proyectos pioneros de disposición final en pozos barrenados de las fuentes radiactivas selladas en desuso. Para todas las demás categorías de desechos radiactivos hay instalaciones de disposición final operativas en todo el mundo.

9. En todas partes se siguió avanzando en el fortalecimiento y la mejora de la seguridad de las centrales nucleares y los reactores de investigación, y el Organismo realizó muchas misiones de examen por homólogos y prestó numerosos servicios de asesoramiento en todos los ámbitos de la seguridad. Los Estados Miembros siguieron solicitando la asistencia del Organismo en esferas tales como la gestión del envejecimiento, la gestión de los riesgos internos y externos, el control de la contaminación, el aprovechamiento de la experiencia operacional, el marco regulador para los programas nucleoelectrónicos, y los reactores pequeños y medianos o modulares, así como en la clausura y la gestión de los desechos radiactivos.

10. En 2018 se hicieron públicas varias bibliotecas de datos nucleares, que son esenciales para todas las actividades de investigación y desarrollo de aplicaciones tanto eléctricas como no eléctricas. Se puso en marcha la Red Internacional de Evaluación de Datos Nucleares (INDEN), para estimular los avances en las evaluaciones de la sección eficaz de captura de neutrones de los nucleidos de particular importancia para las tecnologías nucleares.

11. Nuevas tecnologías e instrumentos de medición relacionados con aceleradores y haces de iones han dado resultados alentadores en ámbitos tales como las comunicaciones seguras, la simulación de los daños de los materiales, la monitorización de la contaminación del aire, la mitigación de los efectos de los óxidos de nitrógeno y de los óxidos de azufre en el cambio climático y en la contaminación ambiental y la medición de la contaminación superficial.

12. Los 252 reactores de investigación que están en funcionamiento en 55 países siguen cumpliendo una importante función de apoyo a los sectores médico, industrial, de la educación y de la energía nucleoelectrónica. Siete países están construyendo nuevos reactores de investigación, y varios otros están planificando o estudiando la posibilidad de hacerlo. Hasta el momento, 99 reactores de investigación y 4 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al uso de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o puestos en régimen de parada confirmada. En 2018 se convirtió al uso de UPE en lugar de UME un reactor miniatura fuente de neutrones de Nigeria, y el combustible de UME irradiado fue devuelto a China. El proveedor de soluciones de medicina nuclear Curium ultimó la conversión al uso de UPE de toda su fabricación de blancos, con lo cual alrededor del 75 % del molibdeno 99 que se vende actualmente en el mundo se produce sin el uso de UME. Aunque las breves interrupciones del servicio registradas en 2018 en algunos procesadores e instalaciones mundiales que producen molibdeno 99 por irradiación de blancos dieron lugar a cierta escasez regional de suministros, los esfuerzos de los productores y los profesionales sanitarios compensaron en parte las fluctuaciones de la producción.

13. La radiografía muónica es una técnica emergente que utiliza los muones de los rayos cósmicos presentes en la radiación natural de fondo. Los muones cósmicos son unas 10 000 veces más energéticos que los rayos X típicos, y por lo tanto pueden penetrar incluso en estructuras grandes sin dejar una dosis de radiación que supere los niveles de fondo naturales. Las técnicas de formación de imágenes por radiografía muónica pueden constituir una herramienta no destructiva para estudiar la integridad de estructuras civiles a escala real, como edificios, puentes y túneles. También pueden aplicarse en las ciencias de la Tierra y la arqueología, así como en la seguridad nuclear tecnológica y física y en la gestión de los desechos radiactivos.

14. Cada año, millones de mujeres se someten a una mamografía con bajas dosis de rayos X para la detección del cáncer de mama. Es muy importante que la dosis de radiación sea lo más baja posible, sin menoscabo de la imagen, que debe ser de la máxima calidad para los senos de todos los tamaños y composiciones. Las unidades de mamografía modernas emplean una amplia gama de energías de haz para lograr este resultado. Los laboratorios secundarios de calibración dosimétrica ayudan a los hospitales a verificar que sus dosis se ajusten a los patrones internacionales acordados. El equipo de dosimetría debe calibrarse periódicamente. Para una dosimetría exacta se recomiendan las cámaras de ionización de alta calidad, que dan una respuesta constante en todo el abanico de energías de haz utilizado en la clínica.

15. En el cáncer ginecológico, la cirugía radioguiada puede reducir la morbilidad a corto y largo plazo, en comparación con la linfadenectomía completa. Los ganglios linfáticos centinela son fundamentales en el proceso metastásico, y su cartografía y biopsia representa un elemento central en muchos tratamientos del cáncer. La biopsia de ganglios linfáticos centinela se considera el único método fiable para la exploración de los ganglios linfáticos en la etapa micrometastásica. El adelanto más notable en la cirugía radioguiada en casos de cáncer ginecológico es la introducción en el quirófano de instrumentos tales como las gammacámara portátiles.

16. La irradiación de los alimentos es una parte importante de los procesos posteriores a la producción, que elimina los microbios causantes de intoxicaciones alimentarias, las plagas y los microorganismos responsables de la descomposición, aumentando así el tiempo de conservación de los alimentos. Hasta ahora, lo habitual ha sido que la irradiación de los alimentos se efectúe en grandes instalaciones independientes, pero el desarrollo de nuevos irradiadores y de las tecnologías conexas está allanando el camino para una nueva forma de proceder. La tecnología está reduciendo el tamaño de los generadores de rayos X y haces de electrones, y los adelantos recientes en la irradiación de fuente mecánica hacen pensar que en el futuro será más fácil instalar unidades de irradiación en las cadenas de envasado de alimentos.

17. Las grandes pérdidas de cosechas causadas por el cambio climático ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar variedades innovadoras para garantizar la seguridad alimentaria mundial. La combinación del fitomejoramiento por mutaciones, la selección asistida por marcador y el fenotipado ultrarrápido constituye una fórmula poderosa para la rápida adaptación de las plantas al cambio climático. Se están estableciendo procesos de trabajo para la identificación eficiente de las mutaciones inducidas que generan fenotipos específicos, y estas tecnologías y metodologías están llegando cada vez más a los Estados Miembros.

18. Según las proyecciones, la demanda mundial de alimentos de origen animal aumentará entre un 60 % y un 70 % de aquí a 2050. Para satisfacer esa demanda, será necesaria una intensificación tecnológica de los sistemas de producción de la industria ganadera. El acceso al pienso y el forraje y a los buenos pastizales deberá duplicarse. La aplicación innovadora de la tecnología nuclear e isotópica puede ayudar a crear un conjunto de datos sobre el consumo de alimentos, la selección de la dieta y el contenido de nutrientes de los pastos en que padece el ganado, y orientar así la elaboración de estrategias adecuadas de gestión del pastoreo y de la alimentación de los animales. Los estudios micronutricionales pueden servir de base para el aporte complementario de los minerales necesarios para optimizar la salud y la productividad de los animales.

Examen de la Tecnología Nuclear de 2019

Informe principal

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrónica en la actualidad

1. Al 31 de diciembre de 2018, había 450 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo, con una capacidad total de 396,4 GW(e)¹ (véase el cuadro A-1), el nivel más alto jamás alcanzado. Esta cifra representa un aumento de la capacidad total del orden de 5 GW(e) con respecto a 2017. De los reactores en funcionamiento, el 82,2 % son reactores moderados y refrigerados por agua ligera, el 10,9 % son reactores moderados y refrigerados por agua pesada, el 3,1 % 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. Cerca del 89 % de la electricidad generada a partir de energía nuclear se produjo en 376 reactores de agua ligera.

2. En 2018 se conectaron a la red nueve nuevos reactores de agua a presión (PWR): siete en China (Haiyang 1, Haiyang 2, Sanmen 1, Sanmen 2, Taishan 1, Tianwan 4 y Yangjiang 5) y dos en la Federación de Rusia (Leningrad 2-1 y Rostov 4). Siete reactores fueron puestos en régimen de parada definitiva: Chinshan 1 en Taiwán (China); Ikata-2, Ohi-1, Ohi-2 y Onagawa-1 en el Japón; Leningrad-1 en la Federación de Rusia, y Oyster Creek en los Estados Unidos de América.

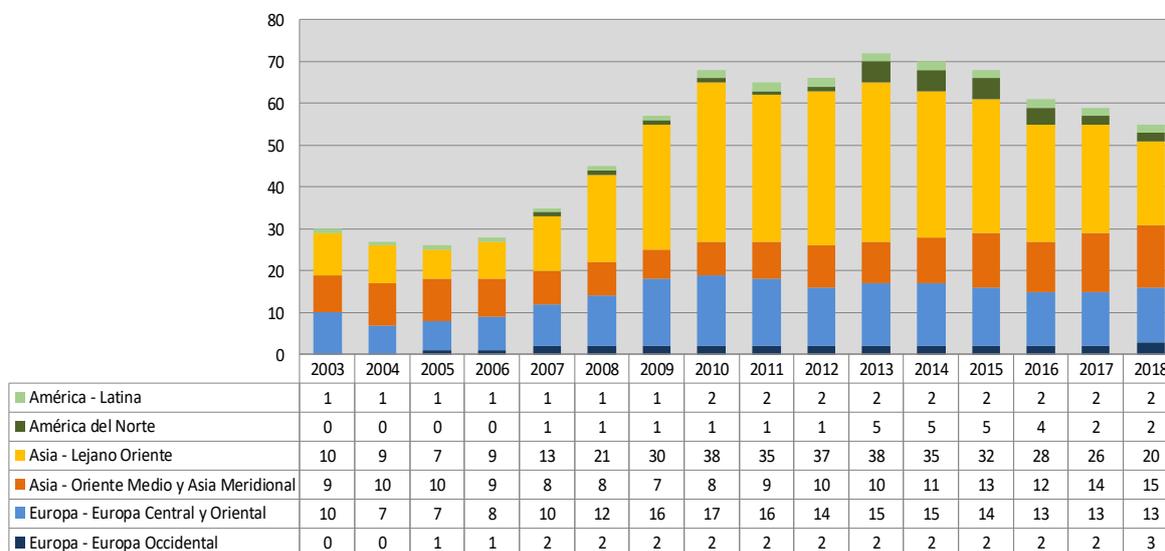


Fig. A-1. Número de reactores en construcción, por región.

(Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA, www.iaea.org/pris)

3. Al 31 de diciembre de 2018 había 55 reactores en construcción. Han comenzado las obras de construcción de las Unidades Akkuyu 1 (Turquía), Kursk 2-1 (Federación de Rusia), Rooppur 2 (Bangladesh), Shin-Kori 6 (República de Corea) y Hinkley Point C-1 (Reino Unido). La expansión y las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo siguen concentradas en Asia (figura A-1), donde hay 35 reactores en construcción. También están en Asia 58 de los 68 nuevos reactores que se han conectado a la red desde 2005.

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

Cuadro A-1. Reactores nucleares de potencia en funcionamiento y en construcción en el mundo
(al 31 de diciembre de 2018)^a

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2018		Experiencia operacional total hasta el final de 2018	
	Nº de unidades	Total de MW(e)	Nº de unidades	Total de MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	7	9 515			71,9	11,7	839	7
ARGENTINA	3	1 633	1	25	6,5	4,7	85	2
ARMENIA	1	375			1,9	25,6	44	8
BANGLADESH			2	2 160				
BELARÚS			2	2 220				
BÉLGICA	7	5 918			27,3	39,0	296	7
BRASIL	2	1 884	1	1 340	14,8	2,7	55	3
BULGARIA	2	1 966			15,4	34,7	165	3
CANADÁ	19	13 554			94,4	14,9	750	6
CHINA	46	42 858	11	10 982	277,1	4,2	322	11
COREA, REPÚBLICA DE	24	22 444	5	6 700	127,1	23,7	547	5
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS			4	5 380				
ESLOVAQUIA	4	1 814	2	880	13,8	55,0	168	7
ESLOVENIA	1	688			5,5	35,9	37	3
ESPAÑA	7	7 121			53,4	20,4	336	1
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	98	99 061	2	2 234	808,0	19,3	4 408	6
FEDERACIÓN DE RUSIA	36	27 252	6	4 573	191,3	17,9	1 298	6
FINLANDIA	4	2 784	1	1 600	21,9	32,4	159	4
FRANCIA	58	63 130	1	1 630	395,9	71,7	2 222	4
HUNGRÍA	4	1 902			14,9	50,6	134	2
INDIA	22	6 255	7	4 824	35,4	3,1	504	11
IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL	1	915			6,3	2,1	7	4
JAPÓN	38	36 476	2	2 653	49,3	6,2	1 863	2
MÉXICO	2	1 552			13,2	5,3	53	11
PAÍSES BAJOS	1	482			3,3	3,1	74	0
PAKISTÁN	5	1 318	2	2 028	9,3	6,8	77	5
REINO UNIDO	15	8 923	1	1 630	59,1	17,7	1 604	7
REPÚBLICA CHECA	6	3 932			28,3	34,5	164	10
RUMANIA	2	1 300			10,5	17,2	33	11
SUDÁFRICA	2	1 860			10,6	4,7	68	3
SUECIA	8	8 613			65,9	40,3	459	0
SUIZA	5	3 333			24,5	37,7	219	11
TURQUÍA			1	1 114				
UCRANIA	15	13 107	2	2 070	79,5	53,0	503	6
Total ^{b, c}	450	396 413	55	56 643	2 563,0		17 880	11

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

b. Nota: Los totales incluyen los siguientes datos de Taiwán (China): 5 unidades, 4448 MW(e), en funcionamiento; 2 unidades, 2600 MW(e), en construcción; 26,7 TW·h de generación de energía nucleoelectrónica, que representan el 11,4 % 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 las centrales en régimen de parada y en funcionamiento en Taiwán (China) (224 años y 1 mes).

A.1.1. Países con centrales nucleares en funcionamiento

4. Al final de 2018, el 66 % de los 450 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en el mundo llevaban en servicio más de 30 años. En un número cada vez mayor de centrales nucleares se están ejecutando programas de explotación a largo plazo y gestión del envejecimiento.

5. Hungría ha casi terminado la ampliación de la vida operacional de sus reactores. La Autoridad de Energía Atómica de Hungría aprobó la prórroga de la explotación de cuatro unidades de la central nuclear de Paks por otros 20 años, después de los 30 previstos en las licencias. Para 2020 está programado el inicio de la construcción de otras dos unidades en la central de Paks (en un proyecto denominado Paks II), cuya explotación comercial comenzaría en 2026 y 2027.

6. En mayo de 2018, la República Islámica del Irán comenzó las obras de estabilización de suelos en el emplazamiento en que se construirá la Unidad Bushehr 2 de 1050 MW(e), la primera de dos unidades planificadas. Se prevé que las unidades Bushehr 2 y Bushehr 3 se conecten a la red en 2026 y 2027, respectivamente.

7. En el Canadá, comenzaron las obras de renovación en la Unidad 2 de la central nuclear de Darlington. Según los planes, la renovación de las cuatro unidades Candu, que permitirá a la central seguir funcionando hasta 2055, estará terminada en 2026. En agosto de 2018 se concedió a la central nuclear de Pickering una licencia de explotación por 10 años, que incluye tres etapas: explotación comercial continuada hasta 2024; actividades de estabilización, como la retirada de combustible y el desagüe tras la parada de la central; y el almacenamiento seguro bajo vigilancia.

8. El Gobierno británico, que se ha comprometido a aumentar la capacidad nuclear en virtud de la Estrategia de Crecimiento Limpio de 2017, ha adoptado medidas para alentar la construcción de nuevas centrales nucleares, y el sector ha propuesto aumentar la capacidad en hasta 17,8 GW(e) con nuevas construcciones. Están en curso las obras de preparación del emplazamiento para el primer reactor de Hinkley Point C, cuya puesta en funcionamiento está programada para 2025.

9. En julio de 2018, la central nuclear de Kozloduy, en Bulgaria, finalizó una mejora que podría ampliar su vida útil hasta 2051. En junio de 2018, el Gabinete anuló la decisión de 2012 que había puesto fin a la construcción de la central nuclear de Belene, permitiendo la reactivación del proyecto y de las obras en el emplazamiento.

10. En 2018 se realizaron estudios en México para ampliar la capacidad instalada en la central nuclear Laguna Verde.

11. En julio de 2018, Armenia confirmó que está trabajando para ampliar la vida operacional de la Unidad 2 de su central nuclear de Metsamor.

12. Rumania tiene previsto seguir aumentando la capacidad de generación nuclear mediante la construcción y puesta en servicio de las Unidades 3 y 4 de la central nuclear de Cernavodă. En mayo de 2018, se decidió que la Unidad Cernavodă 1 pararía en 2026 para su renovación.

13. En agosto de 2018, Sudáfrica publicó su Plan de Recursos Integrados/Plan de Desarrollo Nacional más reciente, que no prevé el crecimiento de su capacidad de energía nuclear antes de 2030.

14. En mayo de 2018, la compañía eléctrica checa ČEZ realizó un estudio que indicó que no había obstáculos técnicos o de seguridad fundamentales que se opusieran a una vida operacional de 60 años de las unidades de la central nuclear de Temelin. Ese mismo mes, el Gobierno aplazó la decisión de construir nuevas unidades nucleares.

15. Bélgica tiene previsto terminar de cerrar las centrales nucleares en 2025. Como lo confirmó la nueva estrategia energética aprobada por el Gobierno en marzo de 2018, el reactor Doel 3 dejará de funcionar en 2022 y el Tihange 2 en 2023, y las unidades restantes pararán en 2025. Se espera que el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 que España está elaborando determine cuál va a ser la evolución de la energía nuclear en la canasta energética nacional, incluido un calendario para el cierre de las centrales nucleares. Alemania prosigue su retirada progresiva del ámbito nuclear. Suecia y Suiza mantienen sus parques actuales de centrales nucleares con arreglo a lo previsto.

16. La seguridad operacional de las centrales nucleares continúa siendo alta, como lo demuestran los indicadores de seguridad recopilados por el Organismo. La figura A-2 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 de uso frecuente del comportamiento de la seguridad.

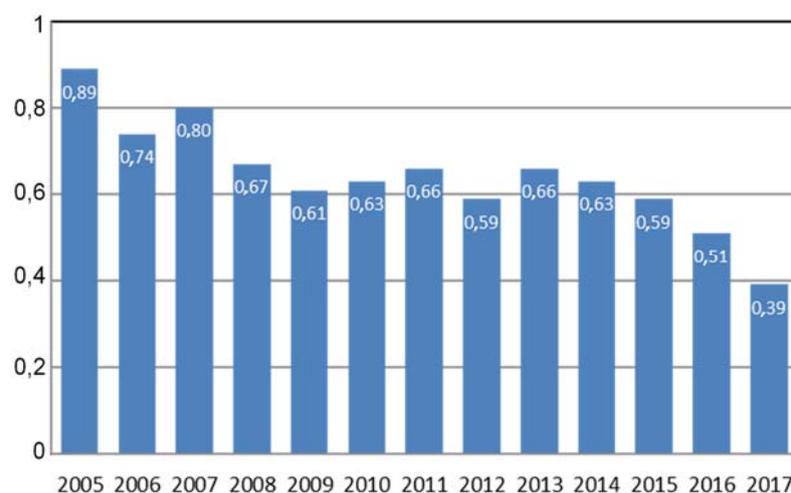


Fig. A-2. Tasa media de paradas de emergencia: número de paradas de emergencia automáticas y manuales registradas por cada 7000 horas de funcionamiento de una unidad.

(Fuente: Sistema de Información sobre Reactores de Potencia del OIEA, www.iaea.org/pris)

A.1.2. Países en fase de ampliación

17. De los 30 Estados Miembros con centrales nucleares en explotación, 11 están trabajando en la construcción de nuevas unidades o ampliando sus programas nucleoelectricos. De los 55 proyectos de construcción de reactores en curso, 46 se encuentran en países que ya tenían un programa nucleoelectrico, principalmente China (11), la India (7) y la Federación de Rusia (6).

18. China tiene actualmente 46 unidades de reactores nucleares en funcionamiento y 11 en construcción. En 2018, se sumaron a la red 7 unidades (Sanmen 1 y 2, Taishan 1, Haiyang 1 y 2, Yangjiang 5 y Tianwan 4). Se prevé que el órgano regulador de la energía de China, la Administración Nacional de Energía, fijará el objetivo para la capacidad nuclear en 2030 en entre 120 y 150 GW(e). China tiene también previsto construir 30 reactores en el extranjero de aquí a 2030.

