

Conferencia General

GC(54)/INF/3

17 de agosto de 2010

Distribución general

Español

Original: Inglés

Quincuagésima cuarta reunión ordinaria

Punto 16 del orden del día provisional
(GC(54)/1)

Examen de la tecnología nuclear — 2010

Informe del Director General

Resumen

- En respuesta a las solicitudes de los Estados Miembros, la Secretaría elabora un amplio Examen de la tecnología nuclear todos los años. Adjunto al presente documento figura el informe de este año, en que se destacan acontecimientos notables ocurridos principalmente en 2009.
- En el *Examen de la tecnología nuclear 2010* se abordan los siguientes temas: aplicaciones eléctricas, fisión y fusión avanzadas, datos atómicos y nucleares, aplicaciones de los aceleradores y los reactores de investigación, tecnologías nucleares en la alimentación y la agricultura, salud humana, medio ambiente, recursos hídricos, y producción de radioisótopos y tecnología de las radiaciones. En el sitio web¹ del Organismo, en inglés, se encuentran otros documentos relacionados con el *Examen de la tecnología nuclear 2010* en los que se tratan las novedades en las esferas de medicina nuclear para el tratamiento del cáncer, técnicas nucleares para abordar enfermedades transfronterizas de los animales, técnicas nucleares para la vigilancia de la contaminación marina, clausura de instalaciones nucleares, recursos humanos para la expansión de la energía nucleoelectrica, infraestructura para nuevos programas nucleoelectricos, y producción y suministro de molibdeno 99.
- En el Informe Anual para 2009 (GC(54)/4), en particular la sección relativa a la tecnología, y en el Informe de Cooperación Técnica para 2009 (GC(54)/INF/4) también figura información sobre las actividades del OIEA relacionadas con la ciencia y la tecnología nucleares.
- El documento se ha modificado para tener en cuenta, en la medida de lo posible, observaciones específicas de la Junta de Gobernadores y otras recibidas de los Estados Miembros.

¹ <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>

Índice

Resumen ejecutivo	1
A. Aplicaciones eléctricas	3
A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad	3
A.2. Proyecciones sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica	6
A.3. Ciclo del combustible	7
A.3.1. Recursos y producción de uranio	7
A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible	9
A.3.3. Parte final del ciclo del combustible	10
A.4. Otros factores que afectan al crecimiento de la energía nucleoelectrica	10
A.4.1. Aspectos económicos	10
A.4.2. Seguridad	12
A.4.3. Desarrollo de recursos humanos	13
B. Fisión avanzada y fusión	15
B.1. Fisión avanzada	15
B.1.1. El INPRO y el GIF	15
B.1.2. Marco internacional de cooperación en energía nuclear (IFNEC)	16
B.1.3. Otros adelantos en la esfera de la fisión avanzada	16
B.2. Fusión	16
C. Datos atómicos y nucleares	17
D. Aplicaciones de los aceleradores y de los reactores de investigación	18
D.1. Aceleradores	18
D.2. Reactores de investigación	18
E. Tecnologías nucleares en la agricultura y la alimentación	20
E.1. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias	20
E.2. Lucha contra plagas de insectos	21
E.3. Calidad e inocuidad de los alimentos	23
E.4. Mejora de los cultivos	24
E.5. Ordenación sostenible de las tierras y los recursos hídricos	24
E.5.1. Mejora de la ordenación de los recursos hídricos para fines agrícolas mediante el empleo de métodos isotópicos	24
E.5.2. Secuestro de carbono orgánico del suelo y mitigación del cambio climático	25
F. Salud humana	26
F.1. Lucha contra la malnutrición mediante el empleo de técnicas nucleares	26
F.2. Sistemas híbridos de formación de imágenes: la SPECT/TC y la PET/TC	27
F.3. Avances en las aplicaciones radiooncológicas	29
F.4. Impacto de la tecnología digital en la obtención de imágenes por rayos X	29
G. Medio ambiente	30
G.1. Técnicas nucleares para la cuantificación de la descarga submarina de aguas subterráneas	30
G.2. Conocimiento del ciclo del carbono: aplicación de técnicas nucleares en la evaluación de los flujos de partículas entre la superficie del océano y el fondo del mar	31
H. Recursos hídricos	32
H.1. Actuar con conocimiento de causa	34
H.2. Utilización de isótopos estables para adquirir conocimientos sobre la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas	35
I. Producción de radioisótopos y tecnología de la radiación	36
I.1. Radioisótopos y radiofármacos	36
I.1.1. Productos radioisotópicos y su disponibilidad	36
I.1.2. Seguridad del suministro de molibdeno 99	37
I.2. Aplicaciones de las tecnologías de la radiación	38
I.2.1. Esterilización con haces de electrones de materiales de embalaje y contenedores asépticos	38
I.2.2. Radiosíntesis de nanoestructuras basadas en el carbono	39