19. La Federación de Rusia tiene 37 reactores de potencia en funcionamiento y 6 en construcción. El Programa Federal de Objetivos más reciente de Rusia asigna a la energía nucleoelectrica una proporción del 25 % al 30 % del suministro de electricidad para 2030, con un 45 % a 50 % para 2050 y un 70 % a 80 % para el final del siglo. En abril de 2018, Rusia terminó de construir una central nuclear flotante, la Akademik Lomonosov, que tiene previsto poner en servicio en 2019.

20. El proyecto del reactor europeo de agua a presión (EPR) de Olkiluoto 3 en Finlandia ha entrado en la fase de puesta en servicio, habiendo terminado los ensayos funcionales no activos y activos. El inicio de la explotación comercial está programado para finales de 2019. Finlandia tiene cuatro unidades de energía nucleoelectrica en funcionamiento y está planificando la ampliación de su programa. Las licencias de explotación de las Unidades Olkiluoto 1 y 2 fueron prorrogadas, lo que permitirá a estas dos unidades funcionar hasta el final de 2038. El proyecto Hanhikivi 1 sigue en examen para la concesión de la licencia, y el inicio de la construcción está programado para 2019.

21. El Plan de Seguridad Energética del Pakistán ha establecido un objetivo de capacidad de generación nucleoelectrica de 8800 MW(e) para 2030, lo que incluye un reactor de agua a presión de 1100 MW(e), que está previsto comenzar a construir en 2020, para su explotación comercial a partir de 2025.

22. Los Estados Unidos de América tienen 98 reactores nucleares comerciales en funcionamiento. Está en curso la construcción de las Unidades 3 y 4 de tipo AP1000 de la central Vogtle, en el estado de Georgia, que, según los planes, se comenzarán a explotar en 2021 y 2022. En julio de 2018 se anunció que el Centro de Energía Duane Arnold de Iowa, de una sola unidad, se pondría en régimen de parada definitiva a finales de 2020, cinco años antes de que expire su licencia de explotación. Los explotadores han presentado solicitudes para prorrogar de 60 a 80 años la explotación de las Unidades 3 y 4 de Turkey Point en Florida, las Unidades 2 y 3 de Peach Bottom en Pennsylvania y las Unidades 1 y 2 de Surry en Virginia. Los Estados Unidos de América son el primer país que está intentando ampliar la vida útil de una central nuclear a 80 años. Se puso fin a la explotación de la central nuclear de Oyster Creek, de una sola unidad, en septiembre de 2018, después de casi 49 años de explotación comercial.

23. En la Argentina, la unidad de Embalse está siendo sometida a un proceso de renovación y prolongación de la vida útil. La puesta en marcha y en servicio del reactor modular pequeño Carem-25, de 30 MW(e), está prevista para 2022. En abril de 2018, el órgano regulador nuclear prorrogó la licencia de explotación de Atucha 1, autorizando su funcionamiento hasta 2024.

24. En marzo de 2018, la Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL), de la India, y Électricité de France (EDF), de Francia, firmaron un acuerdo para la construcción de la central nuclear de Jaitapur, que comprenderá seis EPR. En octubre, la India y la Federación de Rusia firmaron un acuerdo para la construcción de una central de seis unidades WWER en un emplazamiento que aún no se ha seleccionado.

25. El Gobierno del Brasil se ha propuesto aumentar su producción de energía nucleoelectrica y tiene previsto construir cuatro nuevos PWR que entrarán en funcionamiento entre 2025 y 2030. La construcción de la Unidad Angra 3, de 1405 MW(e), se había reanudado en 2010, y la puesta en marcha estaba prevista inicialmente para 2018. Sin embargo, tras la realización de alrededor del 60 % de las obras, el avance se ha estancado y Eletronuclear está intentando aplicar un modelo basado en la asociación para reanudar la construcción. En mayo, una misión de examen por homólogos del Organismo determinó que Eletronuclear, el explotador estatal de Angra 1, estaba haciendo progresos en la gestión del envejecimiento y en la preparación para la explotación a largo plazo del reactor.

26. Francia mantiene 58 unidades nucleoelectricas en funcionamiento, y para finales de 2019 tiene previsto cargar de combustible una nueva unidad de la central nuclear de Flamanville. Según el Gobierno francés, la estrategia de desarrollo de la energía nucleoelectrica se relaciona con los objetivos establecidos en la Ley de Transición Energética para el Crecimiento Limpio y el plan energético plurianual, que está previsto que se apruebe a mediados de 2019. El proyecto de plan fija 2035 como fecha límite para reducir la proporción correspondiente a la energía nucleoelectrica en la canasta energética del país al 50 %. A fin de alcanzar este objetivo, para 2035 14 reactores existentes se pondrán en régimen de parada. El Gobierno trabajará con la industria nuclear a fin de elaborar, para 2021, un plan de trabajo que sirva de base para una decisión sobre la construcción de nuevos reactores nucleares de potencia.

27. Con arreglo a su Octavo Plan Básico de Suministro y Demanda de Electricidad a Largo Plazo, de diciembre de 2017, la República de Corea proseguirá la labor encaminada a construir cinco unidades APR-1400 antes de 2023. Sin embargo, ha renunciado a construir otras unidades nuevas y a prolongar la vida operacional de las centrales ya existentes. En junio de 2018, la Compañía Hidroeléctrica y Nucleoeléctrica de Corea decidió poner en régimen de parada el segundo reactor nuclear más antiguo del país, Wolsong 1, sobre la base de un análisis económico a raíz de la política de transición energética del Gobierno. El reactor estaba fuera de servicio desde mayo de 2017, para el mantenimiento programado.

28. En julio de 2018 se anunció que la Unidad 3 de la central nuclear de Mochovce de Eslovaquia entraría en funcionamiento en el segundo trimestre de 2019.

29. En julio de 2018 se prorrogó por 20 años la licencia de explotación de la Unidad Rovno 3 en Ucrania, de modo que la central seguirá funcionando hasta 2037. En 2018 se ultimó un estudio de viabilidad para la reanudación de la construcción de las Unidades Khmelnytskyi 3 y 4. La ‘Estrategia energética de Ucrania hasta 2035’ prevé que la energía nucleoelectrica represente el 50 % de la producción de electricidad del país en 2035.

30. En julio de 2018, el Gobierno del Japón aprobó el Plan Básico de Energía, que confirmó que la energía nucleoelectrica representaría entre un 20 % y un 22 % de la canasta energética en 2030. En junio de 2018, la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio anunció la intención de clausurar todas las unidades de la central nuclear de Fukushima Daini. Ese mismo mes comenzó a funcionar nuevamente la Unidad Genkai 4, con arreglo a las nuevas normas de reglamentación. En 2018 se autorizó la continuación de la explotación de las Unidades Ohi 3 y 4 y Tokai 2.

A.1.3. Países en fase de incorporación

31. De los 28 Estados Miembros que están estudiando la posibilidad de incluir la energía nucleoelectrica en su canasta energética, planificando esta medida o trabajando ya activamente en ella, 19 han comenzado estudios de la infraestructura para este tipo de energía, 5 han adoptado ya una decisión y están preparando la infraestructura necesaria, y otros 5 han firmado contratos y están preparando o han iniciado la construcción.

32. En los Emiratos Árabes Unidos avanzó la construcción de los cuatro reactores de la central nuclear de Barakah. Se prevé que la Unidad 1 comenzará a funcionar a finales de 2019 o comienzos de 2020, y la segunda unidad, un año después. A petición de los Emiratos Árabes Unidos se realizó en 2018 una misión de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear (INIR) de Fase 3. En Belarús, prosiguió la construcción de la primera central nuclear en Ostrovets, y la puesta en servicio de la primera y la segunda unidad está programada para 2019 y 2020, respectivamente. En Bangladesh se realizó el primer vertido de hormigón para la segunda unidad de la central nuclear de Rooppur. La puesta en servicio de las Unidades 1 y 2 está prevista para 2024 y 2025, respectivamente. También hay planes para la ejecución de un segundo proyecto de central nuclear. En Turquía se promulgó una nueva legislación nuclear mediante un decreto con fuerza de ley. Ha comenzado la construcción de la central nuclear de Akkuyu, y la puesta en servicio de la primera unidad está prevista para 2023. En Egipto estaba en examen la licencia de un emplazamiento para la central nuclear de cuatro unidades en El Dabaa. El inicio de la construcción está programado para 2020, y la puesta en servicio de la primera unidad, para 2026. Egipto ha solicitado la realización de una misión INIR de Fase 2 en octubre de 2019.

33. La Arabia Saudita tiene prevista la construcción en paralelo de un SMR y dos centrales nucleares convencionales. Ya está en curso el proceso de contrataciones para las dos centrales nucleares convencionales. El inicio de la construcción del SMR está programado para 2020, y el de la primera central nuclear grande para 2021, con la puesta en servicio de esta última en 2028. En julio de 2018 tuvo lugar una misión INIR de Fase 2. En Jordania también se está elaborando un programa de energía nucleoelectrica de doble finalidad, incluida la selección para 2019 de una tecnología de SMR, con una capacidad total comprendida entre los 200 y los 600 MW(e), en función de la demanda de electricidad, que se instalará en 2027-2028, y la construcción de un gran PWR de aproximadamente 1000 MW(e),

muy probablemente después de 2030. En octubre de 2018, Uzbekistán firmó un acuerdo con la Federación de Rusia para la construcción de su primera central nuclear de dos unidades, con una capacidad total de hasta 2400 MW(e). Nigeria está planificando la construcción de cuatro reactores, mediante el enfoque de la construcción, propiedad, explotación y transferencia, con la puesta en servicio de la primera unidad en 2027. Kenya está a la espera de una decisión sobre la ejecución de un programa de energía nucleoelectrica, con la puesta en servicio de la primera central nuclear programada para 2027. En noviembre de 2018 se realizó una misión de Diseño del Emplazamiento y los Sucesos Externos (SEED). Kenya ha solicitado una misión INIR de seguimiento para agosto de 2019. Este país ha expresado recientemente interés en construir un reactor de investigación antes de proceder a la construcción de una central nuclear. En Polonia, la puesta en servicio de la primera unidad está prevista para 2030, si el Gobierno decide seguir adelante con el programa de energía nucleoelectrica.

34. Los Estados Miembros siguen sacando provecho de la asistencia prestada por el Organismo en el desarrollo de la infraestructura nuclear nacional necesaria, sobre la base del enfoque de los hitos, que apoya el establecimiento de programas de energía nucleoelectrica sostenibles y tecnológica y físicamente seguros. Esa asistencia comprende exámenes por homólogos y misiones de expertos, cursos de capacitación y herramientas que permiten abordar sistemáticamente las 19 cuestiones relativas a la infraestructura nuclear. Con las 5 misiones INIR realizadas en 2018 en la Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos, Filipinas, el Níger y el Sudán, el número de misiones INIR llevadas a cabo desde el comienzo del Examen en 2009 aumentó a 27, en 20 Estados Miembros.

A.2. Proyecciones de crecimiento de la energía nucleoelectrica

35. Según las proyecciones del Organismo de 2018 (figura A-3), que se elaboraron en consulta con expertos regionales y reflejan la información más reciente sobre las políticas y las condiciones del mercado, la energía nucleoelectrica puede tener dificultades para mantener su lugar actual en la matriz energética mundial. En la proyección baja para 2030, la capacidad de generación nucleoelectrica instalada neta disminuye en más de un 10 % con respecto a los 392 GW(e) del final de 2017. En el caso de la proyección alta, la capacidad aumenta un 30 %, llegando a 511 GW(e) en 2030. A más largo plazo, en la proyección baja la capacidad sigue disminuyendo por otro decenio aproximadamente, antes de repuntar y volver a alcanzar los niveles de 2030 en 2050; la proporción correspondiente a la energía nucleoelectrica en la capacidad de generación total disminuye a un 2,8 %, frente al 5,7 % actual. En la proyección alta, la capacidad instalada alcanza los 748 GW(e) en 2050, con un 5,8 % de la capacidad de generación total.

36. La amplia diferencia entre las proyecciones baja y alta se debe a la incertidumbre con respecto a la sustitución del gran número de reactores que está previsto retirar del servicio en torno a 2030 y en los años siguientes, especialmente en América del Norte y Europa.

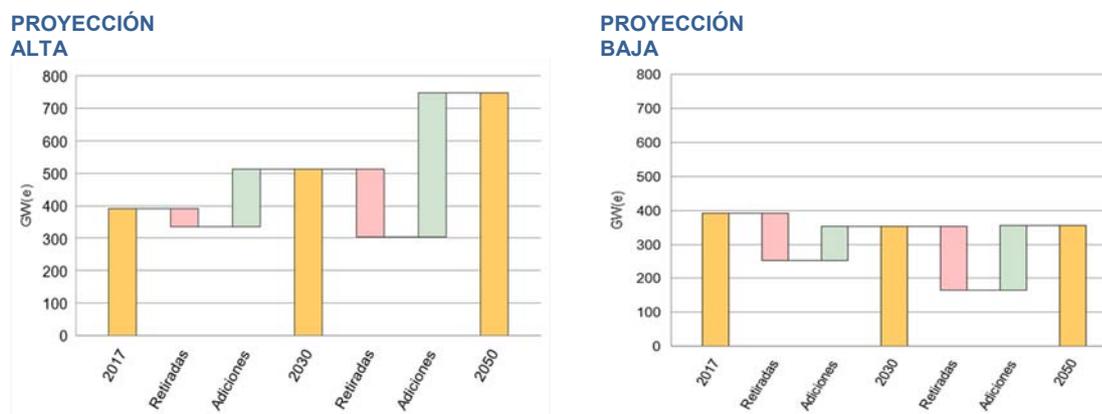


Fig. A-3: Proyecciones alta (izquierda) y baja (derecha) de la capacidad nuclear mundial.
(Fuente: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Colección de Datos de Referencia del OIEA N° 1, 2018)

37. La necesidad de ampliar sustancialmente la contribución de la energía nucleoelectrica a la mitigación del cambio climático se refleja en las trayectorias de las emisiones presentadas en el reciente informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático titulado *Global Warming of 1.5 °C*². En la mayoría de las trayectorias que permitirían limitar el calentamiento global a 1,5 °C, la energía nucleoelectrica aumenta su contribución a la matriz energética de aquí a 2050; por ejemplo, las cuatro trayectorias modelizadas que se destacan en el Resumen para los Responsables de las Políticas proyectan un aumento de la generación de energía nucleoelectrica de por lo menos el 59 % para 2030 y de hasta un 501 % en 2050, con respecto a 2010.

38. El interés por la energía nucleoelectrica sigue siendo alto también en el mundo en desarrollo, particularmente en Asia, donde países como China y la India están procurando satisfacer la demanda de electricidad en rápido crecimiento y reducir al mismo tiempo las emisiones de gases de efecto invernadero. En ese sentido, las negociaciones internacionales en curso sobre el cambio climático al amparo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, incluido el 24º período de sesiones de la Conferencia de las Partes (CP 24) celebrado en diciembre en Katowice (Polonia), representan una importante oportunidad de destacar el papel que puede cumplir la energía nuclear, con sus bajas emisiones de carbono, en la solución de los retos mundiales relacionados con el clima y la energía.

A.3. Ciclo del combustible

A.3.1. Parte inicial

Recursos y producción de uranio

39. La 26ª edición de la publicación conjunta bienal de la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE y el OIEA, *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*³, conocida también como ‘Libro Rojo’, muestra que la oferta mundial de uranio es más que suficiente para atender las necesidades proyectadas en el futuro previsible, independientemente del papel que se decida asignar a la energía nuclear en la satisfacción de la demanda futura de electricidad y en el cumplimiento de los objetivos mundiales relacionados con el clima. Sin embargo, el informe destaca que se requerirán importantes inversiones y competencias técnicas para poder utilizar en tiempo oportuno esos recursos de uranio, incluidos los de las minas que actualmente están en servicio y mantenimiento.

40. Los precios al contado del uranio se mantuvieron relativamente bajos en 2018, por lo general entre 47 dólares/kg y 59 dólares/kg, algo más que el margen de 2017, con una tendencia general al alza durante el año. Los bajos precios redujeron considerablemente la capacidad de las empresas de conseguir fondos para la exploración, los estudios de viabilidad y los nuevos proyectos de construcción. Muchos proyectos relacionados con el uranio quedaron suspendidos o reducidos a actividades con pocas repercusiones financieras. Algunos que se habían iniciado o que estaban en fases avanzadas de la construcción fueron puestos en estado de servicio y mantenimiento o de producción reducida. Por lo tanto, es probable que la producción mundial de 2018 sea parecida a la de 2017, que ascendió a 59 342 toneladas de uranio (t U), una cantidad menor que la notificada para 2016.

41. Kazajistán mantuvo su posición de primer productor de uranio del mundo, con una producción procedente casi enteramente de sus minas de lixiviación *in situ*. Tras el rápido aumento registrado entre 2000 y 2016, la producción disminuyó a 23 400 t U en 2017, y para 2018 se espera una cifra parecida.

42. En el Canadá, segundo productor del mundo, la mina de Cigar Lake alcanzó en 2017 su plena capacidad de producción, a saber, 6925 t U, y para 2018 se prevé una cantidad similar. Sin embargo, la suspensión de la producción resultante de las actividades de extracción en McArthur River y de tratamiento de minerales en Key Lake, anunciada en noviembre de 2017 por un período de diez meses, se prorrogó indefinidamente en enero de 2018 dado que la demanda de uranio y el precio de este seguían siendo bajos.

² IPCC, *Global Warming of 1.5 °C*, 1 October 2018, <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>.

³ Publicada en diciembre de 2018 en <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>.

43. La explotación de las minas Rössing y Husab de Namibia continuó durante 2018, mientras que la mina de uranio Langer Heinrich fue puesta en estado de servicio y mantenimiento en mayo de ese año, ante el prolongado período de bajos precios del uranio. En algunos de los otros yacimientos de uranio de Namibia continuaron los estudios de viabilidad, a un ritmo moderado.

44. En Australia, la mina de uranio de lixiviación *in situ* de Four Mile produjo aproximadamente 1500 t U en 2018. En el proyecto Ranger, la producción se basa solo en las existencias de mena, y las actividades de extracción y procesamiento cesarán en enero de 2020. En general, en varios yacimientos de uranio de Australia Occidental se han suspendido los trabajos o se están realizando estudios adicionales, pero sin fechas definitivas para la construcción o la apertura.

45. En Groenlandia (Reino de Dinamarca) prosiguieron los estudios ambientales y de viabilidad y las aprobaciones para el proyecto de tierras raras, metales comunes y uranio en el yacimiento de Kvanefjeld.

46. China siguió aumentando su gasto en actividades de exploración y desarrollo de recursos de uranio, tanto a nivel nacional como en el extranjero. En diciembre de 2018, la Corporación Nacional de Uranio de China acordó comprar una participación del 69 % en la mina Rössing de Rio Tinto, la mina de uranio a cielo abierto más antigua del mundo, que ha producido más uranio que cualquier otra mina.

47. El Consejo de Seguridad Nuclear español siguió analizando la documentación sobre el proyecto de producción de uranio en Salamanca a fin de emitir su informe obligatorio sobre la autorización de construcción para la planta de fabricación de concentrado de uranio. Esta es una de las aprobaciones necesarias para que la planta pueda ponerse en marcha.

48. En la mina de Engenho, en el estado de Bahia (Brasil), se están realizando los estudios de viabilidad y la labor reglamentaria para abrir otro tajo, cerca de la mina de Cachoeira, que está agotada.

Conversión y enriquecimiento

49. La capacidad actual de conversión y enriquecimiento es más que suficiente para satisfacer la demanda mundial, si bien con un mercado segmentado y con la producción concentrada en solo unos cuantos proveedores.

50. En septiembre de 2018, Orano inauguró en Tricastin (Francia) su nueva planta de conversión en el marco del proyecto Comurhex II. Diseñada con las tecnologías más avanzadas, la planta ‘Philippe Coste’ tiene niveles muy bajos de consumo de productos químicos y energía. Tres hornos de llama directa producirán hasta 15 000 toneladas de hexafluoruro de uranio (UF₆) por año.

51. El principal proceso de irradiación molecular con láser para enriquecer el uranio es SILEX, que utiliza UF₆. En junio de 2018, Silex Systems de Australia decidió abandonar su adquisición de una participación mayoritaria en Global Laser Enrichment (GLE), una empresa conjunta de General Electric (GE), Hitachi y Cameco. Silex Systems declaró que, pese a que las negociaciones con GE-Hitachi estaban en una fase avanzada, consideraba que había demasiados riesgos en las actividades de GLE.

Fabricación de combustible

52. En enero de 2018, las compañías de tecnología del combustible nuclear Lightbridge y Framatone Inc., de los Estados Unidos, pusieron en marcha Enfission, una empresa conjunta a partes iguales para desarrollar conjuntos de combustible nuclear con el combustible metálico avanzado de Lightbridge, obtener la licencia y comercializarlos. El combustible está hecho de una aleación de circonio y uranio, con una particular composición y geometría de las barras de combustible que, según la empresa, permitirá obtener mejoras económicas, de la eficiencia y de la seguridad en las centrales nucleares actuales y futuras.

53. En enero de 2018, Westinghouse Electric Company anunció que había firmado un contrato con Energoatom para prolongar su suministro de combustible nuclear a los reactores WWER de Ucrania de 2020 a 2025.

54. Westinghouse y sus ocho socios europeos en el consorcio anunciaron en marzo de 2018 la finalización satisfactoria de un proyecto financiado por la Unión Europea para diversificar el suministro de combustible nuclear a los reactores WWER-440 de diseño ruso en Europa.

55. En marzo de 2018, la Unidad 1 de la central nuclear Edwin I. Hatch de los Estados Unidos de América comenzó los ensayos iniciales utilizando los conjuntos combustibles a prueba de accidentes de Global Nuclear Fuel (GNF), con un plakeado de hierro, cromo y aluminio conocido como IronClad, y con un revestimiento del combustible de circonio denominado ARMOR. En mayo de 2018, la compañía de electricidad Vattenfall de Suecia seleccionó a GENUSA (una empresa conjunta de la firma española ENUSA y GNF) para el suministro de ocho recargas de combustible a la central nuclear de Forsmark, de 2020 a 2023.

56. En abril de 2018, la compañía de combustible nuclear rusa TVEL (que forma parte de la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom”) firmó acuerdos con la Organización de Energía Atómica del Irán y la Compañía de Producción y Desarrollo Nucleoeléctrico para sustituir los conjuntos combustibles del diseño UTVS por cartuchos de combustible TVS-2M en el reactor WWER-1000 de la central nuclear de Bushehr de la República Islámica del Irán en 2020. En agosto, TVEL proporcionó el primer lote de combustible nuclear TVSA-T.mod.2 modificado para el reactor WWER-1000 de la central nuclear de Temelin, en la República Checa. En la central nuclear de Rostov, en la Federación de Rusia, se cargó el reactor WWER-1000 con un lote experimental de cartuchos de combustible TVS-2M equipados con un filtro antiresiduos, desarrollado en el marco del proyecto nacional “Tasas nulas de fallo del combustible nuclear”.

57. En mayo de 2018, ENUSA de España y Westinghouse Electric Company firmaron un acuerdo marco de cooperación para colaborar en el desarrollo del combustible a prueba de accidentes EnCore de Westinghouse. El combustible incorpora conceptos tales como las fundas de aleación de circonio bañado en cromo, las fundas de carburo de silicio y las pastillas de combustible de siliciuro de uranio (U_3Si_2).

58. En junio de 2018, el Complejo de Producción de Combustible Nuclear de la India anunció la intención de ampliar sus instalaciones de producción de combustible y componentes de reactores en Hyderabad y Kota, para satisfacer la demanda relacionada con los nuevos reactores propuestos.

59. En agosto de 2018, SNC-Lavalin del Canadá firmó un contrato de servicios de ingeniería y un acuerdo de concesión de licencia con la Third Qinshan Nuclear Power Company para la aplicación de un haz de combustible de 37 elementos modificado específico para CANDU-6, utilizando equivalente de uranio natural y uranio natural. La intención es utilizar este combustible en las Unidades 1 y 2 de la central nuclear de Qinshan Fase III, en la provincia de Zhejiang de China. Esto constituiría el primer uso comercial de este haz de combustible modificado que emplea tanto equivalente de uranio natural como uranio natural.

60. En septiembre de 2018, Framatome firmó un contrato para el suministro y la instalación de barras de combustible revestidas con cromo a la Unidad 1 de la central Arkansas Nuclear One de Entergy a finales de 2019. Vattenfall también ha firmado un contrato con Framatome para el suministro de diez recargas de conjuntos combustibles fabricados en su instalación de Lingen (Alemania) entre 2021 y 2024, para Forsmark 3 y Ringhals 3 y 4.

61. En octubre de 2018, la Administración Nacional de Seguridad Nuclear de los Estados Unidos emitió un aviso de rescisión de contrato al consorcio que construía la Instalación de Fabricación de Combustible de Óxidos Mixtos (MOX), también denominada Proyecto MOX, en el emplazamiento de Savannah River, en Carolina del Sur. La instalación estaba destinada a absorber como mínimo 34 toneladas de plutonio apto para la fabricación de armas y transformarlo en combustible para reactores nucleares comerciales.

62. En diciembre de 2018, se produjo comercialmente el primer lote industrial de combustible MOX en el Complejo Minero y Químico de Zheleznogorsk (Federación de Rusia) para el reactor de neutrones rápidos BN-800.

A.3.2. Garantía del suministro

63. En diciembre de 2010, la Junta de Gobernadores del Organismo aprobó la creación del Banco de Uranio Poco Enriquecido (UPE) del OIEA. En 2015, el Organismo y Kazajstán finalizaron el marco jurídico básico para el establecimiento del Banco de UPE del OIEA en el emplazamiento de la Planta Metalúrgica de Ulba (UMP) en Ust-Kamenogorsk (Kazajstán).

64. En 2018 entró en vigor el acuerdo de tránsito con China y se firmaron los contratos de transporte con las organizaciones autorizadas de la Federación de Rusia y Kazajstán.

65. El Plan de Actividades Específicas está llegando a su fin, tras haber abordado cuestiones relacionadas, entre otras cosas, con el marco regulador de Kazajstán y la seguridad tecnológica y física en los emplazamientos.

66. El Organismo ha firmado contratos con Kazatomprom de Kazajstán y con Orano Cycle de Francia para la compra de UPE, y su objetivo es que se haya entregado el UPE a la Instalación de Almacenamiento de UPE del OIEA antes del final de 2019.

67. En el Examen de la Tecnología Nuclear de 2012 (documento GC(56)/INF/3) se describen otros mecanismos establecidos para la garantía del suministro.

A.3.3. Parte final

Gestión del combustible gastado

68. Hasta la fecha se han descargado de las centrales nucleares unas 400 000 toneladas de metal pesado. Actualmente, alrededor del 75 % del combustible descargado de los reactores de potencia comerciales está almacenado ya sea en las piscinas de los reactores o en instalaciones de almacenamiento de combustible gastado en seco o en húmedo situadas fuera de los emplazamientos. Existen 151 lugares de almacenamiento de este tipo, distribuidos en 27 países.

69. El sistema subterráneo de almacenamiento en seco en contenedores de la central nuclear San Onofre de los Estados Unidos de América, que está en régimen de parada, recibió las primeras transferencias de contenedores de almacenamiento de combustible cargados en febrero de 2018. El diseño subterráneo fue seleccionado porque ofrece resistencia a los sucesos sísmicos extremos. También en febrero de 2018, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos declaró su aceptación de la solicitud de licencia presentada en marzo de 2017 para la creación de una instalación de almacenamiento temporal consolidado en el condado de Lea, en Nuevo México. La instalación también tiene previsto utilizar un sistema subterráneo de almacenamiento en seco de combustible gastado en contenedores, que inicialmente absorberá hasta 8680 toneladas de metal pesado.

70. En julio de 2018, el Ministerio para la Transición Ecológica de España pidió al Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) que suspendiera la publicación del informe sobre la solicitud de la licencia para construir la instalación centralizada de almacenamiento propuesta para los desechos de actividad alta (HLW) y el combustible nuclear gastado. El programa de actividades para llevar a cabo la suspensión fue aprobado por el CSN el 25 de julio de 2018.

71. En el Japón comenzaron en agosto de 2018 los trabajos destinados a retirar el combustible gastado del depósito de almacenamiento lleno de sodio del prototipo de reactor reproductor rápido de Monju. Los conjuntos combustibles se transfieren a una piscina de almacenamiento situada en el emplazamiento, tras la eliminación del sodio residual.

72. En la central nuclear de Borssele, en los Países Bajos, se descargó en mayo de 2018 el primer combustible MOX, que se colocó en la piscina de combustible gastado del reactor. Está previsto conservar allí ese combustible por cuatro años, antes del transporte. Gracias a la estrategia de reciclado de los Países Bajos, no habrá combustible gastado para la disposición final geológica profunda, como se señaló en el informe del proyecto OPERA, publicado en enero de 2018.

73. En el Japón, se está creando espacio en la piscina de combustible gastado común de Fukushima mediante la transferencia de conjuntos combustibles a una instalación de almacenamiento en seco temporal del emplazamiento. La instalación temporal está en funcionamiento desde abril de 2013 y tiene capacidad para 50 cofres de almacenamiento en seco. En 2018 se impartió capacitación práctica a los operadores para que fueran capaces de retirar a distancia el combustible gastado de la piscina de la Unidad 3 y almacenarlo en la piscina de combustible gastado común.

74. En Alemania, el 1 de enero de 2019 la propiedad de las instalaciones de almacenamiento en seco fuera del emplazamiento de los reactores pasará de las compañías eléctricas a la empresa estatal BGZ.

75. Las restantes 100 000 toneladas de metal pesado descargadas del parque total de centrales nucleares han sido reprocesadas. La capacidad mundial de reprocesamiento es de alrededor de 5000 toneladas por año para los combustibles de óxidos normales, pero actualmente se utiliza solo en parte.

76. Con una capacidad anual total de 1700 toneladas, las dos plantas de reprocesamiento de combustible nuclear de Orano, la UP2-800 y la UP3, en La Hague (Francia), reprocesan en promedio entre 1000 y 1100 toneladas de metal pesado por año (desde 1976 se han reprocesado más de 34 000 toneladas de combustible nuclear gastado); el plutonio extraído se recicla y transforma en combustible MOX en la planta de MELOX del emplazamiento de Marcoule. Orano prosiguió en 2018 las obras de clausura de su planta UP2-400 de primera generación.

77. La planta RT-1 de Mayak Production Association en Ozersk (Federación de Rusia) reprocesó en 2018 más de 32 toneladas de metal pesado del combustible gastado de los WWER-1000, tras las mejoras efectuadas en 2017. Además, finalizó también el reprocesamiento experimental del combustible MOX gastado del reactor rápido BN-600. Se concedió una licencia para el funcionamiento del primer centro piloto de demostración de tecnologías de reprocesamiento innovadoras en el Complejo Minero y Químico de Krasnoyarsk, y en 2018 se reprocesó un conjunto combustible gastado de un WWER-1000. Se está construyendo un segundo centro piloto de demostración de 250 toneladas de metal pesado por año, que está previsto terminar en 2020.

78. En enero de 2018, China y Francia firmaron un acuerdo para la construcción de una planta de reprocesamiento y reciclado en China. En junio, Orano y la Corporación Nuclear Nacional de China iniciaron los trabajos preparatorios para esa planta, que tendrá una capacidad de 800 toneladas de uranio anuales.

79. Japan Nuclear Fuel Limited, el explotador de la Planta de Reprocesamiento de Rokkasho, anunció a finales de diciembre de 2017 que la terminación de la instalación se había aplazado en tres años para poder cumplir los nuevos requisitos reglamentarios, como los relativos a la contención y recuperación en caso de accidente muy grave.

80. La Planta de Reprocesamiento de Óxido Térmico del Reino Unido terminó sus operaciones en noviembre de 2018. Durante su vida útil, reprocesó 9300 t U de combustible de óxidos, incluido el de los reactores de gas avanzados nacionales, el de PWR y reactores de agua en ebullición extranjeros y el de los prototipos de reactores británicos.

A.4. Clausura, rehabilitación ambiental y gestión de los desechos radiactivos

A.4.1. Clausura de instalaciones nucleares

81. Al 31 de diciembre de 2018, hay en el mundo 173 reactores de potencia en régimen de parada o en proceso de clausura. De ellos, 17 están totalmente clausurados, y varios otros están llegando a las etapas finales de la clausura. Más de 150 instalaciones del ciclo del combustible están en régimen de parada definitiva o en proceso de clausura, y cerca de 130 ya están clausuradas. Más de 120 reactores de investigación están en régimen de parada o en proceso de clausura, y más de 440 están ya completamente clausurados.

82. El despliegue de tecnologías de valor comprobado y la labor de investigación y desarrollo están generando mejoras continuas, principalmente en los países con grandes programas nucleoelectrónicos. Por ejemplo, se han logrado avances técnicos en la descontaminación y segmentación de los componentes del circuito primario en varias centrales nucleares de Alemania, Eslovaquia, España, la Federación de Rusia, Francia y Suecia. En junio de 2018, Italia acogió una misión del Servicio de Examen Integrado para la Gestión de Desechos Radiactivos y de Combustible Gastado, la Clausura y la Rehabilitación (ARTEMIS) del OIEA, que examinó los planes de SOGIN para el desmantelamiento de la vasija de presión y las partes internas de los reactores de las centrales nucleares de Garigliano y Trino. Este examen fue una actividad de seguimiento de una misión ARTEMIS anterior que se llevó a cabo en 2017 con el objetivo de examinar los planes generales de clausura de todos los emplazamientos de SOGIN.

83. En Bulgaria, Eslovaquia, Lituania y Ucrania se siguen haciendo progresos en los proyectos de clausura de centrales nucleares, con el apoyo del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo. Como ejemplos cabe mencionar la puesta en funcionamiento de una nueva instalación de fusión por plasma para los desechos de la clausura de la central nuclear de Kozloduy, la finalización de la demolición de las torres de refrigeración de la central nuclear de Bohunice, y la entrada en pleno funcionamiento del nuevo confinamiento seguro de la Unidad 4 de Chernóbil.



Fig. A-4. Desmantelamiento de los componentes del reactor nuclear de potencia de Chooz A en Francia (izquierda) y avances en la clausura del reactor de investigación de Magurele en Rumania (derecha). (Fotografías: EDF, OIEA)

84. En cuanto a la clausura de reactores de investigación, el desmantelamiento del blindaje biológico del reactor VVR-S de 2 MW(t) de Magurele, cerca de Bucarest (Rumania), está ya en una fase de ejecución avanzada (figura A-4). El reactor de investigación homogéneo 'FOTON' de Tashkent (Uzbekistán) está completamente clausurado, y el emplazamiento del reactor, liberado del control reglamentario, está ahora disponible para otros usos industriales.

85. En octubre de 2018, la Corporación de Indemnización por Daños Nucleares y Facilitación de la Clausura del Japón publicó el plan técnico estratégico de 2018 para la clausura de la central nuclear de Fukushima Daiichi de la Compañía de Energía Eléctrica de Tokio (*Technical Strategic Plan 2018 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.*). Los trabajos de clausura del emplazamiento de Fukushima Daiichi avanzan, y ya están terminados los muros impermeables (congelados) del lado de la tierra y los preparativos para la retirada del combustible de la piscina de combustible gastado de la Unidad 3.

A.4.2. Rehabilitación

86. En 2018 se hicieron progresos en la preparación de los proyectos de rehabilitación de los antiguos emplazamientos de producción de uranio de Asia Central. Finalizó la ejecución del proyecto financiado por la Comisión Europea para la realización de una evaluación integrada del impacto ambiental y un estudio de viabilidad con vistas a la gestión y rehabilitación de los antiguos emplazamientos de producción de uranio de Degmay y Taboshar en Tayikistán. También se trabajó intensamente en otro proyecto similar financiado por la Comisión Europea para los antiguos emplazamientos de producción de uranio de Mailuu Suu, en Kirguistán. En el marco del programa intergubernamental de objetivos de la Comunidad de Estados Independiente (CEI), de cuya dirección técnica se encarga la Federación de Rusia, se intervino en el vertedero de colas de Kadji-Sai, en Kirguistán, para que fuera ambientalmente seguro. En las instalaciones de Tuyuk-Suu y Dalnee continuaron las obras de ingeniería a gran escala. En noviembre de 2018, el Consejo de Jefes de Gobierno de la CEI aprobó fondos para actividades de rehabilitación en Tayikistán, que está previsto iniciar en 2020. El apoyo internacional a los países de Asia Central para la rehabilitación de sus antiguos emplazamientos de producción de uranio es coordinado por el Grupo de Coordinación para Antiguos Emplazamientos de Producción de Uranio (CGULS), bajo la dirección conjunta del Organismo, la Comisión Europea y representantes de los países beneficiarios.

87. En 2018 concluyó la colocación de la cubierta provisional en el último embalse grande de colas del emplazamiento de Culmitzsch, en el marco del Proyecto de Rehabilitación Ambiental de Wismut, una iniciativa en gran escala para rehabilitar los antiguos emplazamientos de producción de uranio de Alemania oriental (figura A-5). Con ello, todas las colas radiactivas (178 millones de metros cúbicos) está ahora cubiertas de forma segura. Las obras para la colocación de la cubierta definitiva en el embalse de Culmitzsch durarán hasta 2028. En algunos otros emplazamientos, la empresa de propiedad del Gobierno federal Wismut ha pasado a la ejecución de tareas a largo plazo, principalmente el tratamiento de aguas y la vigilancia y el mantenimiento a largo plazo de los objetos rehabilitados.



*Fig. A-5. Embalse de colas de Culmitzsch en proceso de rehabilitación, Alemania, 2018.
(Fotografía: Wismut GmbH, Alemania)*

88. El Japón informó regularmente sobre los progresos realizados en la descontaminación fuera del emplazamiento. En la Zona de Estudio Intensivo de la Contaminación, donde la tasa de dosis en aire superaba los 0,23 $\mu\text{Sv/h}$ (equivalentes a más de 1 mSv/año), todos los municipios responsables habían concluido las actividades de descontaminación planificadas en marzo de 2018. De este modo ha terminado toda la labor de descontaminación a gran escala requerida, salvo en las zonas a las que es difícil volver a entrar.

89. En 2018, la Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM), la entidad estatal encargada del programa de rehabilitación de las antiguas minas de uranio de Portugal, finalizó las obras de rehabilitación ambiental de las antiguas minas de Castelejo, Formiga, Vale de Videira, Vales y Póvoa de Cervães. En Urgeiriça, EDM prosigue la clausura de la antigua Planta de Tratamiento Químico construida en los años cuarenta para la producción de concentrado de uranio, y ha comenzado recientemente la rehabilitación ambiental de otras cinco antiguas minas de uranio. Del total de 62 antiguas minas de uranio, 40 ya están rehabilitadas y se encuentran en régimen de mantenimiento y vigilancia continua posterior a la rehabilitación, con plantas de tratamiento activo y pasivo de aguas, cuando es necesario.

A.4.3. Gestión de desechos radiactivos

Gestión de las fuentes radiactivas selladas en desuso

90. 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. El proyecto de disposición final en pozos barrenados de Malasia se encuentra en el examen final de la justificación de la seguridad, y a principios de 2019 comenzarán las perforaciones.

91. En 2018 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. En el Brasil concluyó la retirada de todas las fuentes en desuso restantes de las categorías 1 y 2, con la expedición del último lote de fuentes a los Estados Unidos de América. En esta operación, la más grande jamás realizada con la celda caliente móvil, se repatriaron o enviaron a una empresa de reciclado 81 fuentes de teleterapia, con una actividad colectiva de 1093 TBq (29 500 Ci). Con financiación del Canadá, se retiraron y transportaron para el reciclado 27 fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 1 y 2 de Bolivia, el Ecuador, el Paraguay, el Perú y el Uruguay. También se retiraron 3 fuentes radiactivas selladas en desuso de las categorías 1 y 2 del Líbano. En varios Estados Miembros, entre ellos Albania, Burkina Faso, Chipre, Macedonia del Norte, Nepal y Túnez, se ha iniciado la retirada de fuentes de las categorías 1 y 2.