Examen de la tecnología nuclear — 2010

Informe del Director General

Resumen ejecutivo

1. En 2009, se inició la construcción de doce nuevos reactores nucleares de potencia, el número más alto desde 1985, y volvieron a revisarse al alza las proyecciones acerca del crecimiento futuro de la energía nucleoelectrica. No obstante, sólo dos nuevos reactores se conectaron a la red, y con los tres reactores que se retiraron de servicio durante el año, la capacidad nucleoelectrica total mundial disminuyó ligeramente por segundo año consecutivo.
2. La actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y a largo plazo, siguen centradas en Asia. De las doce construcciones iniciadas, diez se encontraban en Asia, al igual que las dos nuevas conexiones a la red. Aunque la crisis financiera mundial que comenzó en el segundo semestre de 2008 no ha influido negativamente en las proyecciones generales relativas a la energía nucleoelectrica, se ha citado como uno de los factores de las demoras o aplazamientos a corto plazo que afectan a proyectos nucleares en algunas regiones del mundo.
3. En algunos países europeos en los que anteriormente existían restricciones sobre el uso de la energía nucleoelectrica en el futuro, se observó una tendencia a reconsiderar esas políticas.
4. Siguió existiendo gran interés en iniciar nuevos programas nucleoelectricos. Más de 60 Estados Miembros han expresado al Organismo su interés en considerar la implantación de la energía nucleoelectrica y, en 2009, el Organismo realizó sus primeras misiones de examen integrado de la infraestructura nuclear en Jordania, Indonesia y Viet Nam.
5. Las estimaciones de recursos convencionales de uranio conocidos (a menos de 130 dólares/kg de U) aumentaron ligeramente, debido sobre todo a los incrementos notificados por Australia, el Canadá y Namibia. Los precios al contado del uranio se redujeron, y se espera que los datos finales para 2009 reflejen el consiguiente descenso de las actividades de prospección y explotación de uranio.
6. La Junta de Gobernadores ha autorizado al Director General del Organismo a firmar un acuerdo con la Federación de Rusia para crear una reserva internacional de uranio poco enriquecido (UPE). Contendría 120 toneladas de UPE que estarían a disposición de cualquier país afectado por una interrupción por motivos no comerciales de su suministro de UPE. En marzo de 2010 se firmó el acuerdo entre el Organismo y la Federación de Rusia.
7. La Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB) eligió Östhammar como emplazamiento de un repositorio geológico final de combustible gastado, después de un proceso de selección de casi 20 años. En los EE. UU., el Gobierno decidió poner fin al desarrollo del repositorio permanente de desechos de actividad alta de Yucca Mountain, mientras prosigue el proceso de concesión de licencias. Tiene previsto crear una comisión para evaluar alternativas.
8. Respecto a la fusión nuclear, concluyeron los preparativos del emplazamiento del Reactor termonuclear experimental internacional (ITER) y se firmaron acuerdos de contratación para las instalaciones por valor de unos 1 500 millones de euros, aproximadamente un tercio de las contrataciones totales previstas. En los EE. UU. finalizó la construcción de la Instalación nacional de ignición.

9. La seguridad alimentaria, la salud humana, incluida la prevención y el control de enfermedades, la protección ambiental, la gestión de los recursos hídricos y el uso de radioisótopos y radiaciones son campos en los que las técnicas nucleares e isotópicas están realizando valiosas aportaciones al desarrollo socioeconómico de muchos países del mundo.

10. En la esfera de la agricultura y la alimentación, las técnicas nucleares, junto con técnicas complementarias, se están utilizando para hacer frente a un creciente número de plagas de insectos que amenazan la productividad agrícola y el comercio internacional. El análisis de los recursos genéticos del ganado es una alta prioridad internacional ya que ofrece opciones cruciales para la expansión sostenible de la producción pecuaria. Las técnicas nucleares pueden ayudar en estas actividades. Debido al aumento de la preocupación por las emisiones de carbono, la opción de almacenar (secuestrar) carbono en el suelo está despertando un interés creciente. Los instrumentos isotópicos son útiles para determinar la capacidad de secuestro de superficies terrestres específicas.

11. El diagnóstico por imágenes sigue siendo uno de los campos más innovadores de la medicina moderna. Las técnicas nucleares como la tomografía por emisión de positrones (PET), la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT) y la tomografía computarizada (TC) están fusionándose cada vez más en sistemas de imaginología híbridos como SPECT/TC y PET/TC. Esos sistemas de imaginología híbridos permiten una investigación combinada tanto de la anatomía como de la función de los órganos humanos. La imaginología híbrida tiene una importancia creciente en las esferas de la cardiología y el cáncer. Los recientes resultados de la aplicación de técnicas de isótopos estables para evaluar la biodisponibilidad de hierro y carotenoides provitamina A en grupos de población vulnerables ayudarán a los responsables de la formulación de políticas, a los profesionales de la salud y a otros interesados directos a determinar los pasos siguientes y las opciones de respuesta.

12. En el ámbito de la gestión de los recursos naturales, las técnicas nucleares están utilizándose para evaluar la cantidad de agua dulce que llega a las zonas costeras a través de acuíferos costeros. Esto es relevante porque esas descargas submarinas de aguas subterráneas (SGD) pueden ser importantes fuentes de agua dulce, así como, en algunos casos, una fuente de contaminantes en zonas costeras. Los isótopos estables se utilizan cada vez más para entender la distribución espacial de varios procesos que afectan a la disponibilidad y la calidad del agua subterránea tanto a escala local como regional. Esa información puede aportar una referencia clave para evaluar los efectos del cambio climático y de otros factores en los recursos de aguas subterráneas.

13. La demanda cada vez mayor de radioisótopos para aplicaciones médicas e industriales así como los avances en tecnologías conexas atrajeron la atención a escala mundial en 2009 debido al alto grado de la cobertura mediática de la severa escasez de suministros de isótopos médicos, en especial de molibdeno 99 producido por fisión. Las nuevas aplicaciones de las tecnologías de la radiación continúan desarrollándose, como pone de manifiesto el reciente uso de una nueva metodología de haz de electrones que ofrece una alternativa sin componentes químicos para la esterilización o desinfección de materiales de embalaje y contenedores asépticos.

A. Aplicaciones eléctricas

A.1. La energía nucleoelectrica en la actualidad

14. Para la energía nucleoelectrica, 2009 fue el segundo año consecutivo en que se inició la construcción de un elevado número de reactores nuevos y se realizaron revisiones al alza de las proyecciones sobre el crecimiento de la energía nucleoelectrica en el futuro. Aunque 2008 se distinguió por ser el primer año desde 1955 en que no se conectaron reactores nuevos a la red, en 2009 hubo dos nuevas conexiones: Tomari-3 (866 MW(e)) en el Japón y Rajastán-5 (202 MW(e)) en la India.

15. A 1 de enero de 2010, había en funcionamiento 437 reactores nucleares de potencia en todo el mundo, con una capacidad total de 371 GW(e) (véase el cuadro A-1). La cifra es inferior en unos 1,5 GW(e) a la registrada al final de 2008 debido, en parte, a tres retiradas de servicio: Hamaoka-1 y -2 en el Japón, e Ignalina-2 en Lituania, que fue retirada al final del año.

16. Se iniciaron doce construcciones: Hongyanhe-3 y -4, Sanmen-1 y -2, Yangjiang-2, Fuqing-2, Fangjiashan-2, Haiyang-1 y Taishan-1 (todos de 1 000 MW(e)) en China; Shin-Kori-4 (1 340 MW(e)) en la República de Corea; y Novovoronezh 2-2 (1 085 MW(e)) y Rostov-3 (1 011 MW(e)) en la Federación de Rusia. Se reanudaron los trabajos de construcción en Mochovce-3 y -4 (ambos de 405 MW(e)) en Eslovaquia. Esto se contrapone al inicio de diez construcciones en 2008, y de ocho construcciones más la reanudación de los trabajos de construcción de un reactor en 2007.