92. La puesta en servicio del Juego de Herramientas Móvil que se utilizará junto con el sistema de disposición final en pozos barrenados concluyó en 2018, y está previsto emplearlo por primera vez en Malasia a comienzos de 2019.

93. Concluyeron las operaciones relacionadas con el acondicionamiento de las fuentes radiactivas selladas en desuso en Chile, Chipre, Eslovenia, Ghana, Honduras, Indonesia, Jordania, Malasia, Sri Lanka y Viet Nam, donde se capacitó adecuadamente al personal local en esa labor. Posteriormente, las instituciones de dos Estados Miembros recibieron la aprobación y licencia de la autoridad nacional competente para realizar operaciones de acondicionamiento, lo que ayudará a otros Estados Miembros de la región en el futuro.

94. En Antigua y Barbuda, Bahamas, Barbados, Belice, Dominica, Guyana y Papua Nueva Guinea se establecieron o actualizaron los inventarios nacionales de las fuentes radiactivas selladas en desuso, así como de las fuentes selladas en uso.

95. El Catálogo Internacional de Fuentes y Dispositivos Radiactivos Sellados está ahora a disposición de un grupo más amplio de usuarios de los Estados Miembros, lo que facilita la identificación de las fuentes radiactivas selladas en desuso que se encuentran sobre el terreno. En 2018 se comenzaron a añadir nuevos detalles sobre las fuentes y los dispositivos.

Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos

96. En febrero de 2018, la filial de EDF Cyclife empezó las actividades para el tratamiento de 1800 toneladas de metal con contaminación radiactiva procedentes de la clausura de las centrales nucleares de Trino, Garigliano y Latina, en Italia, tras un acuerdo firmado con SOGIN en 2017.

97. La central nuclear de Chernóbil está comenzando a procesar desechos radiactivos líquidos, en un importante avance en la limpieza tras el accidente nuclear de 1986, y los explotadores han empezado a transferir buena parte de los desechos nucleares líquidos de la instalación al almacenamiento a largo plazo. La planta de tratamiento de desechos radiactivos líquidos de Chernóbil procesará 22 000 toneladas de agua contaminada por el accidente y por la explotación de los otros tres reactores de la central. Se espera que la planta de tratamiento de aguas residuales, que entró en funcionamiento en enero de 2018, elimine los contaminantes radiactivos del agua a un ritmo de unas 2000 toneladas anuales en los próximos 20 años.

98. En la central nuclear de Kozloduy de Bulgaria comenzó a operar una instalación de fusión por plasma, que facilita el procesamiento de los desechos nucleares en apoyo de las actividades de clausura. Esta tecnología permite tratar los desechos con un riesgo mínimo de contaminación radiactiva. La forma final de los desechos, duradera y exenta de materia orgánica y líquidos, es una escoria vítrea amorfa y químicamente inerte. Además, los desechos radiactivos del pasado acondicionados en una matriz bituminosa o de hormigón pueden volverse a tratar en una instalación de fusión por plasma para producir un bulto de desechos que cumpla con los criterios de aceptación de la instalación de disposición final cerca de la superficie de Kozloduy. Con la tecnología del plasma, la instalación reducirá considerablemente el volumen de los desechos radiactivos de actividad baja e intermedia de los reactores 1 a 4 de Kozloduy, que se pusieron en régimen de parada definitiva entre 2002 y 2006, y de los reactores 5 y 6, que están en explotación. En el plasma, los metales se funden y se oxidan. Los restos de hormigón, la arena, los granulados inorgánicos, el material de aislamiento y el asbesto también se funden.

99. En abril de 2018 se puso en marcha en la central nuclear dañada de Fukushima Daiichi, en el Japón, un proyecto destinado a demostrar el uso de la tecnología de vitrificación de desechos radiactivos, que consta de dos partes principales. En la primera se desarrollarán y estudiarán formulaciones duraderas para las matrices de acondicionamiento de cuerpos de desechos. En los laboratorios de Marcoule de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Francia se realizarán ensayos a escala de laboratorio (100 g), de banco (1 kg) y semiindustrial (100 kg). En la segunda parte del proyecto se efectuarán estudios de viabilidad de los principios de aplicación de procesos, explotación y mantenimiento, y de la disposición final de desechos.

100. En el emplazamiento de Savannah River del Departamento de Energía de los Estados Unidos concluyó la primera transferencia de desechos radiactivos líquidos de un depósito de desechos subterráneo a una instalación de gran volumen, la Unidad de Disposición Final de Saltstone (SDU) 6. Las SDU están diseñadas para contener fraguados de desechos de actividad baja producidos por la solidificación de desechos de sales no peligrosos y descontaminados en el emplazamiento de Carolina del Sur. Los estanques de hormigón cilíndricos se basan en un diseño utilizado comercialmente para el almacenamiento de agua y otros líquidos. La SDU 6, que se terminó de construir el año pasado, es la primera SDU de gran volumen del emplazamiento y supera en más de diez veces el tamaño de las otras SDU allí existentes, con unos 114 metros de diámetro y casi 13 metros de altura. En total, se prevé que siete de esas unidades de gran volumen satisfarán las necesidades de disposición final del emplazamiento.

Disposición final de desechos radiactivos

101. En todo el mundo hay instalaciones de disposición final en funcionamiento para todas las categorías de desechos radiactivos, salvo los 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 (p. ej., en España, Francia y Suecia) o para desechos de actividad baja en zonas áridas (p. ej., en los Estados Unidos de América y Sudáfrica); las estructuras artificiales cerca de la superficie para desechos de actividad baja (p. ej., en China, Eslovaquia, España, la Federación de Rusia, 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 (p. ej., en Alemania, la Federación de Rusia, Finlandia, Hungría, Noruega, la República Checa y la República de Corea).

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

103. 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 las de Noruega.

104. La Empresa Estatal de Desechos Radiactivos de Bulgaria sigue construyendo una instalación de disposición final cerca de la superficie para desechos de actividad baja en el emplazamiento de Radiana, en las proximidades de la central nuclear de Kozloduy.

105. 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.

106. En Finlandia, la empresa de gestión de desechos Posiva está llevando a cabo una prueba del sistema *in situ* a escala real, un requisito para obtener la licencia de explotación del repositorio que se está construyendo en Olkiluoto. La prueba tiene por objeto demostrar el diseño del sistema completo necesario para colocar conjuntos de combustible nuclear, envasados en contenedores de cobre y acero, en huecos de deposición perforados en rocas hospedantes graníticas, en túneles de deposición contruidos especialmente con ese fin. La prueba comprende el relleno de los túneles de deposición con arcilla bentonítica y la instalación del sistema de sellado final con un tapón de hormigón armado. Se utilizarán dos contenedores a escala real, dotados de elementos de calentamiento para simular el calor residual que produciría el combustible gastado.

107. En enero de 2018, las autoridades de Suecia publicaron una normativa que afecta al proceso de concesión de licencias para la instalación sueca de disposición final de combustible gastado propuesta por SKB. La Autoridad Sueca de Seguridad Radiológica apoyó la construcción de la instalación de disposición final en Forsmark, declarando que SKB tenía las capacidades requeridas para la realización segura de la disposición final. El Tribunal de Tierras y Medio Ambiente señaló en su declaración que la solicitud de SKB cumplía en su mayor parte con los requisitos para la aprobación, pero que persistían algunas incertidumbres relacionadas con el comportamiento a largo plazo de los contenedores de cobre, en lo referente a los procesos de corrosión del cobre. SKB está respondiendo a esta solicitud de información adicional.

108. La solución de gestión adoptada en Francia para los desechos radiactivos de actividad alta o intermedia y período largo es la disposición final geológica profunda en la arcilla callovo-oxfordiense. El proyecto Andra Cigéo tiene por objeto aplicar esta decisión de la forma establecida por una ley aprobada en 2006. Andra está concluyendo la fase de diseño detallada y trabaja en optimizaciones de los valores de referencia. Tras una fase de examen técnico del expediente sobre las opciones de seguridad, la Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) de Francia efectuó en 2017 una consulta pública sobre esta opinión preliminar. Una vez analizadas las contribuciones recibidas, la ASN emitió su opinión en enero de 2018; en ella declaró que el proyecto había alcanzado en general una madurez técnica suficiente en la etapa del estudio de las opciones de seguridad. Sin embargo, pidió que en la solicitud de autorización de la construcción que Andra tenía previsto presentar en 2019 o a comienzos de 2020 se proporcionara información adicional sobre la justificación de la arquitectura de la instalación de disposición final, el diseño y tamaño de la estructura para resistir a los peligros naturales, la vigilancia de la instalación, la prevención de posibles incendios de contenedores de desechos basados en el alquitrán y la gestión de las situaciones posteriores a accidentes.

109. En noviembre de 2018, el Consejo Federal Suizo anunció su decisión sobre la Etapa II del Plan Sectorial para los Repositorios Geológicos Profundos. Esto permite a Nagra, la organización suiza encargada de la gestión de los desechos radiactivos, centrar la caracterización más detallada del emplazamiento en las otras tres regiones que podrían seleccionarse, y da inicio, de hecho, a la tercera y última fase, destinada a presentar la solicitud de licencia para una instalación de disposición final geológica en 2024 a más tardar.

110. En diciembre de 2018, el Gobierno del Reino Unido publicó su política sobre el trabajo con las comunidades, como parte de la puesta en marcha de un proceso de selección nacional consensuada del emplazamiento para una instalación de disposición final geológica.

B. Datos atómicos y nucleares

111. Además de los datos mantenidos por el Organismo, varias organizaciones publican bibliotecas de datos nucleares que son esenciales para las actividades de investigación y desarrollo de aplicaciones nucleares, tanto eléctricas como no eléctricas.⁴ Las publicaciones más importantes de 2018 fueron las siguientes:

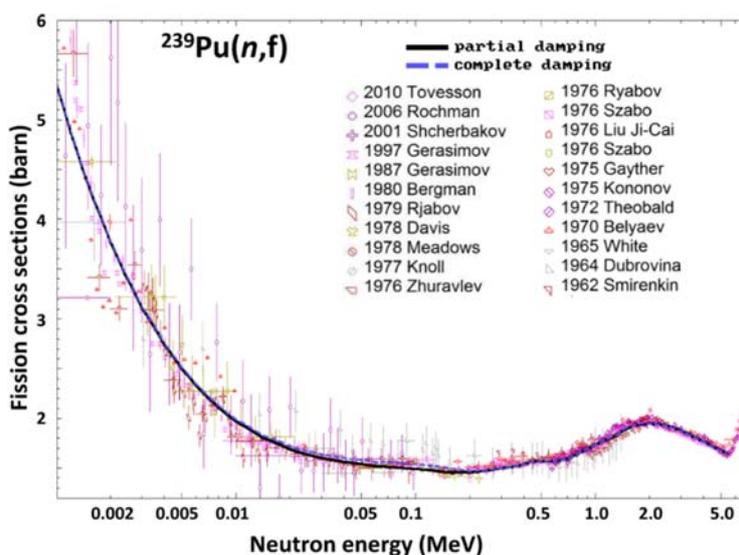
- La biblioteca de datos nucleares ENDF/B-VIII, de los Estados Unidos de América, que contiene grandes cambios en las reacciones de los neutrones con los nucleidos más importantes para las aplicaciones nucleares, en particular los principales isótopos del uranio, el hierro, el oxígeno y el hidrógeno. Se ha dedicado un gran esfuerzo a evaluar las nuevas mediciones de las cantidades relacionadas con la fisión de los actínidos, como el espectro de neutrones de fisión inmediatos y el número medio de neutrones de fisión. La biblioteca ENDF/B-VIII ha sido ampliamente validada, especialmente en lo que atañe a los valores de referencia de la criticidad.
- La biblioteca de datos nucleares JEFF-3.3, publicada por la AEN de la OCDE, que probablemente se utilice sobre todo para los análisis de reactores, los programas informáticos de los reactores, los análisis del ciclo del combustible y la fusión a nivel europeo.
- Un nuevo archivo de datos fotonucleares, JENDL/PD-2016, publicado por el Japón, que proporciona datos sobre las reacciones nucleares causadas por fotones, como la fotoabsorción, la fotofisión, las secciones eficaces de las partículas y los nucleidos residuales producidos, y la sección eficaz doble diferencial de las partículas emitidas. La biblioteca contiene datos sobre 2681 nucleidos, con un intervalo de energías del fotón incidente de 1 MeV a 140 MeV.

⁴ Disponibles en <https://www-nds.iaea.org>.

- JENDL/AD-2017, el archivo de secciones eficaces de activación para la clausura nuclear, también del Japón, que atiende a las necesidades de evaluación del inventario radiactivo durante la clausura de las instalaciones nucleares.
- Una nueva edición de la Biblioteca de Datos Nucleares Evaluados basada en TALYS, TENDL-2017⁵, que sucede a la edición TENDL-2015. La colección contiene archivos completos de datos en formato ENDF-6, que incluyen los datos de covarianza, hasta una energía incidente de 200 MeV, de 2813 isótopos (todos estables o con un período de semidesintegración superior a 1 segundo), para neutrones, fotones, protones, deuterones, tritones, helio 3 y partículas α incidentes.

112. Los datos sobre la espectroscopia de radiación γ con absorción total (TAGS) serían una adición importante a las actuales bibliotecas de datos sobre el decaimiento, ya que podrían afectar a los cálculos del calor de desintegración y de los espectros de antineutrinos. Por lo tanto, es importante revisar el estado actual de la TAGS y examinar las nuevas necesidades de datos. En 2018, el Organismo concluyó una evaluación detallada de los datos del decaimiento de los principales productos de fisión que contribuyen al calor de desintegración en una amplia variedad de sistemas de combustibles, lo que permitió generar cuadros de prioridades actualizados para la espectroscopia de rayos γ de alta resolución y de absorción total; esa evaluación se publicará en 2019.

113. En 2018 se puso en marcha la Red Internacional de Evaluación de Datos Nucleares (INDEN), para estimular los avances en las evaluaciones de la sección eficaz de captura de neutrones de los nucleidos de particular importancia para las tecnologías nucleares (figura B-1). Los expertos en física nuclear coordinarán sus esfuerzos para realizar mediciones innovadoras y simulaciones de modelos a fin de generar los mejores cuadros de datos de reacciones nucleares posibles para nucleidos ligeros como el carbono y el nitrógeno, materiales estructurales como el cromo y el níquel, y actínidos importantes como los isótopos del plutonio. Aparte de las mejoras de los datos nucleares fundamentales, las actualizaciones de las bibliotecas de datos nucleares se validarán directamente con los valores de referencia integrales de la criticidad para las energías de los neutrones térmicos y rápidos. A esta labor, que coordina el Organismo, contribuyen principalmente expertos de China, los Estados Unidos de América, el Japón y países europeos.



⁵ Disponible en https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html.

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

C.1. Aceleradores e instrumentación conexas

C.1.1. Tecnologías novedosas con ingeniería de haces iónicos

114. Gracias a los adelantos más recientes en la tecnología de los aceleradores, es posible crear defectos ópticamente activos, de tamaño atómico, en una vasta clase de materiales, desde semiconductores de amplia banda prohibida (como el diamante, el carburo de silicio o el nitruro de galio) hasta materiales bidimensionales (como el nitruro de boro hexagonal) (figura C-1). Estos sistemas representan una plataforma prometedora en la emisión de fotón único, un campo emergente con aplicaciones en la comunicación segura (intercambio seguro de claves con estados de fotones individuales) y el marcado y la detección celular. Actualmente se están desarrollando varias estrategias de implantación iónica en el marco de un esfuerzo de colaboración internacional apoyado por el Organismo. En el futuro próximo, cabe prever innovaciones rompedoras tanto en la comunicación cuántica segura como en la biotecnología.

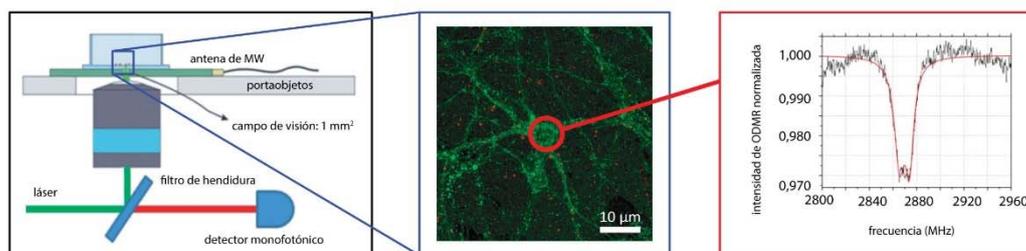


Fig. C-1. Aplicación de haces iónicos para la creación de nanodiamantes luminiscentes en el interior de neuronas vivas en un medio de cultivo: (izquierda) esquema de la configuración experimental para la adquisición de imágenes y señales; (centro) mapa de microscopía confocal que muestra los nanodiamantes luminiscentes dentro de las neuronas; (derecha) resonancia magnética detectada ópticamente (ODMR) de los nanodiamantes. (Cortesía de Paolo Olivero, Universidad de Turín, Instituto Nacional de Física Nuclear de Italia e Instituto Nacional de Investigación Metrológica de Italia)

C.1.2. Simulación de daños en los materiales de los reactores con aceleradores

115. Debidamente seleccionados y sintonizados, los haces iónicos pueden modelizar experimentalmente el daño causado a los materiales por los neutrones térmicos y rápidos presentes en los reactores de fisión o de fusión. Puesto que aún no existe ninguna fuente específica de neutrones de fusión con un flujo suficientemente alto para simular condiciones de irradiación semejantes a las que experimenta la primera pared de un reactor de fusión, los estudios de caracterización microestructural detallada utilizan aceleradores de haces iónicos para reproducir, en lo posible, los cambios microestructurales y la composición de los materiales. Por ejemplo, es posible acoplar de uno a tres aceleradores electrostáticos con una diferencia de potencial comprendida entre algunos centenares de kV y unos cuantos MV para obtener una configuración de haz único, doble o triple con el fin de crear daños balísticos y simultáneamente implantar los elementos de transmutación pertinentes, como el helio y el hidrógeno, que son los principales productos de las reacciones causadas por los neutrones en los materiales estructurales.

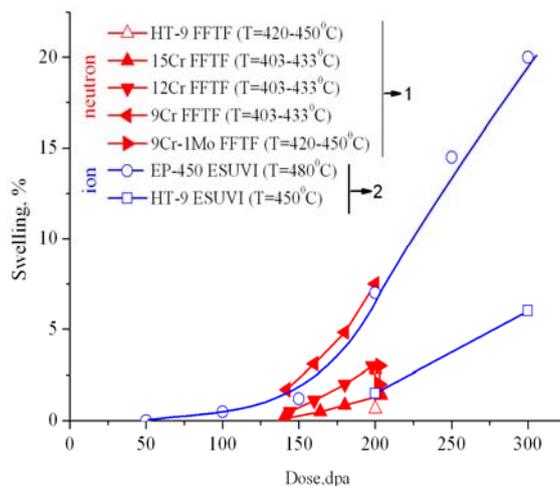


Fig. C-2. Comparación de la expansión de los materiales causada por neutrones rápidos (en rojo) y por irradiación con haces iónicos (en azul), representada como una función de diferentes dosis de daños (dpa: desplazamientos por átomo). (Cortesía de V. Voyevodin, Instituto de Física y Tecnología de Jarkov)

116. Sin embargo, para poder validar plenamente este método, se requerirá un esfuerzo internacional coordinado, consistente en un ejercicio normalizado que permita determinar la reproducibilidad de los resultados en diferentes emplazamientos, definir las mejores prácticas para los aceleradores y entender en qué medida será posible utilizar la irradiación con haces iónicos para el examen rápido de los materiales estructurales nucleares en el futuro. En este contexto, el Organismo coordina un experimento de irradiación con laboratorios de todo el mundo⁶ para comparar las microestructuras de daños producidas en el acero T91 por distintos aceleradores de haces iónicos, así como por los aceleradores de haces iónicos y una irradiación del mismo material en el reactor de investigación rápido BOR-60 de la Federación de Rusia.