17. Por tanto, al final del año había en construcción un total de 56 reactores, la cifra más alta desde 1992.

18. La actual expansión, así como las perspectivas de crecimiento a corto y largo plazo, siguen centradas en Asia. De las doce construcciones iniciadas en 2009, diez fueron en Asia. Como se muestra en el cuadro A-1, 36 de los 56 reactores en construcción están en Asia, así como 30 de los últimos 41 reactores nuevos que se han conectado a la red. El objetivo de China de llegar a 40 GW(e) de capacidad nucleoelectrica en 2020 se contrapone a los 8,4 GW(e) actuales. El Primer Ministro indio, Manmohan Singh, en la apertura de la Conferencia Internacional sobre los usos de la energía atómica con fines pacíficos celebrada en Nueva Delhi en septiembre, dijo que la India podría llegar a instalar 470 GW(e) antes de 2050.

19. En Finlandia, se presentaron solicitudes de “decisiones de principio” al Gobierno en relación con la construcción de dos nuevos reactores nucleares. Sin embargo, la construcción de Olkiluoto-3 tenía retraso respecto a lo previsto.

20. La reciente tendencia a aumentar la potencia y a renovar o prorrogar las licencias de numerosos reactores en funcionamiento se mantuvo en 2009. En los EE. UU., la Comisión Reguladora Nuclear (NRC) aprobó ocho nuevas prórrogas de licencias de 20 años (por una vida útil total autorizada de 60 años), lo que eleva a 59 el número total de prórrogas concedidas. La Inspección de Instalaciones Nucleares del Reino Unido aprobó los nuevos exámenes periódicos de la seguridad de dos reactores, por los que se autoriza un período adicional de funcionamiento de diez años. Se concedió una prórroga de la licencia de la central nuclear de Garoña en España por cuatro años, y las licencias de explotación de las centrales nucleares de Bruce A y Bruce B en el Canadá se prorrogaron cinco años más.

21. En algunos países europeos en los que anteriormente existían restricciones sobre el uso de la energía nuclear en el futuro, se observó una tendencia a reconsiderar esas políticas.

22. Aunque la crisis financiera mundial que comenzó en el segundo semestre de 2008 no ha afectado a las proyecciones generales relativas a la energía nucleoelectrica (véase la sección A.2), se ha citado como un factor que contribuye a las demoras y aplazamientos a corto plazo que sufren los proyectos nucleares en algunas regiones del mundo. Vattenfall anunció en junio que dejaba en suspenso por un período de 12 a 18 meses las decisiones sobre la construcción de nuevas instalaciones nucleares en el

Reino Unido, aludiendo a la recesión económica y la situación del mercado. Se alegaron dificultades de financiación en relación con la retirada de las compañías eléctricas GDF SUEZ y RWE del proyecto de Belene en Bulgaria. La Federación de Rusia anunció que durante los próximos años, debido a la crisis financiera y a una proyección menor del consumo de electricidad, frenaría sus planes de expansión de dos reactores al año a uno. Ontario (Canadá) suspendió las actividades de adquisición relacionadas con dos nuevos reactores nucleares de potencia que debían construirse en su emplazamiento de Darlington debido a la reducida demanda de electricidad. En los EE. UU., Exelon aplazó los principales trabajos previos a la construcción de una nueva central nuclear en Texas, aduciendo incertidumbres en la economía interna. A finales de 2009, se habían suspendido, a petición de los solicitantes, los exámenes de 5 de los 28 reactores a que se hacen referencia en 18 solicitudes de licencia combinada presentadas en los EE.UU. En Sudáfrica, Eskom amplió en dos años, hasta 2018, el calendario del siguiente reactor que prevé construir.

23. No obstante, como en el caso de las proyecciones de crecimiento en el futuro (véase la sección A.2), el interés por iniciar nuevos programas nucleoelectricos sigue siendo elevado. Más de 60 Estados Miembros han expresado al Organismo su interés en estudiar la posibilidad de implantar la energía nucleoelectrica. El número de proyectos de cooperación técnica del Organismo relativos a la implantación de la energía nucleoelectrica se triplicó en 2009. Se publicó un folleto sobre un nuevo servicio del Organismo, titulado *INIR Integrated Nuclear Infrastructure Review Missions: Guidance on Preparing and Conducting INIR Missions*, y se realizaron las primeras misiones del INIR en Jordania, Indonesia y Viet Nam. Las misiones del INIR consisten en exámenes por homólogos coordinados por el Organismo que llevan a cabo grupos de expertos internacionales basándose en el documento *Evaluation of the Status of National Nuclear Infrastructure Development*, publicado por el Organismo a finales de 2008. El objetivo y el alcance de cada uno de esos exámenes se ajustan a las necesidades del Estado Miembro solicitante. Al igual que en el caso de la autoevaluación, las misiones del INIR están destinadas a ayudar a un país a determinar las diferencias entre los hitos y el grado actual de desarrollo de su programa, y a salvar con eficacia esas diferencias.

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

PAÍS	Reactores en funcionamiento		Reactores en construcción		Electricidad nuclear suministrada en 2009		Experiencia operacional total hasta 2009	
	Nº de unidades	Total MW(e)	Nº de unidades	Total MW(e)	TW·h	% del total	Años	Meses
ALEMANIA	17	20 480			127,7	26,1	751	5
ARGENTINA	2	935	1	692	7,6	7,0	62	7
ARMENIA	1	375			2,3	45,0	35	8
BÉLGICA	7	5 902			45,0	51,7	233	7
BRASIL	2	1 884			12,2	2,9	37	3
BULGARIA	2	1 906	2	1 906	14,2	35,9	147	3
CANADÁ	18	12 569			85,3	14,8	582	2
CHINA	11	8 438	20	19 920	65,7	1,9	99	3
COREA, REPÚBLICA DE	20	17 705	6	6 520	141,1	34,8	339	7
ESLOVAQUIA	4	1 762	2	782	13,1	53,5	132	7
ESLOVENIA	1	666			5,5	37,8	28	3
ESPAÑA	8	7 450			50,6	17,5	269	6
ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA	104	100 747	1	1 165	796,9	20,2	3 499	11
FEDERACIÓN DE RUSIA	31	21 743	10	8 007	152,8	17,8	994	7
FINLANDIA	4	2 696	1	1 600	22,6	32,9	123	4
FRANCIA	59	63 260	1	1 600	391,8	75,2	1 700	2
HUNGRÍA	4	1 889			14,3	43,0	98	2
INDIA	18	3 987	5	2 708	14,8	2,2	318	5
IRAN, REPÚBLICA ISLÁMICA DEL			1	915				
JAPÓN	54	46 823	1	1 325	263,1	29,2	1 440	8
MÉXICO	2	1 300			10,1	4,8	35	11
PAÍSES BAJOS	1	487			4,0	3,7	65	0
PAKISTÁN	2	425	1	300	2,6	2,7	47	10
REINO UNIDO	19	10 137			62,9	17,9	1 457	8
REPÚBLICA CHECA	6	3 678			25,7	33,8	110	10
RUMANIA	2	1 300			10,8	20,6	15	11
SUDÁFRICA	2	1 800			11,6	4,8	50	3
SUECIA	10	9 036			50,0	37,4	372	6
SUIZA	5	3 238			26,3	39,5	173	10
UCRANIA	15	13 107	2	1900	78,0	48,6	368	6
Total ^{b, c}	437	370 705	56	51 940	2 558,3	14%	13 913	0

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

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

Lituania: 10,0 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 76,2% del total de electricidad allí producida;

Taiwán (China): 6 unidades, 4 980 MW(e) en funcionamiento; 2 unidades, 2 600 MW(e) en construcción; 39,9 TW·h de generación de electricidad nuclear, que representan el 20,7% del total de electricidad allí producida.

c. La experiencia operacional total también incluye las centrales en régimen de parada de Italia (81 años), Kazajistán (25 años y 10 meses), Lituania (43 años y 6 meses) y Taiwán (China) (170 años y 1 mes).

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

24. El Organismo actualiza anualmente sus proyecciones bajas y altas en relación con el crecimiento mundial de la energía nucleoelectrica. A pesar de la crisis financiera que comenzó a finales de 2008, en 2009 se revisaron al alza tanto las proyecciones bajas como las altas. En la proyección baja actualizada, la capacidad nucleoelectrica mundial alcanza 511 GW(e) en 2030, frente a una capacidad de 371 GW(e) a finales de 2009. En la proyección alta actualizada, esa capacidad se eleva a 807 GW(e). Estas proyecciones revisadas para 2030 son un 8% más altas que las proyecciones hechas en 2008.

25. La mayor revisión al alza de las proyecciones se registra para la región del Lejano Oriente, que abarca a China, el Japón y la República de Corea. En el caso de América del Norte y el Sudeste de Asia y el Pacífico, las proyecciones se revisaron ligeramente a la baja

26. Aunque la crisis financiera que se inició a fines de 2008 afectó las perspectivas de algunos proyectos nucleoelectricos, sus repercusiones fueron distintas en diferentes partes del mundo. La pauta regional de las revisiones de las proyecciones refleja, en parte, las distintas repercusiones de la crisis financiera en las diferentes regiones. La revisión general al alza tanto de las proyecciones bajas como de las altas refleja la opinión de los expertos reunidos por el Organismo de que los factores a mediano y largo plazo en los que se basaban las crecientes expectativas respecto de la energía nucleoelectrica no habían cambiado considerablemente. El comportamiento y la seguridad de las centrales nucleares continuaron siendo buenos. Persistieron las preocupaciones respecto del recalentamiento del planeta, la seguridad de suministro de energía y los elevados e inestables precios de los combustibles fósiles. Las proyecciones de todos los estudios siguieron indicando un aumento sostenido de la demanda de energía a mediano y largo plazo.

27. Lo que cambió desde las proyecciones hechas en 2008 fue que los compromisos de los gobiernos, las compañías de electricidad y los vendedores respecto de los planes que habían anunciado, así como las inversiones que ya estaban haciendo en el marco de esos planes, comenzaron a percibirse en general con el tiempo como más firmes, lo que redundó en un aumento de la confianza. Otro cambio fue que el levantamiento de las restricciones impuestas en el pasado por los suministradores nucleares al comercio nuclear permitirá a la India acelerar su planes de expansión de la energía nucleoelectrica.

28. Las proyecciones nucleares del Organismo no fueron las únicas que se revisaron en 2009. También actualizaron sus proyecciones ese año la Administración de Información sobre Energía (EIA) de los Estados Unidos, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) de la OCDE y la Asociación Nuclear Mundial. La banda de las proyecciones de la EIA se estrechó ligeramente, la de la Asociación Nuclear Mundial se amplió algo y la de la AIE se revisó muy ligeramente al alza (tanto el valor bajo como el alto aumentaron). En la figura A-1 se comparan las bandas de las proyecciones nucleares realizadas en 2009 por la EIA, la AIE, el OIEA y la Asociación Nuclear Mundial.

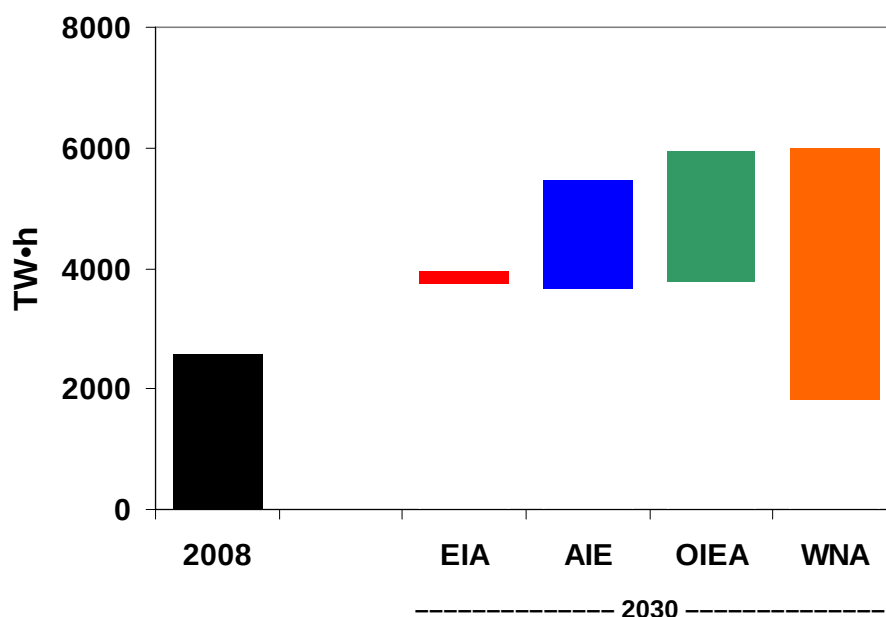


Fig. A-1. Comparación de las proyecciones nucleares realizadas por la EIA, la AIE, el OIEA y la Asociación Nuclear Mundial.