C.1.3. Monitorización de la contaminación del aire a gran escala con técnicas analíticas nucleares

117. La contaminación atmosférica es un problema mundial que puede afectar al medio ambiente y a la salud humana, y la gestión de la calidad del aire desempeña un papel importante en la reducción de los niveles de las emisiones. Sin embargo, faltan datos para poder determinar las fuentes de contaminación que afectan a la población de las grandes ciudades, y aclarar las trayectorias de su transporte transfronterizo. Para desarrollar mejores estrategias y herramientas de mitigación, los Estados Miembros, con apoyo del Organismo, están empleando técnicas analíticas nucleares y otros métodos complementarios con vistas a determinar la composición elemental de las partículas transportadas por el aire (figura C-3). Esta información permite identificar las principales fuentes de contaminación (la distribución de fuentes) y su contribución específica a la contaminación observada (el inventario). Varias técnicas ofrecen las ventajas de que permiten un análisis multielemental, no son destructivas (lo que preserva las muestras para análisis ulteriores) y posibilitan la obtención rápida de información sobre alrededor de veinte elementos químicos de interés para la identificación de las fuentes. De estas técnicas, las más utilizadas son el análisis con haces iónicos, la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) y el análisis por activación neutrónica.

⁶ Basado en el anterior proyecto coordinado de investigación del OIEA titulado "Simulación en Aceleradores y Modelización Teórica de los Efectos de la Radiación en Materiales Estructurales", cuyos resultados se publicaron en 2018.

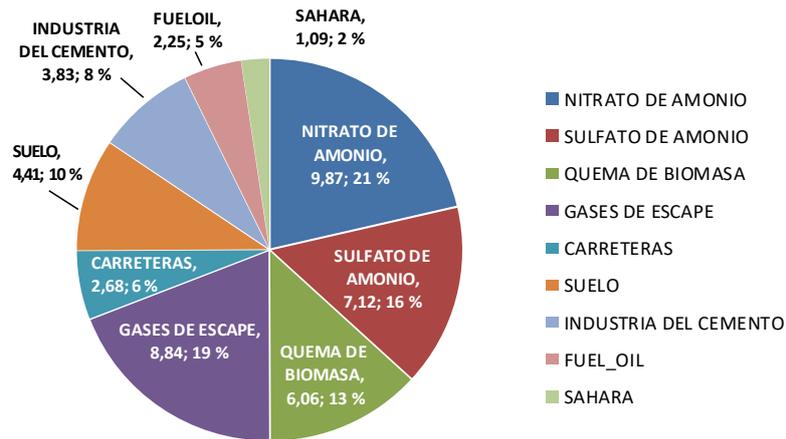


Fig. C-3. Ejemplo de la contribución relativa de las fuentes de contaminación (inventario), obtenida mediante el análisis elemental de muestras con diversas técnicas nucleares. (Fuente: OIEA)

118. El mayor interés por este tema y la importancia que ha adquirido se reflejaron también en el ejercicio de pruebas de competencia organizado por el Organismo con muestras de polvo urbano en filtros de aire, en que más de 40 laboratorios analíticos de 33 Estados Miembros participaron y presentaron sus resultados como parte de sus procedimientos de control y garantía de la calidad.

C.1.4. Mediciones sobre el terreno para la caracterización de la contaminación superficial

119. La extracción y el tratamiento del uranio son una industria intensiva que ha dejado en muchos países un legado de emplazamientos afectados por radiaciones, que en su momento fueron sometidos a un control reglamentario no acorde con las normas internacionales actuales. La explotación de otros recursos minerales, como el petróleo, también condujo a una acumulación importante de materiales radiactivos naturales. Otros lugares han sido contaminados por accidentes nucleares y/o radiológicos, así como por los ensayos de armas nucleares. Por ejemplo, los repositorios de colas por sí solos representan más de 50 emplazamientos, y tan solo en la región de Asia Central el volumen de las colas y los estériles supera los 800 millones de toneladas. Estos lugares podrían, en principio, conducir a la exposición del público a la radiación ionizante, con efectos negativos en la salud.

120. La instrumentación portátil más moderna, el libre acceso a los sistemas de información geográfica y el desarrollo de herramientas de modelización geoestadística ofrecen múltiples opciones para realizar estudios *in situ* de una variedad de escenarios y compartimentos ambientales. Las técnicas *in situ* han alcanzado un alto nivel de rendimiento analítico y las numerosas ventajas que ofrecen con respecto a otras técnicas más convencionales comprenden la determinación rápida de las concentraciones/actividades de los contaminantes, la detección de los lugares críticos, la reducción del costo de las investigaciones y la determinación rápida de la distribución espacial de los contaminantes. Las mediciones *in situ* pueden también mejorar las estrategias de muestreo para los análisis de laboratorio de gran exactitud, si es necesario.

121. A petición de los Estados Miembros, las actividades del Organismo en 2018 en esta esfera incluyeron: una demostración sobre el terreno de la cartografía radiológica en apoyo de la liberación del emplazamiento del Complejo de Radiación y Tecnología FOTON en Uzbekistán, tras la disposición final de los desechos radiactivos; una demostración de las capacidades de los sistemas de cartografía radiológica con drones para las mediciones en los emplazamientos en caso de emergencia nuclear en el Brasil; y el apoyo a un curso nacional de capacitación sobre mediciones, técnicas *in situ* y metodologías radiológicas en México (figura C-4).

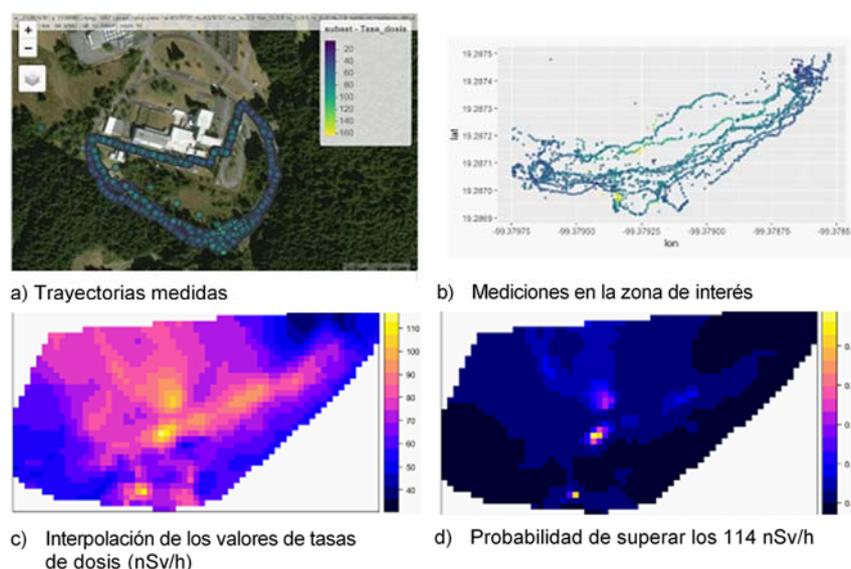


Fig. C-4. Ejemplo de los resultados de un ejercicio de medición sobre el terreno realizado como parte de un curso nacional de capacitación en el marco del proyecto de cooperación técnica MEX7011.

Las trayectorias medidas se representan en mapas, que incluyen la interpolación de las tasas de dosis para toda la zona estudiada y estimaciones de la probabilidad de que se supere un determinado nivel. (Fuente: OIEA)

C.2. Reactores de investigación

122. 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 200 MW(t) aproximadamente. 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.

Cuadro C-1. Aplicaciones comunes de los reactores de investigación en el mundo⁷.

Tipo de aplicación ^a	Número de reactores de investigación ^b	Número de Estados Miembros que tienen estas instalaciones
Enseñanza/capacitación	163	53
Análisis por activación neutrónica	119	53
Producción de radioisótopos	84	44
Radiografía neutrónica	72	40
Irradiación de materiales/combustible	68	29
Dispersión neutrónica	47	31
Geocronología	25	22
Transmutación (dopado del silicio)	23	20
Transmutación (gemas)	19	15
Terapia neutrónica, principalmente I+D	14	12
Otras ^c	119	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 239 reactores de investigación examinados (226 en funcionamiento y 13 en régimen de parada temporal al 31 de diciembre de 2018).

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

⁷ Según la Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo: <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.

123. Según la Base de Datos de Reactores de Investigación del Organismo, se han construido 841 reactores de investigación en 67 países, y 252 de ellos, en 55 países, están en explotación. La Federación de Rusia tiene el mayor número de reactores de investigación operativos (59), seguida de los Estados Unidos de América (50), China (17) y el Japón (9). En el mundo hay 66 reactores de investigación que funcionan a niveles de potencia de 5 MW o más y que por lo tanto ofrecen flujos neutrónicos altos para productos y servicios de gran capacidad.

124. Los reactores de investigación son indispensables para producir los radioisótopos que se utilizan en la medicina y la industria y los haces de neutrones empleados en el estudio de los materiales y los ensayos no destructivos, así como para los servicios analíticos y de irradiación de los sectores privado y público y los servicios de estudio del medio ambiente y del patrimonio cultural. El Organismo alienta a los explotadores de reactores de investigación a que elaboren planes estratégicos para el uso de sus instalaciones, o actualicen los ya existentes. En los últimos tres años, 38 instalaciones han presentado sus planes estratégicos al Organismo para obtener más asesoramiento sobre el uso eficiente y sostenible.

125. La mitad de los reactores de investigación en funcionamiento tienen más de 40 años de antigüedad. Su ciclo de vida útil puede superar los 60 años, pero para ello es de la máxima importancia que se inicien a tiempo programas adecuados de gestión del envejecimiento, renovación y modernización. En vista de la tendencia general a la reducción de la financiación para estas instalaciones y de la escasa planificación de la sucesión, la aplicación de buenos sistemas de gestión y de programas de explotación, mantenimiento y gestión de la vida útil adecuados será fundamental para que estos reactores puedan cumplir sus misiones de manera rentable. Teniendo presente este hecho, se han realizado misiones de Evaluación de la Explotación y el Mantenimiento de Reactores de Investigación basadas en el examen por homólogos en Bangladesh, Portugal, la República Democrática del Congo y Uzbekistán. Se prevé que en varios de los 56 reactores de investigación que están en régimen de parada definitiva en 22 Estados Miembros comenzará la preparación para la clausura en el futuro próximo. En junio de 2018, los propietarios del reactor de agua en ebullición de Halden, en Noruega, pusieron el reactor en régimen de parada definitiva, lo que eliminó una importante instalación de ensayo para el estudio de los materiales y el combustible. En marzo fue parado definitivamente también el Reactor NRU del Canadá, un importante productor de radioisótopos de uso médico, tras 61 años de funcionamiento.

126. Se están construyendo reactores de investigación nuevos en la Arabia Saudita, la Argentina, la Federación de Rusia, Francia, la India, la República de Corea y Ucrania. Varios Estados Miembros tienen planes oficiales para la construcción de reactores de investigación nuevos, entre ellos Belarús, Bélgica, Bolivia, los Estados Unidos de América, Nigeria, los Países Bajos, Tailandia, Tayikistán (terminación del reactor Argus-FTI), Viet Nam y Zambia. Otros, como Azerbaiyán, Bangladesh, Etiopía, Filipinas, Ghana, Kenya, Malasia, Mongolia, Myanmar, el Níger, la República Unida de Tanzania, el Senegal, Sudáfrica, el Sudán y Túnez, están considerando la posibilidad de construir nuevas instalaciones. Las dos primeras misiones de Examen Integrado de la Infraestructura Nuclear para Reactores de Investigación (INIR-RR) del Organismo, basadas en el examen por homólogos y destinadas a ofrecer apoyo y orientación a Estados Miembros que estén iniciando un nuevo proyecto relativo a un reactor de investigación, tuvieron lugar en Nigeria y Viet Nam. Zambia acogió una misión preparatoria INIR-RR. En septiembre de 2018 entró en funcionamiento un reactor de investigación de tipo piscina de 2 MW, construido en el emplazamiento de Trombay norte, en el Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas de la India.

127. Los Estados Miembros que tienen previsto aumentar o mantener la capacidad nuclear nacional para sus programas de ciencia y tecnología, incluida la energía nucleoelectrónica, siguieron manifestando interés en tener acceso a reactores de investigación. Por lo tanto, en 2018 el Organismo consolidó y amplió sus instrumentos y herramientas, que comprenden el Reactor-Laboratorio por Internet, una herramienta de capacitación a distancia utilizada principalmente para la enseñanza académica (en 2018 continuó la transmisión de sesiones para las regiones de África, Europa, y América Latina y el

Caribe); los Cursos Regionales con Reactores de Investigación (RRRS), para la capacitación básica; la Iniciativa sobre Reactores de Investigación de Europa Oriental (EERRI) para la capacitación práctica avanzada, destinada principalmente a profesionales jóvenes; y la iniciativa de los centros internacionales designados por el OIEA (ICERR) para capacitación específica avanzada, destinada a profesionales jóvenes y profesionales experimentados y que actualmente se está implementando en seis instalaciones de Bélgica, la Federación de Rusia, Francia y los Estados Unidos de América.

128. El Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Nucleares de Francia puso en marcha una nueva plataforma multimodal, “Enhanced Virtual Open Core”, para impartir enseñanza y capacitación sobre la física y el funcionamiento de los reactores.

129. La gestión y el almacenamiento seguros, fiables y económicos del combustible nuclear gastado de los reactores de investigación representa un reto para una serie de Estados Miembros, al igual que la determinación de opciones viables para la parte final del ciclo del combustible, que deben respetar los requisitos y limitaciones referentes a la no proliferación, la política nacional, la economía y el medio ambiente, además de las cuestiones técnicas. Muchos países que poseen uno o varios reactores de investigación pero no un programa nucleoelectrico, o solo uno pequeño, tienen el problema de la disposición final definitiva de cantidades relativamente bajas de combustible nuclear gastado y pueden verse obligados a adoptar una decisión sobre el futuro de sus reactores de investigación teniendo en cuenta la duración limitada de los programas internacionales de devolución del combustible gastado de esos reactores. Se está llevando a cabo un esfuerzo colectivo, coordinado por el Organismo, para elaborar modelos de apoyo a la adopción de decisiones que ayuden a los Estados Miembros a seleccionar la opción más viable en sus circunstancias.

130. Hasta el momento, 99 reactores de investigación y 4 instalaciones de producción de isótopos de uso médico han sido convertidos al uso de UPE, en lugar de uranio muy enriquecido (UME), o puestos en régimen de parada confirmada. En noviembre de 2018 se convirtió al uso de UPE un reactor miniatura fuente de neutrones (MNSR) de Nigeria, y el combustible de UME irradiado fue devuelto a China en diciembre. El programa de devolución del combustible de UME a los Estados Unidos de América había, hasta ese momento, retirado o sometido a disposición final confirmada más de 4415 kg de combustible de UME nuevo e irradiado, y el programa de devolución del combustible de origen ruso había terminado la retirada de unos 2280 kg.

131. En enero de 2018, Curium, uno de los principales proveedores de soluciones de medicina nuclear, ultimó la conversión de toda su fabricación de blancos al uso de UPE, con lo cual alrededor del 75 % del molibdeno 99 que se vende actualmente en el mundo se produce sin el uso de UME. Las breves interrupciones del servicio registradas en 2018 en algunos procesadores e instalaciones mundiales que producen molibdeno 99 por irradiación de blancos dieron lugar a cierta escasez regional de suministros. Los esfuerzos de los órganos de gestión de la cadena de suministro y de los principales productores internacionales, así como las eficaces medidas de mitigación de los profesionales sanitarios, compensaron en parte las fluctuaciones de la producción. En 2018, NorthStar Medical Radioisotopes, en los Estados Unidos de América, comenzó a producir molibdeno 99 con blancos sin UME.

132. En octubre de 2018, el Gobierno Federal de Bélgica decidió realizar una importante contribución financiera (para 2019-2020) para el desarrollo de una tecnología basada en aceleradores innovadora a fin de producir molibdeno 99 sin utilizar UME. El Gobierno decidió asimismo, en septiembre de 2018, prestar apoyo para el desarrollo del Reactor de Investigación Híbrido de Fines Múltiples para Aplicaciones de Alta Tecnología (MYRRHA) realizando una cuantiosa inversión a gran escala (durante el período comprendido entre 2019 y 2037). MYRRHA es un sistema accionado por un acelerador que se utilizará principalmente para investigar la transmutación, desarrollar la próxima generación de radioisótopos médicos y estudiar materiales avanzados.

C.2.1. Nuevas tecnologías de los moderadores para la producción de neutrones fríos

133. Los moderadores fríos proporcionan neutrones de muy baja energía utilizando materiales cuidadosamente seleccionados a temperaturas criogénicas. Esos neutrones son particularmente útiles para los estudios de ciencia de los materiales. Los diseños innovadores para producir haces de neutrones fríos comprenden el desarrollo de moderadores sólidos en forma de pastillas, como el que se utiliza en el reactor de investigación pulsante IBR-2 del JINR en Dubna. En los moderadores fríos sólidos, que por lo general están hechos de metano, la radiólisis del metano genera gas de hidrógeno y la expansión resultante puede dañar la vasija del moderador. En cambio, las pequeñas pastillas del sistema JINR de Dubna (figura C-5) están fabricadas con hidrocarburos más resistentes a la radiación, y se inyectan continuamente en la vasija del moderador y se retiran con facilidad al término de su vida útil, lo que reduce las posibilidades de daños. Este enfoque innovador se está aplicando tanto a las fuentes de neutrones basadas en reactores de investigación como a las accionadas por aceleradores. Además, un proyecto coordinado de investigación del Organismo que concluyó en 2018 dio varios otros resultados importantes con respecto a los diseños innovadores, el desarrollo de prototipos y el ensayo a escala real de esos moderadores avanzados.

134. La otra novedad principal ha sido el desarrollo de moderadores fríos líquidos. Para ello fue necesario aislar un ‘estado de espín’ en el hidrógeno líquido con ayuda de un catalizador (el parahidrógeno). En estos diseños, los neutrones fríos útiles pueden recorrer distancias bastante largas sin nuevas interacciones, lo que permite construir moderadores fríos de baja dimensionalidad (alargados o planos) en torno a los cuales es posible disponer los instrumentos de dispersión de neutrones de manera más eficaz.

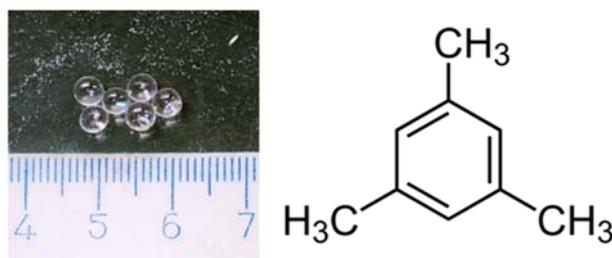


Fig. C-5. Imagen de las pastillas fabricadas en el JINR de Dubna y utilizadas para moderar los neutrones rápidos (izquierda) y representación esquemática de su estructura molecular. (Cortesía del JINR de Dubna)

D. Tecnologías de la radiación

D.1. Tomografía por rayos cósmicos: una sonda procedente de las estrellas

135. La radiografía muónica es una técnica emergente que utiliza los muones de los rayos cósmicos presentes en la radiación natural de fondo. Los muones derivados de la radiación cósmica que llega a la Tierra se crean cuando los rayos cósmicos primarios de alta energía interactúan con la atmósfera terrestre, produciendo muones muy energéticos. Los muones tienen propiedades parecidas a las de los electrones, pero una masa mucho mayor. Los muones cósmicos son unas 10 000 veces más energéticos que los rayos X típicos, y liberan energía principalmente por ionización. Estos muones pueden penetrar estructuras muy grandes. Tienen carga eléctrica y dejan rastros de ionización al perder energía en su recorrido a través de la materia. Esto permite detectarlos en detectores de centelleo y ionización y medir sus trazas.

136. La principal ventaja de esta técnica, basada en la dispersión o absorción de los muones, es que permite detectar las variaciones de densidad de materiales de alto número atómico en un volumen cerrado (incluso si están empotrados) en su forma intacta y sin utilizar ninguna fuente radiactiva. La radiografía muónica requiere por lo menos dos planos de detección que permitan definir las trazas de los muones cósmicos detectados y a menudo se emplean tres o cuatro planos de detección para mejorar la resolución y la eficiencia. Pueden obtenerse imágenes de objetos pequeños reconstruyendo las trayectorias de los muones antes y después de la interacción con el objeto, mientras que, en el caso de objetivos grandes, se obtiene una imagen en dos dimensiones comparando el flujo con una medición de control. Los resultados de la radiografía muónica no se limitan necesariamente a las imágenes en dos dimensiones; es posible combinar la información procedente de varios detectores enfocados al mismo volumen para formar una imagen en 3D mediante la rotación del blanco o de los detectores a su alrededor.