A.3. Ciclo del combustible²

A.3.1. Recursos y producción de uranio³

29. Los recursos de uranio convencionales identificados, recuperables a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, se calculan actualmente en 5,7 millones de toneladas métricas de uranio (Mt U), lo que representa un aumento de más de 0,2 Mt U respecto de 2007, como resultado principalmente de los aumentos notificados por Australia, el Canadá y Namibia. Hay otros 0,7 Mt U de recursos de uranio convencionales identificados recuperables a costos que oscilan entre 130 y 260 dólares/kg de U. A modo de referencia, el precio al contado del uranio en 2009 fluctuó entre 110 y 135 dólares/kg de U y registró una tendencia a disminuir de manera muy gradual.

30. Los recursos convencionales no descubiertos se estiman en 6,3 Mt U a un costo inferior a 130 dólares/kg de U, más otros 0,2 Mt U a costos que oscilan entre 130 y 260 dólares/kg de U. Ello incluye tanto los recursos que se prevé que se encuentren en yacimientos conocidos o cerca de ellos como los recursos más hipotéticos que se considera que existen en zonas geológicamente favorables, pero aún inexploradas. También hay otros 3,6 Mt U estimados de recursos hipotéticos para los cuales no se han especificado los costos de producción.

31. Los recursos de uranio no convencionales y el torio amplían aún más la base de recursos. Los recursos no convencionales comprenden el uranio presente en el agua de mar y los recursos de los que el uranio sólo se puede recuperar como producto secundario de poca importancia. Muy pocos países notifican en la actualidad sus recursos no convencionales. Las estimaciones realizadas en el pasado del uranio potencialmente recuperable asociado a los fosfatos, los minerales no ferrosos, la carbonatita, el esquisto negro y el lignito son del orden de 10 Mt U. En el pasado se realizaron importantes actividades de producción a partir de ácido fosfórico en Bélgica, Estados Unidos de América y

² Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas al ciclo del combustible en las secciones pertinentes del último Informe Anual del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) y en <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/index.html>.

³ Esta sección se basa en la próxima edición del “Libro Rojo” (AEN/OCDE-OIEA, *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*, OCDE, París (2010)).

Kazajstán, y como resultado del aumento reciente de los precios del uranio, hay un renovado interés en esta esfera en Australia, Brasil, Estados Unidos de América, Francia, India, Jordania, Marruecos y Túnez. En China se está estudiando la extracción de uranio a partir de pilas de cenizas de carbón provenientes de la producción de energía térmica. El torio, que también puede utilizarse como fuente de combustible nuclear, es abundante, se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y, en muchos países, es de fácil explotación. Los recursos mundiales se han estimado en unas 6 toneladas métricas de torio. Aunque el torio se ha utilizado como combustible a escala de demostración, se requieren trabajos mucho más exhaustivos para poderlo considerar en pie de igualdad con el uranio.

32. Se estima que el agua de mar contiene 4 500 Mt U, pero a una concentración muy baja de 3,3 partes por miles de millones. Ello significa que se tendrían que procesar 330 000 toneladas de agua para producir un kg de uranio. El costo de producción es actualmente demasiado elevado. En los decenios de 1970 y 1980 se llevaron a cabo investigaciones en Alemania, Estados Unidos, Italia, Japón y Reino Unido. De los actuales experimentos marinos mediante pruebas de banco realizados en el Japón se desprende que sería posible extraer uranio de adsorbentes tipo trenza anclados al fondo del mar, con una capacidad de producción de 1 200 t U por año a un costo estimado de unos 300 dólares/kg U. En Francia y la India también se realizan investigaciones en el laboratorio.

33. Vista la reducción de los precios al contado del uranio con respecto a 2008, se prevé que los datos definitivos correspondientes a 2009, cuando se disponga de ellos, indicarán una disminución de las actividades de prospección y explotación de uranio. Esta disminución se prevé tanto en los países que han explorado y explotado yacimientos de uranio en el pasado, como en muchos países que se inician en la prospección de uranio.

34. La producción mundial de uranio en 2008 fue de 43 800 t U, lo que representa un incremento del 6% respecto de la cifra de 2007 de 41 300 t U. Se estima que la producción aumentará en 2009 a 49 000 t U. Como se observa en la figura A-2, el Canadá, Kazajstán y Australia representaron casi el 60% de la producción mundial en 2008. Estos tres países, junto con los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Namibia, Níger y Uzbekistán, representaron el 93% de la producción.

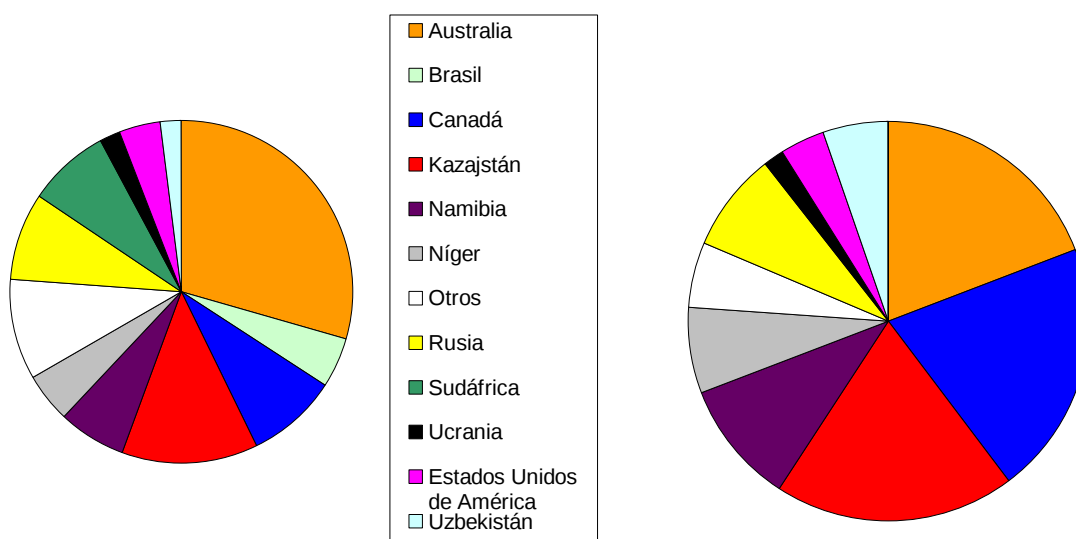


Fig. A-2. Distribución geográfica de los recursos de uranio convencionales identificados, recuperables a menos de 130 dólares/kg U (izquierda), y de la producción de uranio en 2008 (derecha).

35. Se esperaba que la producción de uranio prevista para 2009 sólo fuera suficiente para atender a un 75% de las necesidades estimadas de los reactores del mundo de 65 400 t U. Del resto respondieron cinco fuentes secundarias: las reservas de uranio natural, las reservas de uranio enriquecido, el uranio reprocesado a partir de combustible gastado, el combustible de mezcla de óxidos (MOX) con uranio 235 parcialmente sustituido por plutonio 239 a partir de combustible gastado reprocesado, y el nuevo enriquecimiento de residuos de uranio empobrecido (el uranio empobrecido contiene menos del 0,7% de uranio 235). Al ritmo de consumo estimado para 2009, la duración prevista de los 5,7 Mt U

de recursos convencionales identificados recuperables a menos de 130 dólares/kg U es de casi 90 años, lo cual es positivo si se compara con las reservas de 30 a 50 años correspondientes a otros productos básicos (por ejemplo, cobre, zinc, petróleo y gas natural).

A.3.2. Conversión, enriquecimiento y fabricación de combustible

36. La capacidad de conversión mundial total es de unas 76 000 toneladas de uranio natural anuales en el caso del hexafluoruro de uranio (UF_6), y de 4 500 t U anuales en el del dióxido de uranio (UO_2). La demanda actual de conversión de UF_6 es de unas 62 000 t U anuales. En 2009, AREVA inició la construcción de sus nuevas instalaciones de conversión COMURHEX II, que sustituirán las antiguas instalaciones de Malvési y Pierrelatte (Francia). Las capacidades de diseño de COMURHEX II para la conversión de tetrafluoruro de uranio (UF_4) y de UF_6 son de 15 000 t U anuales antes de 2012. En 2008, Cameco Corporation y Kazatomprom anunciaron la creación de una empresa conjunta para desarrollar una instalación de conversión de UF_6 de 12 000 toneladas en Kazajstán.

37. La capacidad de enriquecimiento mundial total es actualmente de unos 60 millones de unidades de trabajo de separación (UTS) anuales, frente a una demanda total de aproximadamente 45 millones de UTS anuales. Hay en construcción tres nuevas instalaciones de enriquecimiento a escala comercial, a saber, Georges Besse II en Francia y, en los Estados Unidos, la planta de centrifugación de los Estados Unidos de América (ACP) y la Instalación nacional de enriquecimiento (NEF). En todas se utiliza el enriquecimiento por centrifugación. Las instalaciones Georges Besse II y ACP están destinadas a permitir la retirada del servicio de las plantas de enriquecimiento por difusión gaseosa actualmente existentes. En Georges Besse II la rotación de la primera cascada de centrifugadoras tuvo lugar en diciembre de 2009. En la NEF la primera centrifugadora se instaló en septiembre de 2009. Respecto a la ACP, siguen existiendo algunas dudas acerca de si la tecnología estará preparada.⁴ El CNR de los Estados Unidos inició los exámenes oficiales de dos nuevas instalaciones, la instalación de enriquecimiento de Eagle Rock propuesta por AREVA en Idaho y la instalación de enriquecimiento por láser propuesta por Global Laser Enrichment en Carolina del Norte.

38. Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL) espera comenzar la explotación comercial de las cascadas de centrifugadoras mejoradas de Rokkasho-mura en torno a 2011 y aumentar la capacidad de las 150 000 UTS actuales a 1,5 millones de UTS antes de 2020. La capacidad actual de enriquecimiento de China, utilizando centrifugadoras rusas, es de 1,3 millones de UTS, y Rusia y China acordaron recientemente añadir 0,5 millones de UTS. Existen instalaciones de enriquecimiento limitado para atender las necesidades nacionales en la Argentina, el Brasil, la India y el Pakistán. Ucrania se unió a Armenia, Kazajstán y la Federación de Rusia como miembro del Centro Internacional de Enriquecimiento de Uranio (IUEC), que se creó en 2007 en Angarsk (Federación de Rusia).

39. En noviembre, la Junta de Gobernadores autorizó al Director General del Organismo a firmar un acuerdo con la Federación de Rusia para crear una reserva internacional de uranio poco enriquecido (UPE). Contendría 120 toneladas de UPE que estarían a disposición de cualquier país que sufriera una interrupción de su suministro de UPE por motivos no comerciales. El Director General tendría competencia exclusiva para autorizar el suministro de UPE de la reserva, con arreglo a los criterios establecidos en el acuerdo con la Federación de Rusia. La Federación de Rusia estaría obligada a emitir todas las autorizaciones y licencias necesarias para exportar el UPE, y el país receptor del UPE pagaría el precio de mercado vigente en ese momento. En marzo de 2010 se firmó el acuerdo entre el Organismo y la Federación de Rusia.

40. La capacidad mundial total de fabricación de combustible es actualmente de unas 13 000 toneladas de uranio (t U) anuales (uranio enriquecido) en el caso del combustible para reactores de agua ligera (LWR), y de unas 4 000 t U anuales (uranio natural) en el caso del combustible para reactores de agua pesada a presión (PHWR). La demanda total es de unas 10 400 t U anuales. Se están realizando algunas actividades de ampliación de instalaciones existentes, por ejemplo, en China, la República de Corea y los

⁴ El Departamento de Energía de los EE. UU. aplazó su examen de una solicitud de garantía de crédito a fin de que pudieran abordarse cuestiones relativas a la preparación de la tecnología de enriquecimiento de la ACP.