137. En distintas partes del mundo se están estudiando diversas posibilidades de aplicación, como la medición del espesor del magma de un volcán a 1 km de profundidad, la detección de cavidades insospechadas en una pirámide de Egipto⁸ y el estudio de estructuras subterráneas en Nápoles (Italia)⁹. Estos resultados indican que los muones pueden constituir una herramienta nueva para el estudio de estructuras civiles tales como edificios, puentes y túneles. El número de publicaciones sobre este tema ha aumentado considerablemente en los últimos años.

D.1.1. Aplicaciones

138. Los ámbitos de aplicación de esta técnica de imagenología siguen aumentando e incluyen las ciencias de la Tierra, la seguridad nuclear tecnológica y física, la ingeniería civil y la arqueología. En estos campos, pueden encontrarse aplicaciones que combinan el blindaje, la resolución y las escalas temporales para las que la tomografía muónica es un método de adquisición de imágenes adecuado. La figura D-1 muestra varias de las distintas aplicaciones.

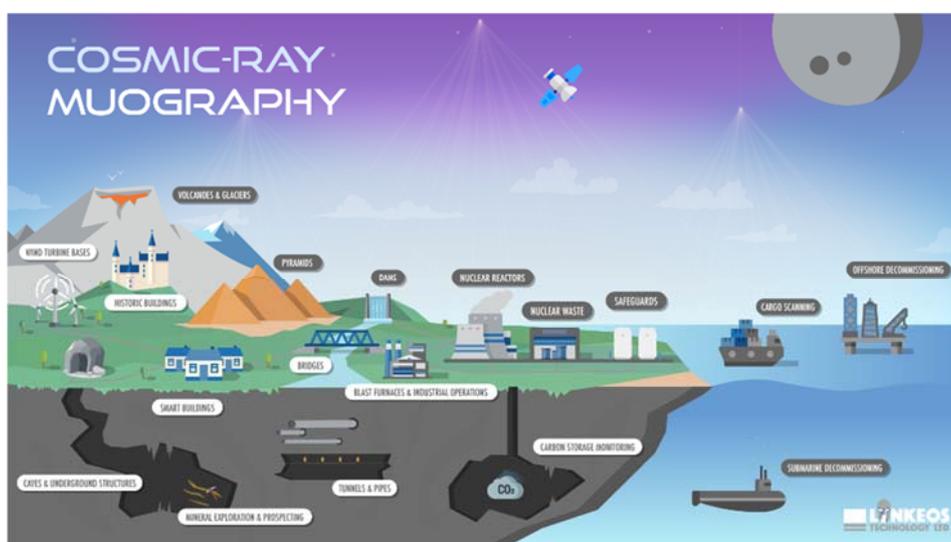
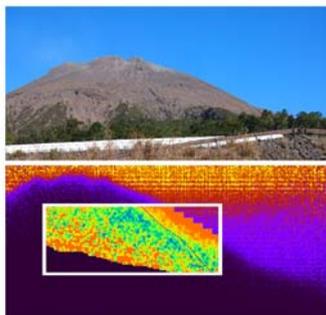


Fig. D-1. Infografía esquemática de las diversas aplicaciones de la tomografía muónica.
(Fuente: Lynkeos Technology Ltd., Reino Unido)

⁸ Morishima, K. et al., Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature 552, 386-390 (2017).

⁹ Saracino, G. et al., Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), Scientific Reports 7:1181 (2017).

139. La aplicación más típica en las geociencias es la adquisición de imágenes del interior de los volcanes. Este método ha sido utilizado por vulcanólogos en Francia, Italia y el Japón, entre otros lugares.^{10, 11, 12} El uso de esta técnica permite predecir las erupciones volcánicas y de ese modo prepararse con antelación y reducir al mínimo los efectos de los desastres naturales. La fig. D-2 muestra la primera imagen muográfica de alta definición del volcán Sakurajima del Japón.



*Fig. D-2. Imagenología de un volcán en erupción. La imagen del recuadro inferior muestra el interior del volcán con una resolución de 10 m × 10 m.
(Fotografía: Oláh et al.⁹, Universidad de Tokio, Japón)*

140. El desarrollo de sistemas de tomografía muónica para aplicaciones industriales es actualmente un reto para los científicos. El equipo industrial, como los altos hornos y los hornos giratorios, puede sufrir un desgaste interno que no es fácil de medir con las técnicas disponibles actualmente. Estos tipos de instalaciones son suficientemente grandes para la transmisión y la dispersión de imágenes, y ambas pueden utilizarse para cuantificar el desgaste. Por lo tanto, la tomografía muónica puede ser de ayuda en el proceso de diagnóstico, y aumentar la eficiencia de los procesos productivos mediante el ahorro de energía y de costos. Otras aplicaciones de ingeniería civil son la monitorización de edificios históricos, de grandes estructuras como los puentes y las turbinas eólicas y, posiblemente, también de las estructuras de las plataformas petroleras. Tras el reciente desastre del puente de Génova (Italia), es posible que el desarrollo de las aplicaciones de ingeniería civil sea ahora más rápido.

141. La seguridad nuclear tecnológica y física ofrece otras aplicaciones importantes de la radiografía muónica. El hecho de que los materiales y desechos radiactivos se almacenen en contenedores blindados diseñados para no dejar pasar la radiación hace también que no sea posible obtener imágenes de su contenido con esa radiación. La capacidad de la radiografía muónica de distinguir entre el combustible nuclear y otros metales es crucial para las aplicaciones en la seguridad física nuclear, particularmente para la inspección de cargamentos con fines de seguridad nacional,¹³ pero también para aplicaciones relacionadas con las salvaguardias, como la monitorización de cofres de almacenamiento en seco y la caracterización de antiguos desechos radiactivos con geometrías complejas.^{14, 15}

¹⁰ D'Alessandro, R., Volcanoes in Italy and the role of muon radiography, Phil. Trans. R. Soc., volumen 377, número 2137, enero de 2019.

¹¹ Oláh, L., Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt. Sakurajima, Phil. Trans. R. Soc., volumen 377, número 2137, enero de 2019.

¹² Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Ohminato, T., and Varga, D., High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, Scientific Reports 8 3207 (2018) 1-13.

¹³ Durham, J. M., et al., Verification of Spent Nuclear Fuel in Sealed Dry Storage Casks via Measurements of Cosmic-Ray Muon Scattering, Phys. Rev. Applied 9 044013 (2018).

¹⁴ Morris, C. L., et al., Application of muon tomography to fuel cask monitoring, Phil. Trans. R. Soc., volumen 377, número 2137, enero de 2019.

¹⁵ Yang, G., et al., Novel muon imaging techniques, Phil. Trans. R. Soc., volumen 377, número 2137, enero de 2019.

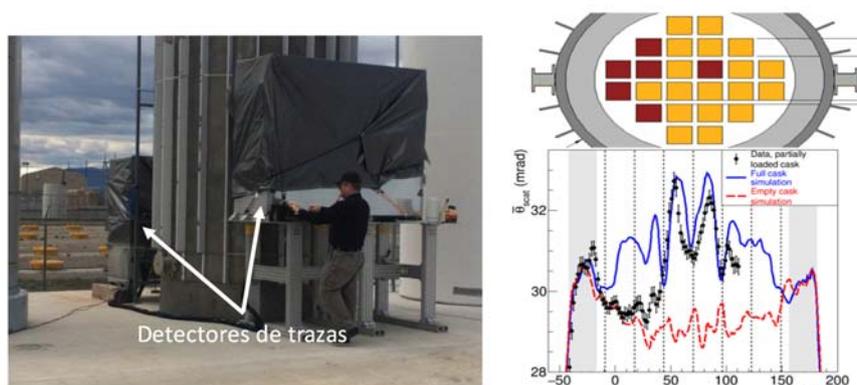


Fig. D-3. Detectores de trazas de muones situados a ambos lados de un cofre de almacenamiento MC-1 parcialmente cargado (izquierda). Diagrama que muestra la ubicación de las haces de combustible ausentes (rojo) y presentes (amarillo) (derecha, arriba).

Señal experimental (negra), comparada con las previsiones del método de Monte Carlo para un cofre completamente cargado (azul) y vacío (rojo) (derecha, abajo).

(Fotografía: Christopher Morris, Laboratorio Nacional de Los Álamos, Estados Unidos de América)

142. La búsqueda de materiales nucleares especiales dentro de los contenedores de carga fue tal vez una de las primeras aplicaciones posibles de la tomografía muónica. Otras aplicaciones clave en el ámbito de la seguridad tecnológica nuclear son la obtención de imágenes del interior de los contenedores de desechos nucleares y la garantía de la calidad en los procesos de tratamiento de desechos nucleares.¹⁶ Recientemente se instaló un sistema de demostración en el emplazamiento de Sellafield del Reino Unido. Por último, los muones cósmicos permiten también obtener imágenes de los propios reactores nucleares. En el Japón, un grupo de investigadores ha trabajado en la obtención de imágenes del corio en los reactores de Fukushima Daiichi, con ayuda de simulaciones que indican que debería ser posible lograrlo.¹⁷

143. Se prevé que la radiografía muónica encontrará su lugar entre las otras tecnologías de obtención de imágenes, especialmente por sus ventajas peculiares: el hecho de que no produce dosis de radiación que superen el fondo natural; la capacidad de penetrar objetos gruesos; y la capacidad de medir tanto la densidad como el número atómico. La principal desventaja de la técnica es el largo tiempo de exposición necesario en muchas de las aplicaciones.

E. Salud humana

E.1. Servicios de calibración para la mamografía por rayos X moderna

E.1.1. Antecedentes

144. La mamografía es una técnica de imagenología que utiliza bajas dosis de rayos X para detectar y diagnosticar el cáncer de mama. Se emplea en programas de cribado de la población para detectar ese cáncer en sus etapas iniciales, y por lo tanto expone a la radiación a un gran número de mujeres. Es

¹⁶ Mahon, D., et al., First-of-a-Kind Muography for Nuclear Waste Characterisation, Phil. Trans. R. Soc., volumen 377, número 2137, enero de 2019.

¹⁷ Miyadera, H., et al., Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons, AIP Advances 3 052133 (2013).

importante que la dosis de radiación utilizada en el examen se mida exactamente, a fin de optimizar el riesgo y el beneficio. La Organización Mundial de la Salud ha definido la garantía de calidad como un criterio fundamental para la correcta realización de las mamografías. Mediante la garantía de calidad se modifica tanto la dosis de radiación como la calidad (el espectro de radiación) del sistema mamográfico, para obtener una mejor calidad de la imagen manteniendo la dosis de radiación en el nivel más bajo posible.

145. La dosimetría exacta es importante en este proceso de optimización. El equipo de dosimetría que se utiliza para esas mediciones debe calibrarse en un laboratorio de calibración reconocido. La calibración ha de basarse en el Sistema Internacional de Unidades, para que las dosis medidas en diferentes instituciones puedan remitirse a un único patrón internacional y sean fácilmente comparables. De esto se encarga normalmente un laboratorio secundario de calibración dosimétrica (LSCD), que efectúa calibraciones certificadas para los hospitales.

E.1.2. Calidades del haz de radiación

146. Antes, se utilizaban tubos de rayos X con ánodo y filtros de molibdeno para las mamografías de película y pantalla. Esta calidad del haz de radiación ha servido de patrón para la dosimetría clínica y las calibraciones. Las unidades de mamografía modernas emplean una gama más amplia de calidades del haz de radiación, obtenida mediante diferentes combinaciones de ánodos y filtros y selecciones del voltaje del tubo. Los sistemas mamográficos digitales suelen utilizar tubos de rayos X con ánodo de tungsteno. En la clínica, esto permite conseguir una imagen de mejor calidad con una dosis más baja para el paciente.

147. Las calidades del haz de radiación utilizadas en los LSCD están normalizadas y actualmente se basan en combinaciones de ánodos/filtros de molibdeno. La dificultad radica en abarcar toda la gama de calidades del haz de radiación utilizadas en la clínica, para obtener mediciones exactas en todas las situaciones clínicas. Los tubos de rayos X con ánodo de molibdeno son necesarios solo para las calibraciones de las mamografías; para otro tipo de imagenología radiológica de diagnóstico y las calibraciones correspondientes se emplea normalmente un ánodo de tungsteno. Esto puede generar dificultades económicas para los LSCD que tienen que adquirir un sistema de rayos X con ánodo de molibdeno solo para calibrar las unidades de mamografía.

E.1.3. Dosímetros

148. Hasta no hace mucho, solo se empleaban cámaras de ionización para la dosimetría médica. Normalmente, la respuesta de estas cámaras no depende de forma marcada de la energía del haz incidente. Por consiguiente, las cámaras pueden utilizarse para hacer mediciones con una amplia gama de calidades del haz de radiación (energías) diferentes. La capa de hemirreducción es un criterio sustitutivo para especificar la calidad del haz de radiación. Por lo tanto, es posible definir los coeficientes de calibración de las cámaras de ionización para algunas calidades del haz, y obtener los demás coeficientes por interpolación entre los diferentes valores de la capa de hemirreducción. De este modo puede realizarse una dosimetría exacta para toda la gama de calidades del haz de radiación de las unidades de mamografía disponibles en los hospitales.

149. Recientemente ha aumentado el uso clínico de los dosímetros basados en semiconductores, que están sustituyendo gradualmente a las cámaras de ionización. Estos dosímetros son más compactos y fáciles de manejar y pueden emplearse también para medir varias otras cantidades (como la capa de hemirreducción y el voltaje del tubo) con una sola exposición. Sin embargo, la respuesta de estos dosímetros tiene una mayor dependencia intrínseca de la energía que la de las cámaras de ionización. Por lo tanto, los fabricantes han desarrollado múltiples métodos de compensación interna basados en las calidades del haz de radiación para contrarrestar este efecto. Sin embargo, muchos usuarios no entienden del todo cómo se efectúan esas correcciones, y eso dificulta la dosimetría y la calibración de los dosímetros utilizados en la mamografía.

E.1.4. Calibraciones

150. El equipo de dosimetría debe ser calibrado periódicamente en un LSCD. En un procedimiento de calibración, la respuesta del dosímetro se compara con los patrones de referencia nacionales certificados y de ese modo se determina un coeficiente de calibración para el dosímetro. Normalmente, los LSCD no pueden ofrecer calibraciones para el gran número de calidades del haz de radiación que se utilizan en la clínica.

151. En la calibración con cámaras de ionización, la variación de la calidad del haz no es un problema, debido a que la medida en que la respuesta depende de la energía es insignificante. Pero con los dosímetros de semiconductor la situación es diferente, porque la dependencia de la energía es más marcada.

E.1.5. Otras novedades

152. El Laboratorio de Dosimetría (DOL) del Organismo ofrece a los miembros de la red OIEA/OMS de LSCD acceso a todo el abanico de calidades del haz de radiación que pueden requerirse para la dosimetría de las mamografías. En el DOL se han calibrado varios tipos de dosímetro. Los resultados de las calibraciones realizadas en este laboratorio (figura E-1) indican que algunos tipos nuevos de dosímetro de semiconductor compensan muy bien las variaciones (corrigen el valor indicado) de la calidad del haz de radiación. Esto significa que podrían utilizarse para las mediciones con la gran variedad de calidades del haz que se emplean en la clínica.

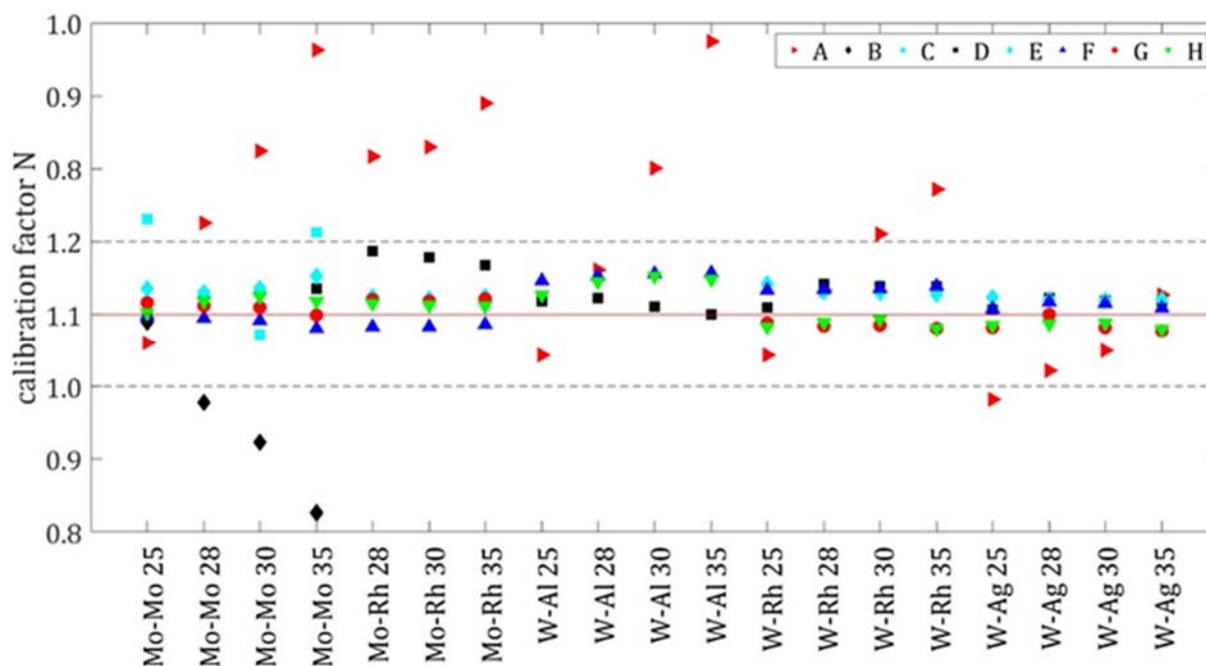


Fig. E-1. Factor de calibración N (mGy/mGy) medido en el Laboratorio de Dosimetría del Organismo para ocho dosímetros de semiconductor (A-H) como función de la calidad del haz de radiación.

153. Sin embargo, los LSCD de los Estados Miembros no disponen necesariamente de todas esas calidades del haz de radiación para la calibración de los dosímetros empleados en la mamografía. Por consiguiente, se alienta a los fabricantes de semiconductores a que desarrollen un método normalizado que pueda utilizarse para la calibración de sus dosímetros en condiciones estándar.

154. El uso de aparatos de ánodo/filtros de molibdeno para producir un conjunto normalizado de calidades del haz de radiación para la calibración de los dosímetros utilizados en la mamografía no representa la tendencia clínica actual. Por lo tanto, deberían desarrollarse nuevas calidades del haz de radiación normalizadas que se basen en aparatos con ánodo de tungsteno. Los dosímetros de semiconductor deberían incluir un modo de calibración en que puedan utilizarse estas calidades del haz de radiación normalizadas de una manera que permita verificar y confirmar el comportamiento del dosímetro con todas las calidades del haz de radiación empleadas en la clínica. Esto evitará los errores en la dosimetría y contribuirá a la calidad del cribado o el diagnóstico del cáncer de mama en todo el mundo.

E.2. Cirugía radioguiada en el cáncer ginecológico

E.2.1. Antecedentes

155. El cáncer es una de las principales causas de muerte en el mundo. En los tumores malignos de la vulva, el endometrio y el cuello uterino, el uso de la cirugía radioguiada está asociado a una disminución de la morbilidad a corto y largo plazo, en comparación con los resultados de la linfadenectomía completa.

156. El ganglio linfático centinela es el primer ganglio linfático regional que drena directamente la linfa del tumor primario. Por lo tanto, se considera que estos ganglios son los primeros en recibir la diseminación de células metastásicas transportadas por la linfa. La cartografía y biopsia de los ganglios linfáticos centinela se ha convertido en una técnica habitual en la cirugía del cáncer (cáncer de mama y melanomas), y ayuda a reducir al mínimo el procedimiento quirúrgico.

157. La detección de los ganglios linfáticos centinela proporciona información de valor pronóstico sobre el estado de los ganglios y puede ayudar a evitar la morbilidad por sobretratamiento. Además, como no existen modalidades de obtención de imágenes capaces de detectar las metástasis microscópicas, la biopsia de los ganglios linfáticos centinela se considera el único método fiable de examen de los ganglios linfáticos y de detección de micrometástasis en los ganglios regionales.

E.2.2. Cáncer cervicouterino

158. El cáncer cervicouterino es el tercer cáncer ginecológico más frecuente en los países desarrollados, pero el más frecuente en los países en desarrollo y la principal causa de muerte de las mujeres en edad de procrear. Por lo general se disemina localmente a los órganos adyacentes de la pelvis, pero también puede propagarse a los ganglios linfáticos locoregionales, y, en algunos casos raros, se han visto metástasis de diseminación hemática en los pulmones, el hígado, los huesos o el cerebro. La utilidad de la detección a través de los ganglios linfáticos centinela en el caso del cáncer cervicouterino ha sido estudiada en un amplio grupo de 507 mujeres y en los exámenes relativos a 831 pacientes. El uso de la técnica combinada arrojó tasas de detección del 93,5 % y el 96 %, altos valores diagnósticos de los resultados negativos (del 94 % y el 97 %) y una tasa de resultados negativos falsos del 8 %. Un resultado importante es el mayor nivel de la tasa de detección y del valor diagnóstico de los resultados negativos en los tumores de menos de 2 cm (del 94 % frente al 84 % y del 99 % frente al 89 %, respectivamente).

E.2.3. Cáncer del endometrio

159. El cáncer del endometrio es el tumor maligno más común del aparato genital femenino en los países desarrollados. La afectación pélvica o paraaórtica indica un pronóstico peor, con tasas de supervivencia a los cinco años de entre el 44 % y el 52 %. En el cáncer endometriode de alto riesgo (G3, > 50 % de afectación miometrial) o en pacientes con resultados histológicos de tumores de alto riesgo (carcinoma de células claras, carcinoma papilar seroso, carcinosarcoma), el tratamiento habitual es una estadificación quirúrgica, con linfadenectomía pélvica y paraaórtica. Pero en el cáncer del

endometrio de bajo riesgo, la incidencia de la invasión ganglionar es muy baja y aún no existe un consenso claro con respecto al tratamiento. En algunos casos, el resultado histológico de baja malignidad de la paciente cambia y aumenta cuando se realiza el examen anatomopatológico del tumor completo. En estas situaciones, habría sido útil una estadificación quirúrgica.

160. El diagnóstico de la invasión ganglionar puede modificar el tratamiento y la decisión sobre la aplicación de una terapia complementaria. Además, es importante destacar que la mayoría de las pacientes con cáncer del endometrio son personas de alto riesgo quirúrgico, debido a la obesidad y las enfermedades concomitantes. En esta situación, el concepto de los ganglios linfáticos centinela puede reducir considerablemente la morbilidad posoperatoria, si se logra evitar la linfadenectomía sistemática incluso en pacientes con tumores de alto riesgo. El uso de la detección del ganglio linfático centinela podría no solo permitir una estadificación quirúrgica sin el aumento del número de complicaciones que puede derivarse de una linfadenectomía completa, sino también elevar la sensibilidad de la estadificación gracias al análisis inmunquímico de algunos ganglios linfáticos precisos. Aunque se han realizado varios estudios de la detección del ganglio linfático centinela en el cáncer del endometrio, aún no hay suficientes pruebas científicas para validar este enfoque.

E.2.4. Cáncer ovárico

161. La incidencia de ganglios linfáticos positivos en el cáncer ovárico incipiente es baja, de entre un 5,1 % y un 15 %. La linfadenectomía pélvica y paraaórtica aumenta la duración de la intervención quirúrgica y la morbilidad posible. La detección del ganglio linfático centinela debería tomarse en consideración en este tipo de cáncer.

E.2.5. Tendencias futuras

162. El adelanto más importante en el cáncer ginecológico es la introducción de instrumentos intraoperatorios tales como la gammacámara portátil. Este dispositivo proporciona una imagen intraoperatoria para localizar los ganglios linfáticos centinela antes de la resección. Tras la extirpación, otra imagen del campo operatorio puede confirmar el éxito de la resección por la ausencia de actividad. El procedimiento tarda entre 5 minutos (en el cáncer vulvar y cervicouterino) y 15 minutos (en el cáncer del endometrio), lo que es relativamente poco en la duración total de una intervención quirúrgica.

163. El comportamiento hipermetabólico del cáncer ginecológico hace posibles el diagnóstico y la localización mediante tomografía por emisión de positrones (PET) de las masas recidivantes. Las recidivas, fácilmente diagnosticadas con una PET o una tomografía computarizada, pueden presentarse con una extensa diseminación por la cavidad abdominal, que debe tratarse con quimioterapia, o como un foco tumoral pequeño y aislado. En estos casos particulares, una sonda PET de mano intraoperatoria puede guiar la intervención quirúrgica, detectar la masa tumoral y diferenciarla del tejido normal o cicatricial. La cirugía guiada por PET es especialmente útil para detectar las lesiones no palpables, o las lesiones cubiertas por tejido fibrótico. La principal dificultad técnica radica en la elevada absorción fisiológica en los tejidos circundantes: el hígado, el bazo, los riñones, la vejiga, etc. Esta actividad alta, unida a la baja resolución espacial de algunos dispositivos, hace que la PET no sea adecuada como guía para la resección de los bordes. Una de las ventajas de este tipo de cirugía es la disminución de la morbilidad posoperatoria, gracias a la localización directa de la lesión con la sonda y a la reducción del tamaño de la incisión. Se recomienda hacer una PET antes de la intervención quirúrgica, para localizar los focos tumorales y planificar la extirpación.

164. No obstante los beneficios que puede reportar este procedimiento, la cirugía guiada por PET aún no es una práctica muy difundida. Los principales problemas son: a) la localización no específica, porque la sonda puede detectar ya sea tejidos tumorales o tejidos inflamatorios; b) las dificultades técnicas antes descritas, debido a la actividad alta en la cavidad abdominal (se recomienda una razón mínima de 1,5:1) y a que el tamaño de las sondas no permite el uso de la cirugía laparoscópica; c) la radiación recibida por el personal, aunque algunos estudios definen un máximo anual de 260 horas para este tipo de cirugía; y d) los aspectos económicos.

165. Recientemente se ha puesto a prueba un nuevo trazador en los tumores malignos ginecológicos, especialmente en el cáncer cervicouterino; el nuevo equipo empleado para observar este agente consiste en una cámara fluorescente multiespectral que permite la visualización intraoperatoria del trazador. El trazador fluorescente (verde de indocianina) se inyecta al comienzo de la operación y se visualiza durante la exploración quirúrgica de la pelvis.

F. Alimentación y agricultura

F.1. Nuevos adelantos apuntan a un cambio de paradigma en la irradiación fitosanitaria y de los alimentos

166. La irradiación de los alimentos ‘en la fábrica’, como parte de los procesos de elaboración normales, es un sueño de larga data. Por ahora, lo habitual es que la irradiación de los alimentos se efectúe en grandes instalaciones independientes a cargo de contratistas especializados, pero el desarrollo de nuevos irradiadores, sistemas de dosimetría y aplicaciones está allanando el camino para un nuevo enfoque. La tecnología está reduciendo el tamaño de los generadores de rayos X y de haces de electrones, y los adelantos recientes en la irradiación de fuente mecánica hacen pensar que en el futuro será más fácil instalar unidades de irradiación en las cadenas de envasado de alimentos o como parte de la fabricación de productos alimenticios.

167. La irradiación se efectúa haciendo pasar los alimentos por un haz de radiación ionizante. El haz atraviesa el envase y el alimento, tal como los rayos X atraviesan el cuerpo humano, pero, a diferencia de los rayos X utilizados en la medicina, el haz tiene por objeto depositar energía para producir un efecto sin un aumento significativo de la temperatura. Los alimentos sólidos, previamente envasados e incluso congelados, pueden tratarse de esta manera con mínimos cambios adversos, y el envase protege los productos después del tratamiento. Pero el proceso es costoso y lleva tiempo, por lo que los productores no irradiarán los alimentos si no es necesario. La irradiación se utiliza solo cuando produce algún cambio beneficioso que mejora o mantiene la alta calidad del producto. Como ejemplos cabe citar el uso de la irradiación para eliminar las bacterias causantes de intoxicaciones alimentarias, reducir el número de microorganismos responsables de la descomposición y de ese modo aumentar la conservación de los alimentos frescos, o evitar la germinación sin utilizar productos químicos (p. ej., en el jengibre, el ñame, el ajo, las cebollas y las papas); o como tratamiento fitosanitario para prevenir la propagación de organismos invasores (moscas, insectos, gorgojos y ácaros, y posiblemente babosas, caracoles e incluso semillas indeseadas). Este último objetivo es especialmente importante en las remesas de frutas y hortalizas frescas, en que las plagas que pasen inadvertidas y entren en el comercio internacional pueden arraigar en nuevos lugares y dañar los entornos y la agricultura local. Mientras que el uso de la fumigación con productos químicos está cada vez más restringido debido a las consideraciones sanitarias y/o ambientales, el empleo de la irradiación no deja ningún residuo químico nocivo y tiene efectos negativos mínimos en la calidad de los alimentos.

168. Para la irradiación se necesitan potentes fuentes de radiación ionizante, que deben gestionarse correctamente. La mayoría de los alimentos se irradian con rayos γ emitidos por el cobalto 60. Los rayos γ del cobalto 60 tienen energías de 1,17 y 1,33 MeV y no tienen masa, por lo que pueden penetrar grandes conjuntos de productos voluminosos (pudiéndose irradiar de una sola vez, por ejemplo, toda una paleta cargada con sacos de especias). La potencia de la fuente de radiación disminuye a razón de un 1 % mensual aproximadamente (el período de semidesintegración del cobalto 60 es de alrededor de cinco años), por lo que el tiempo de exposición debe aumentarse ligeramente cada mes para suministrar la misma cantidad de energía (dosis de radiación). A la larga, es necesario reponer la fuente.

169. Algunos alimentos se irradian con haces de electrones. Estos tienen energías de hasta 10 MeV; cada electrón del haz tiene una carga eléctrica global negativa y una masa pequeña pero apreciable. Aunque los haces de electrones ofrecen la ventaja de que pueden activarse cuando se necesitan y dirigirse y enfocarse con ayuda de campos magnéticos, también tienen la propiedad de que interactúan y colisionan fácilmente con los átomos de los alimentos, transfiriendo energía con rapidez, a una tasa alta pero por una distancia relativamente corta. Los haces de electrones no penetran a gran profundidad, y solo son adecuados para irradiar envases de alimentos de algunos centímetros de altura.

170. Una cantidad considerablemente menor de alimentos se irradia con rayos X; para ello se bombardea un blanco metálico con un haz de electrones a fin de convertir la energía cinética de los electrones en rayos X, por lo general con energías de hasta 5 MeV, pero en algunos países de hasta 7,5 MeV. Los rayos X son tan penetrantes como la radiación γ , porque no tienen masa, de modo que también sirven para irradiar grandes paletas de bultos de alimentos voluminosos de una sola vez. Sin embargo, en la interacción del haz de electrones con el blanco metálico, gran parte de la energía se desperdicia en forma de calor, y solo una pequeña proporción, de algunos puntos porcentuales, se transforma en rayos X.

171. Tanto los haces de electrones como los rayos X se generan con aparatos, y cambiando los parámetros o el diseño de esos aparatos es posible crear haces de distintas características y energías. A diferencia del cobalto 60, estas fuentes pueden desactivarse cuando no se necesitan. Además, la historia demuestra que los aparatos experimentan frecuentes innovaciones tecnológicas.

172. Con ambos tipos de irradiación, de fuente mecánica o por radionucleidos, el modelo operativo actual entraña generalmente la existencia de una instalación de irradiación independiente, que presta servicios de irradiación a terceros por contrato. Las instalaciones de irradiación comerciales suelen estar situadas en rutas de comercio o centros de transporte importantes, como las terminales de carga de los puertos y aeropuertos. La instalación misma es básicamente un gran almacén con un irradiador en el centro. Los alimentos entran en la cámara de irradiación desde el sector no irradiado del almacén (el área de las mercancías entrantes), se exponen al haz de radiación por un tiempo determinado, de modo que reciban una dosis mínima específica de radiación, y salen de la cámara hacia el sector irradiado del almacén (el área de las mercancías salientes). Allí permanecen hasta que se expide el certificado de que recibieron el tratamiento por irradiación correcto, tras la verificación del tiempo de exposición registrado y la lectura de confirmación de los dosímetros que los acompañaron durante todo el proceso. Una vez certificada la correcta irradiación, los alimentos se expiden al destino especificado por el propietario.

173. Esta forma de proceder, ya arraigada, se seguirá utilizando probablemente, pero la nueva tecnología está permitiendo la miniaturización de las unidades de irradiación y, aunque esas unidades miniaturizadas solo ofrecen por el momento fuentes de haces de baja energía, ya se están utilizando en la industria para esterilizar materiales de embalaje, equipo médico y muestras biológicas en las propias fábricas, como parte del proceso de fabricación normal. Con el tiempo, es posible que los generadores pequeños de haces electrónicos y de rayos X se vuelvan más potentes y, por lo tanto, más útiles para la irradiación de los alimentos. Estas novedades permiten vislumbrar un futuro en que los alimentos se podrán irradiar en las cadenas de envasado, durante la fabricación o poco después de la cosecha en la explotación agrícola. Ahora es el momento de sentar una sólida base técnica en apoyo de la irradiación con haces de electrones y rayos X, para que este cambio de paradigma ofrezca algún día nuevas oportunidades comerciales en la irradiación fitosanitaria y de los alimentos. El Organismo, en colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, está procurando acelerar la labor de investigación y desarrollo, para facilitar el aprovechamiento del potencial de estas técnicas prácticas con haces de electrones y rayos X de ofrecer tratamientos de irradiación de los alimentos nuevos y mejorados en el futuro.

174. Las actividades de investigación actuales en los Estados Unidos de América incluyen la construcción de un irradiador de rayos X de baja energía (160 keV) contenido en un armario portátil¹⁸, que generará radiación ionizante para desinfectar las cajas de fruta como tratamiento de cuarentena contra los insectos. En las investigaciones de la República de Corea se están evaluando los efectos de los rayos X de baja energía en las características microbiológicas, fisicoquímicas y organolépticas (color, sabor, olor y textura) de los alimentos. El concepto consiste en pequeños armarios generadores de rayos X que se utilizarán en los hospitales para garantizar la inocuidad de los alimentos administrados a pacientes vulnerables (como los inmunodeprimidos). El trabajo en colaboración de investigadores del Japón y Polonia está conduciendo a un nuevo enfoque de la irradiación de los alimentos y los productos agrícolas, que se relaciona con la limitada capacidad de penetración de los electrones de energías inferiores a 300 keV. Esta es una nueva aplicación para la eliminación de bacterias, mohos y hongos levaduriformes de la superficie de los productos alimenticios. El tratamiento fue comparado con la irradiación convencional con haces de electrones (10 MeV) de la pimienta negra en granos, la pimienta blanca en granos y las bayas de pimienta de Jamaica. El tratamiento superficial resultó ser tan eficaz como la irradiación convencional para la reducción y eliminación de microbios.¹⁹

175. También se están desarrollando herramientas de apoyo para las instalaciones de irradiación de fuente mecánica. En China se ha elaborado una prueba de concepto de un aparato de rayos X para escanear productos envasados en cajas antes del proceso de irradiación a fin de determinar si el embalaje del alimento se ajusta a la especificación para la correcta irradiación con haces de electrones.²⁰ En Viet Nam se está desarrollando un concepto parecido, pero que emplea rayos γ emitidos por pequeñas fuentes colimadas de cobalto 60 para escanear y poner a prueba los productos en cajas antes de someterlos a la irradiación con haces de electrones. Ambos dispositivos han sido utilizados experimentalmente en instalaciones comerciales de irradiación con haces electrónicos; dan una rápida medición del grosor de la masa (un parámetro clave en el caso de los haces de electrones) y emplean diferentes algoritmos para predecir con exactitud la distribución de la dosis de ese tipo de irradiación. La eficacia de la irradiación con haces de electrones puede evaluarse rápidamente, y la configuración optimizada del producto se puede obtener por simulación antes del tratamiento real. En las investigaciones más recientes de China se está ensayando un sistema que simulará la distribución de dosis en tres dimensiones y que podría revolucionar la dosimetría en el procesamiento por irradiación.

176. En 2015, el grupo de ingeniería de procesos alimentarios Bühler estableció una asociación estratégica con COMET, un productor de pequeñas lámparas de haz de electrones. Juntos han producido un aparato para la descontaminación microbiana de alimentos secos con haces de electrones de baja energía.²¹ Varios de estos nuevos dispositivos están siendo evaluados en diferentes procesadores de especias. Mevex, un proveedor de instalaciones de haces de electrones y rayos X, ha desarrollado la “caja de rayos X de Mevex”, un sistema de rayos X compacto autoblandado para la investigación o el procesamiento comercial en pequeña escala de productos de alto valor, incluidos alimentos y productos agrícolas. El irradiador con su blindaje tiene una base de unos dos metros cuadrados, y está disponible con energías de hasta 2 MeV. Está diseñado para administrar altas tasas de dosis a productos de hasta 40 cm de altura, en una mesa giratoria de 40 cm de diámetro. NucTech, un proveedor de grandes instalaciones de haces de electrones y rayos X con sede en China, está trabajando en el desarrollo de una novedosa herramienta de detección del grosor, que se podrá comercializar para su uso en instalaciones de haces de electrones con el fin de examinar y validar los productos y posiblemente cartografiar la distribución de la dosis antes de la irradiación, lo que permitirá ahorrar tiempo y dinero y mejorar la productividad.

¹⁸ Follett, P., Kirk, R., A portable cabinet X-ray machine to control insects in exported fruit https://www.cherrygrowers.org.au/assets/PASE_Portable_X-ray_Machine.pdf.

¹⁹ Gryczka, U., Migdał, W., Bułka, S., The effectiveness of the microbiological radiation decontamination process of agricultural products with the use of low energy electron beam, *Radiation Physics and Chemistry* 143 (2018) 59-62.

²⁰ Qin, H., et al., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, *Radiation Physics and Chemistry* 143 (2018), 8-13.

²¹ Hertwig, C., Meneses, N., Mathys, A., Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review, *Trends in Food Science & Technology* 77 (2018) 131-142.

F.2. Tecnologías nucleares para la rápida adaptación de los cultivos y los sistemas de cultivo al cambio climático

177. La sequía, las temperaturas extremas, las inundaciones y las carencias de nutrientes o la toxicidad de los minerales de los suelos repercuten en los rendimientos de los cultivos directamente, mediante sus efectos en el arraigo y crecimiento de las plantas, e indirectamente, por su influencia en la naturaleza e intensidad de factores de estrés biótico tales como las enfermedades, los insectos y las malas hierbas. En ausencia de medidas adecuadas de adaptación de la producción de cultivos, el cambio climático reducirá los rendimientos de las cosechas, conduciendo a la inseguridad alimentaria y a la desarticulación de los sistemas alimentarios, especialmente en las naciones en desarrollo. También puede modificar la distribución geográfica de las especies cultivadas.

178. Las catastróficas pérdidas de cosechas causadas por el cambio climático ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar variedades innovadoras para garantizar la seguridad alimentaria mundial. En la era posgenómica, la combinación del fitomejoramiento por mutaciones, la selección asistida por marcador y el fenotipado ultrarrápido constituye una fórmula poderosa para la rápida adaptación de las plantas al cambio climático. El fitomejoramiento busca normalmente mejorar el rendimiento de los cultivos ante los factores de estrés bióticos y abióticos a que se enfrenta la producción agrícola en cada período vegetativo.

F.2.1. Fitomejoramiento por mutaciones asistido por marcador para el desarrollo más rápido de variedades adaptadas al clima

179. La mejora genética de las plantas por inducción de mutaciones sigue siendo la forma más veloz de crear nueva variación genética para la adaptación rápida al cambio climático. La combinación del fitomejoramiento por mutaciones con el genotipado ultrarrápido y rentable de la próxima generación y con el fenotipado ultrarrápido de precisión es la clave para acelerar esa adaptación. Este proceso ayuda a los científicos a comprender las bases moleculares de las variaciones genéticas creadas mediante la mejora por inducción de mutaciones, lo que lleva al desarrollo y uso de marcadores moleculares que aceleran la selección y obtención de nuevas variedades. Así pues, las tecnologías de los marcadores moleculares basadas en estudios de asociación del genoma completo, junto con la labor más focalizada de identificación, validación y uso de las asociaciones genéticas de un conjunto específico de alelos/genes/familias de genes con un resultado fenotípico, facilitan el fitomejoramiento más rápido.