Estados Unidos de América. La capacidad de fabricación actual de combustible de MOX es de unas 250 toneladas de metal pesado (t HM), principalmente en Francia, la India y el Reino Unido con algunas instalaciones más pequeñas en el Japón y la Federación de Rusia. Se está construyendo capacidad adicional de fabricación de combustible de MOX en los Estados Unidos de América (a efectos de utilizar excedentes de plutonio apto para fabricar armas). Genkai-3 en el Japón entró en funcionamiento con combustible de MOX en noviembre, convirtiéndose en el primer reactor japonés que utiliza ese combustible. A escala mundial, 31 reactores térmicos utilizan actualmente combustible de MOX.

A.3.3. Parte final del ciclo del combustible

41. La cantidad total de combustible gastado descargado en todo el mundo es de unas 320 000 toneladas de metal pesado (t HM). De esa cantidad, aproximadamente 95 000 t HM ya han sido reprocesadas, y en torno a 225 000 t HM se encuentran almacenadas en las piscinas de almacenamiento de combustible gastado de los reactores o en instalaciones de almacenamiento fuera de los reactores. Las instalaciones de almacenamiento fuera se amplían periódicamente mediante la adición de módulos a las instalaciones de almacenamiento en seco ya existentes y la construcción de nuevas instalaciones. La capacidad total mundial de reprocesamiento es de unas 5 000 t HM anuales. La finalización de la nueva planta de reprocesamiento de Rokkasho (Japón) se retrasó hasta 2010.

42. La Compañía Sueca de Gestión del Combustible y los Desechos Nucleares (SKB) eligió Östhammar para el emplazamiento de un repositorio geológico final de combustible gastado, tras un proceso de casi 20 años en el que la lista de emplazamientos solicitantes quedó reducida a dos en 2002. Ulteriores investigaciones del emplazamiento concluyeron que el lecho rocoso de Östhammar era más estable y contenía menos agua que el de Oskarshamn, el otro emplazamiento posible. SKB planea solicitar una licencia de construcción en 2010 con el objetivo de comenzar la explotación en 2023.

43. Las investigaciones del emplazamiento de los repositorios de Olkiluoto en Finlandia y de la región de Bure en Francia continuaron conforme al calendario previsto y se prevé que la explotación comience en 2020 y 2025 respectivamente.

44. En los Estados Unidos de América, el Gobierno decidió poner fin al desarrollo de un repositorio permanente de desechos de actividad alta en Yucca Mountain, a la vez que prosigue el proceso de concesión de licencias. El Gobierno planea crear una comisión para evaluar alternativas.

45. En el Reino Unido, se ha iniciado un proceso voluntario de selección de un emplazamiento. Dos municipios de la zona de Sellafield han expresado su interés.

46. En 2009, tras la finalización de la clausura del reactor nuclear de potencia de Rancho Seco en California (Estados Unidos de América), el número de reactores de potencia desmantelados completamente en todo el mundo se situó en 15. Cincuenta y un reactores en régimen de parada se encontraban en proceso de desmantelamiento, 48, en modalidad de confinamiento seguro, tres, sepultados, y en el caso de otros seis aún no se habían especificado estrategias de clausura.

A.4. Otros factores que afectan al crecimiento de la energía nucleoelectrónica

A.4.1. Aspectos económicos

47. En el *Examen de la tecnología nuclear 2009* se informó que el intervalo de las estimaciones de costos de las nuevas centrales nucleares había aumentado en su extremo superior en comparación con el intervalo de 1 200-2 500 dólares por kW(e) que se había notificado en el *Examen de la tecnología nuclear 2006*. El año pasado, las estimaciones de costos se mantuvieron en niveles

elevados. La figura A-3 presenta las últimas estimaciones de costos inmediatos elaboradas por el Organismo, agrupadas por regiones⁵.

48. El patrón general de la figura es coherente con la observación de que la experiencia reduce la incertidumbre de costos. Aunque los bajos costos de Asia obedecen a varias razones (por ejemplo, costos de aportaciones generalmente menores que en otras partes, y presupuestos de costos que en ocasiones sólo incluyen componentes importados), también es la región con la experiencia más reciente en la construcción de reactores nuevos.

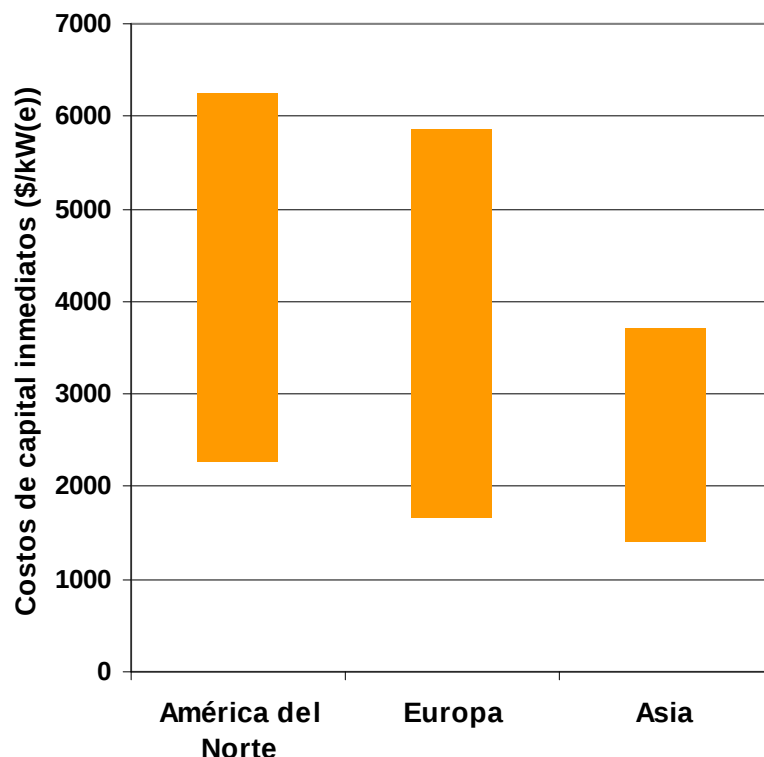


Fig. A-3. Intervalos de costos inmediatos estimados por región en el período 2007-2009 (dólares 2008)⁶.