180. El Organismo ha establecido ahora, en colaboración con la FAO, un procedimiento de trabajo para la identificación rentable de las mutaciones inducidas que dan lugar a determinados fenotipos, y ha comenzado a transferir este procedimiento a los Estados Miembros mediante becas de formación. Se han elaborado protocolos de biología molecular, y actualmente se están estableciendo los recursos informáticos necesarios para el análisis de datos. El procedimiento de trabajo facilita los enfoques de la cartografía genética respaldados por la secuenciación de nueva generación. Un logro importante en 2018 fue la aplicación por primera vez, en los laboratorios del Organismo, de un análisis con marcador molecular, concretamente de un carácter relacionado con la calidad alimentaria de la cebada (lema naranja). Se identificaron las mutaciones causantes de este carácter y se elaboró un análisis con marcador. El análisis de genotipado se está poniendo ahora a prueba en un programa de alimentación con cebada con vistas a lograr la introgresión del carácter lema naranja en una cebada forrajera imberbe de invierno. El análisis predice correctamente el fenotipo y, por lo tanto, es útil para la selección asistida por marcador. Además, está en curso un estudio piloto del sorgo enano de maduración temprana, en que se está intentando cartografiar los caracteres mediante la secuenciación hologenómica de varios centenares de individuos de poblaciones segregantes de sorgo, seguida del análisis de genotipos contrastantes para identificar los locus genéticos causales (figuras F-1, F-2).

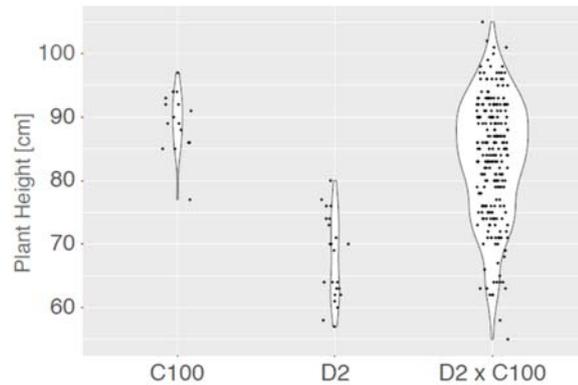


Fig. F-1. Cultivo de plantas en un campo de Seibersdorf (Austria) (verano de 2018); el enanismo mutante presenta segregación mendeliana. La imagen de la derecha muestra las distribuciones por altura de las plantas de la progenie normal, mutante y F2.

181. Aunque el objetivo final es la mejora por inducción de mutaciones acoplada con la tecnología de los marcadores moleculares para acelerar la adaptación de los cultivos al cambio climático, la mejora por mutaciones por sí sola se sigue utilizando para obtener variedades adaptadas a condiciones climáticas adversas. Gracias a la transferencia de la tecnología de fitomejoramiento por mutación, el Pakistán ha comercializado recientemente tres variedades mutadas de algodón adaptadas al estrés de las altas temperaturas y con un rendimiento de fibra y una calidad constantes. Aproximadamente el 20 % de la superficie que el Pakistán dedica al algodón está ahora cultivada con esas variedades mutadas, y se prevé que esta proporción aumentará a entre un 30 % y un 40 % en los próximos 2 a 3 años. Asimismo, los agricultores de Zambia y Zimbabwe han conseguido recientemente un aumento del 10 % al 20 % en los rendimientos del caupí, utilizando variedades desarrolladas mediante fitomejoramiento por mutación que presentan una mayor tolerancia a la sequía y son más resistentes a los insectos.

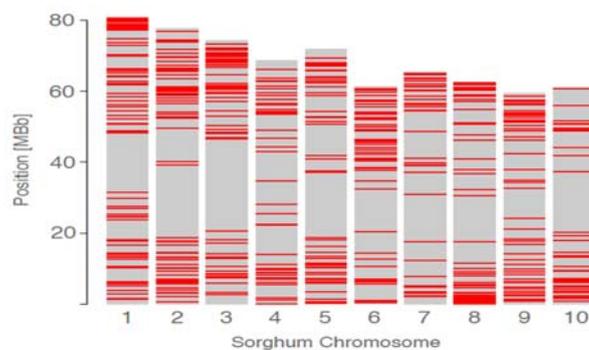


Fig. F-2. Distribución de los polimorfismos mononucleotídicos y los pequeños indeles en los cromosomas del sorgo, determinada por secuenciación hologenómica de seis líneas mutantes.

F.2.2. Tomografía computarizada de rayos X para el fenotipo ultrarrápido no invasivo de especies vegetales

182. La falta de instalaciones para el estudio ultrarrápido y no invasivo de plantas enteras o tejidos vegetales se considera actualmente un cuello de botella importante en la mejora de los cultivos, específicamente en la etapa de la selección de las mejores variedades. La imagenología por resonancia magnética nuclear se está utilizando cada vez más para comprender la función vascular de las plantas, es decir, la función del xilema y el floema y la hidrodinámica del sistema. Una tecnología nuclear conexa, la tomografía computarizada (TC) por rayos X, se está empleando ya sistemáticamente en aplicaciones no médicas, como las de la fitología, y las estimaciones por TC con rayos X que predicen los rasgos morfológicos y anatómicos son de uso cada vez más común en el fenotipado de especies

vegetales. Algunos ejemplos del uso de análisis con TC por rayos X en la fitología son el estudio de la supervivencia de las plantas bajo estrés hídrico; la evaluación de la tolerancia de las plantas a la sombra y de la interceptación de la luz por las hojas; el análisis de las enfermedades de las raíces; y el estudio del desarrollo de los sistemas radiculares y de las interacciones entre las raíces. La ventaja de estas tecnologías consiste principalmente en su carácter no invasivo y en su capacidad de cuantificar procesos fisiológicos en tiempo real. La instrumentación para la captación de imágenes a escala macroscópica y microscópica sigue mejorando, y el uso de la TC por rayos X ultrarrápida está aumentando gradualmente. La complementación de los procedimientos de trabajo genómicos y moleculares establecidos para el fitomejoramiento por mutaciones y de los protocolos de fenotipado existentes con técnicas de imagenología nuclear ultrarrápidas y no invasivas permitirá acelerar el desarrollo de variedades mejoradas por mutación.

F.3. Aplicación innovadora de tecnologías nucleares e isotópicas en la nutrición animal

183. Las proyecciones indican que en 2050 la demanda mundial de alimentos de origen animal habrá aumentado entre un 60 % y un 70 %.²² Para cumplir la ingente tarea de aumentar los suministros de leche, carne, huevos y otros productos pecuarios comestibles de manera sostenible y en tiempo oportuno, la industria ganadera deberá experimentar una intensificación tecnológica de sus sistemas de producción. Los suministros de pienso y forraje y el acceso a buenas tierras de pastoreo, praderas y pastizales deberán duplicarse para satisfacer la demanda proyectada de nutrición de los animales. A esto se añade el problema de la creciente competencia por los alimentos entre los animales y las personas, y del impacto de la producción pecuaria en el medio ambiente.

184. Actualmente se utilizan como pienso cerca de 800 millones de toneladas de cereales (un tercio de la producción total de cereales), y las proyecciones indican que en 2050 esa cifra superará los 1100 millones de toneladas²³. En 2006 se estimó que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por las actividades pecuarias ascendían a 7,1 gigatoneladas de CO₂ equivalente por año, un 14,5 % del total de las emisiones antropógenas de GEI²⁴. Se precisa una labor de investigación y desarrollo innovadora, que integre las técnicas nucleares con las tecnologías convencionales, no solo para mejorar la alimentación estabulada y los sistemas de pastoreo actuales, sino también para ampliar el horizonte de las fuentes de pienso y forraje e incluir los pastos y praderas no aprovechados, los subproductos industriales, los desechos alimentarios, la producción a gran escala de algas unicelulares y la producción de forraje acuapónico, y explorar otros tipos de pienso no convencionales menos conocidos. Esto ayudará a crear un conjunto de datos de calidad y proporcionará la información necesaria para la adopción de las decisiones políticas y para los posibles inversores.

185. Más del 40 % de la superficie terrestre del planeta, excluidas Groenlandia y la Antártida, está cubierto de pastos que, con un uso optimizado como fuente de pienso para el ganado, reportarían beneficios a muchos millones de agricultores en todo el mundo.²⁵ En las zonas tropicales, los rumiantes son las principales especies ganaderas y su producción se basa en gran medida en el pastoreo en pastizales naturales (figura F-3). Con técnicas nucleares e isotópicas es posible crear un conjunto de datos sobre el consumo de alimentos, la selección de la dieta y el contenido de nutrientes de los pastos y las especies vegetales de ramoneo de que se nutren los animales. Esto es necesario para las diversas

²² FAO, The future of food and agriculture: Trends and challenges (2017) FAO, Rome <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>.

²³ Makkar, H. P. S., Review: Feed demand landscape and implications of food-not feed strategy for food security and climate change, *Animal* 12 (2018) 1744-1754.

²⁴ FAO, Key facts and findings, <http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode>.

²⁵ Suttie, J. M., Reynolds, S. G., Batello, C., *Grasslands of the World* (2005) Rome, FAO <http://www.fao.org/docrep/008/y8344e/y8344e05.htm>.

decisiones de gestión, por ejemplo para optimizar la asignación del forraje a diferentes tipos de animales, seleccionar las especies vegetales adecuadas para volver a sembrar los pastizales y praderas degradados, y elaborar estrategias de suplementación apropiadas. El aprovechamiento eficiente de los pastos ofrece también la posibilidad de aumentar el secuestro de carbono y mejorar la bonificación de tierras y la productividad pecuaria.



Fig. F-3. La cría conjunta de especies de pastoreo y de ramoneo es una práctica habitual en los pastos comunales de Zimbabwe.

F.3.1. Técnicas nucleares para investigar y mejorar la nutrición de los animales de pastoreo

186. Las tecnologías convencionales que comprenden ensayos de alimentación *in vivo*, análisis *in vitro* de la digestibilidad y análisis bromatológicos de los piensos y forrajes utilizados en los sistemas de alimentación estabulada no han permitido estimar eficazmente el consumo de alimentos voluntario ni la selección de la dieta de los animales de pastoreo. Avances recientes en el desarrollo de herramientas y protocolos para la aplicación de una combinación de tecnologías convencionales y nucleares innovadoras aportan soluciones que permiten analizar y estimar el consumo de alimentos y la selección de la dieta y su digestibilidad en los animales que pacen en pastizales heterogéneos.

187. El Organismo está trabajando con los Estados Miembros para crear herramientas de nutrición animal y ofrecer una aplicación integrada que emplea la proporción del isótopo estable ^{13}C específica de cada n-alcano de cadena larga y la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) para estimar el consumo de alimentos de los rumiantes y la selección, composición y digestibilidad de su dieta. Esto ayuda a optimizar la ingesta de nutrientes del ganado mediante la suplementación alimentaria durante el pastoreo, evitando el sobrepastoreo de los pastos y praderas.

F.3.2. Los n-alcanos ayudan a estimar el consumo de alimentos, la digestibilidad y la selección de la dieta

188. Todas las plantas superiores que constituyen la alimentación animal tienen una capa de cera (n-alcanos) en la superficie externa que difiere considerablemente de una especie a otra y cuyos datos cuantitativos pueden analizarse para distinguir las especies vegetales de que se alimentan los animales. Por consiguiente, los n-alcanos han sido utilizados como marcadores fecales para estimar la digestibilidad de las plantas, y una combinación de estos datos con la producción fecal ha permitido calcular el consumo de alimentos. Los n-alcanos empleados como marcadores fecales pueden proceder de la alimentación (marcadores internos) o ser administrados oralmente (marcadores externos). Aunque este uso de los n-alcanos como marcadores fecales permite distinguir muchas de las plantas consumidas por los rumiantes, no es posible diferenciarlas todas, especialmente en el caso de los pastizales heterogéneos con decenas de especies diferentes. Sin embargo, el enriquecimiento de los n-alcanos en un isótopo del carbono permite diferenciar con exactitud las especies vegetales de los pastizales heterogéneos. Una aplicación combinada de tecnologías basadas en los n-alcanos y en el carbono 13 ha permitido estimar con gran eficacia el consumo de alimentos de los animales y la composición y digestibilidad de su dieta. Por medio de la técnica de la cromatografía de gases-combustión-espectrometría de masas de relaciones isotópicas, previa saponificación, extracción y purificación, se analiza la relación isotópica ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) específica de cada compuesto. Además, se ha

utilizado con éxito una prometedora e innovadora tecnología basada en el láser, la espectroscopia por exploración anular total de la cavidad, para determinar el contenido en carbono 13, proporcionando así mediciones en un plazo más breve y con un tratamiento previo de las muestras más sencillo.

F.3.3. El análisis por NIRS de los residuos de nutrientes en las heces ayuda a estimar el contenido de nutrientes, el consumo de alimentos voluntario y la selección de la dieta

189. El análisis por NIRS entraña la iluminación de muestras de pienso o heces con una luz del infrarrojo cercano de amplio espectro (muchas longitudes de onda o frecuencias), que puede ser absorbida, transmitida, reflejada o dispersada por la muestra en estudio. El intervalo de longitudes de onda de la iluminación suele ser de 800 nm a 2500 nm. La medición de la intensidad de la luz como función de la longitud de onda antes y después de la interacción con la muestra permite calcular la reflectancia difusa, una combinación de la absorción y dispersión de la luz, causada por la muestra. La NIRS proporciona datos cualitativos sobre la proteína bruta, el contenido de fibra, la proporción de especies vegetales y sus componentes morfológicos, el consumo de alimentos voluntario y la digestibilidad de la dieta. Cuando las muestras se dividen y analizan tanto por química húmeda como por NIRS con técnicas de enmascaramiento doble, el análisis por NIRS da desviaciones estándar de un 60 % a un 85 % más bajas. Esto indica que en la NIRS hay menos errores humanos y que sus datos son más coherentes que los obtenidos mediante los análisis de química húmeda convencionales.²⁶

190. La NIRS se ha convertido en una técnica versátil, que no requiere ninguna preparación de la muestra, reduce los costos y la duración del análisis, y es capaz de estudiar las muestras a través de un vidrio o de materiales de embalaje.

F.3.4. La fluorescencia de rayos X por energía dispersiva determina con exactitud el contenido de minerales de los forrajes

191. Los forrajes constituyen el grueso de la alimentación de los rumiantes; sin embargo, su concentración de minerales varía enormemente, lo que afecta a la salud y el rendimiento de los animales. La fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDXRF) es una técnica no destructiva de espectroscopia multimineral que permite el análisis y la estimación de los minerales de forma sencilla, directa y coherente. La técnica consiste en escanear muestras de forraje seco y molido obtenidas de una gran diversidad de plantas frescas, henos o piensos ensilados a entre 20 keV y 40 keV utilizando un filtro de aluminio y la calibración con un *software* adecuado, por ejemplo Bruker SpectraEDX (Bruker, Hamburgo, Alemania).²⁷ La determinación de la concentración de minerales comunes (sodio, magnesio, fósforo, azufre, cloro, calcio, potasio, manganeso, hierro, cobre y cinc) en las raciones de los rumiantes dio coeficientes de determinación de entre 0,93 y 0,99, con el coeficiente de variación en un intervalo aceptable (5 % a 14 %). La EDXRF puede aplicarse sobre el terreno a diversos sistemas de producción pecuaria para determinar la concentración de minerales. Los datos obtenidos ayudarán a determinar el aporte complementario de minerales necesario para mejorar la salud y la productividad de los animales.

192. La alimentación es fundamental para una producción pecuaria rentable y sostenible. Influye en el crecimiento del animal, en su salud, bienestar y productividad y en la calidad de sus productos. Representa más del 70 % del costo de toda explotación pecuaria. La alimentación se ve afectada por la disponibilidad de recursos, y a su vez repercute directamente en la base de recursos (pastos, tierras de pastoreo y medio ambiente). Para satisfacer la demanda en constante crecimiento de

²⁶ De Ondarza, M. B., Ward, R., Accurate analysis: NIRS versus wet chemistry, Hoards Dairyman (February 2013) 129, <http://www.foragelab.com/Media/Accurate%20analysis%20NIRS%20versus%20wet%20chemistry.pdf>.

²⁷ Berzaghi, P., Lotto, A., Mancinelli, M., Benozzo, F., Technical note: Rapid mineral determination in forages by X-ray fluorescence, Journal of Dairy Science 101 (2018) 9967-9970.

alimentos de origen animal, será necesario mejorar la productividad pecuaria y limitar su impacto en el medio ambiente. En ese esfuerzo, las tres tecnologías arriba descritas, validadas y aplicadas conjuntamente, podrán ofrecer una respuesta completa sobre los nutrientes disponibles en los piensos y forrajes, su accesibilidad y palatabilidad para los animales y su digestibilidad para mejorar la transformación de los nutrientes y la energía en crecimiento, salud y rendimiento. Las técnicas del carbono 13 y los n-alcanos indican cuáles plantas se consumieron y en qué cantidades, la EDXRF determina la composición mineral de la dieta, y la NIRS estima la composición de los nutrientes residuales en las heces de los animales. La tecnología de la NIRS se emplea actualmente en animales de alimentación estabulada para estimar el consumo de pienso, la composición de la dieta y el contenido de nutrientes. Para los animales de pastoreo, pueden utilizarse las tecnologías del carbono 13 y la EDXRF en combinación con la NIRS, y las tres juntas dan una estimación global de los nutrientes de la alimentación, el consumo de alimentos y la composición de la dieta (figura F-4). Además, tanto la NIRS como la EDXRF son tecnologías móviles, que requieren un mantenimiento mínimo, tienen tasas de error humano más bajas que las de la química húmeda y no precisan ninguna preparación de las muestras. Uno de los adelantos futuros será un enfoque integrado de estas tres tecnologías para determinar la calidad y cantidad de la alimentación.

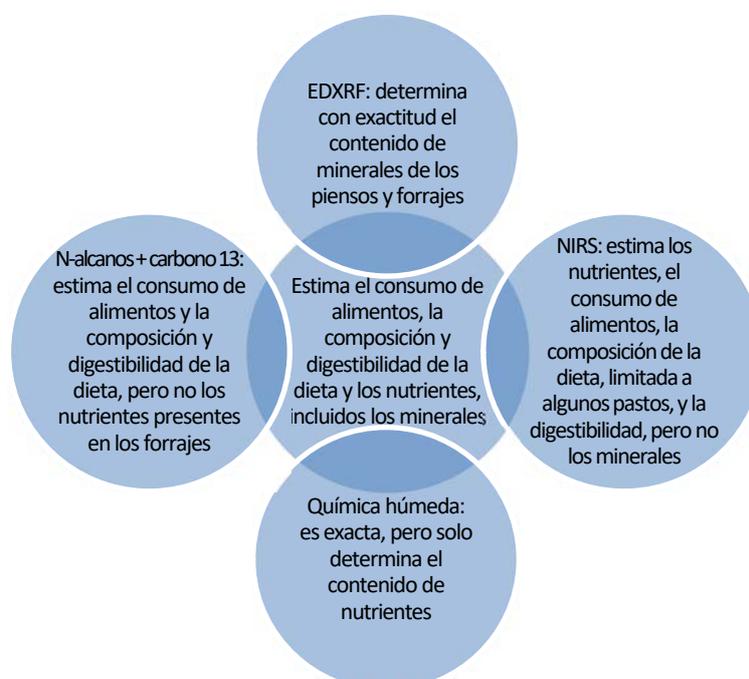


Fig. F-4. La validación de la tecnología de la NIRS con los n-alcanos y los datos sobre sus isótopos del carbono estables en el algoritmo matemático y la incorporación de la fluorescencia de rayos X por energía dispersiva para el análisis de los minerales proporcionan una solución móvil completa para el análisis de los piensos y forrajes y la evaluación de la nutrición animal.



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

www.iaea.org

Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre, P.O. Box 100
1400 Viena, Austria
Teléfono: (+43-1) 2600-0
Fax: (+43-1) 2600-7
Correo electrónico: Official.Mail@iaea.org

GC(63)/INF/2