49. A medida que se han notificado más estimaciones de costos relativas a proyectos específicos sobre energía nucleoelectrica, como las que se presentan en la figura A-3, el número de estimaciones académicas de costos de la energía nucleoelectrica publicadas ha descendido. No obstante, en 2009 se publicaron algunos estudios de ese tipo.

50. El Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) actualizó un estudio de costos referido a los Estados Unidos que había elaborado en 2003⁷ – su costo inmediato estimado actualizado de 4 000 dólares/kW(e) se acerca mucho al promedio de las estimaciones para América del Norte de la

⁵ Los datos se han tomado de estudios de costos e informaciones relativas a la industria que están a disposición del público. Todas las salvedades mencionadas en el *Examen de la tecnología nuclear 2009* son aplicables: las diferencias en las estimaciones de los costos pueden reflejar distintas definiciones de los costos inmediatos, si la estimación es para un emplazamiento totalmente nuevo o para uno en el que ya existen reactores, si el emplazamiento está en una zona de actividad sísmica, las variaciones de los costos de personal y de los materiales, distintos requisitos de localización, distintos porcentajes de componentes de la central fabricados o adquiridos localmente, distintos subsidios y garantías financieras, diferencias en los requisitos de reglamentación y su previsibilidad, distintos arreglos contractuales, distintos tipos de cambios y expectativas respecto de la inflación, y distintas tecnologías.

⁶ El gráfico refleja 85 estimaciones de los costos inmediatos, de las cuales 26 corresponden a América del Norte, 32 a Europa y 27 a Asia.

⁷ Instituto Tecnológico de Massachusetts, *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study* (2003). Disponible en: <http://web.mit.edu/nuclearpower/>

figura A-3. El estudio actualizado del MIT concluye que, en los Estados Unidos, el costo de capital será superior en el caso de la energía nucleoelectrica que en el de la procedente de la combustión del carbón o del gas natural debido a la falta de experiencia reciente y a la consiguiente incertidumbre de los inversores. Sin esa “prima de riesgo”, el costo normalizado de la electricidad (LCOE) estimado procedente de la energía nucleoelectrica sería comparable al LCOE de la energía procedente de la combustión del carbón o del gas, incluso descontando los impuestos o derechos sobre las emisiones de dióxido de carbono e incluyendo un costo inmediato de 4 000 dólares/kW(e). La actual política de los Estados Unidos prevé garantías de crédito y descuentos impositivos por producción para un número limitado de centrales nucleares nuevas, que sirven para compensar la prima de riesgo. No obstante, el estudio concluye que la expansión a largo plazo de la energía nucleoelectrica en los Estados Unidos requerirá la supresión permanente de la prima de riesgo, para lo que es imprescindible un rendimiento satisfactorio demostrado.

51. Un segundo estudio, elaborado por Citigroup Investment Research, estimó que los costos inmediatos de los nuevos reactores nucleares genéricos del Reino Unido se situarían entre 3 700 y 5 200 dólares/kW(e), lo que queda dentro del intervalo de las estimaciones de costos relativas a proyectos europeos específicos que aparecen en la figura A-3. La figura A-3 también incluye las estimaciones de costos notificadas en el estudio recién publicado de la AIE y la AEN de la OCDE, *Projected Costs of Generating Electricity: 2010*. En el estudio se concluyó que las estimaciones de costos inmediatos varían considerablemente de un país a otro debido a las distintas condiciones financieras, técnicas y de la reglamentación. Se informó de que las estimaciones de costos más bajas eran las de Asia, en particular 1 556 dólares/kW(e) de la República de Corea, que ha conectado a la red cuatro nuevos reactores desde el año 2000 y está construyendo seis reactores.

A.4.2. Seguridad⁸

52. Los indicadores de la seguridad, como los publicados por la Asociación Mundial de Explotadores de Instalaciones Nucleares (AMEIN) y reproducidos en las figuras A-4 y A-5, mejoraron notablemente en el decenio de 1990. En los últimos años, la situación se ha estabilizado en algunos ámbitos. Sin embargo, la diferencia entre las esferas de peor y mejor desempeño sigue siendo considerable, lo que proporciona un amplio margen para seguir realizando mejoras.

53. En el *Examen de la seguridad nuclear correspondiente al año 2009* (GC(54)/INF/2) que publica el Organismo se presenta información más detallada sobre la seguridad y los últimos adelantos relacionados con todas las aplicaciones nucleares.

⁸ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del Organismo relativas a la seguridad nuclear en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>), y en la dirección <http://www-ns.iaea.org/>.

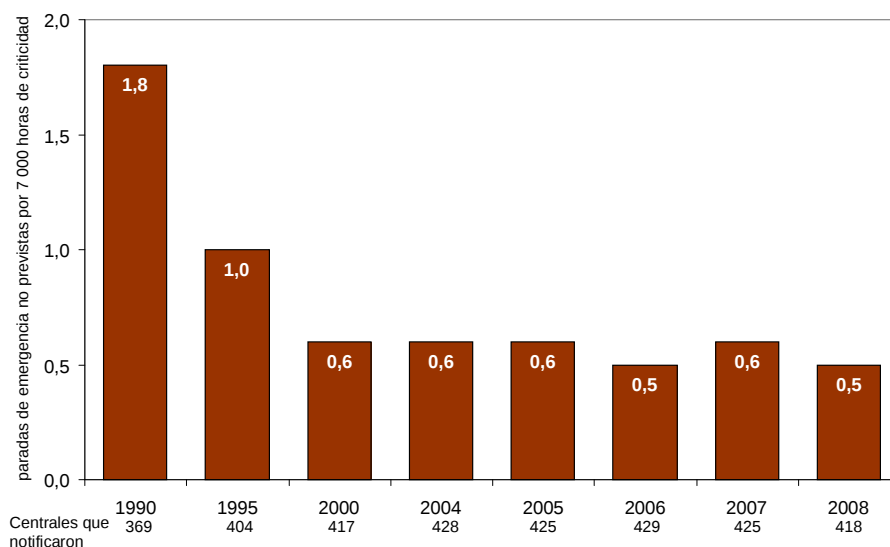


Fig. A-4. Paradas de emergencia no previstas por 7 000 horas de criticidad (fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2008).

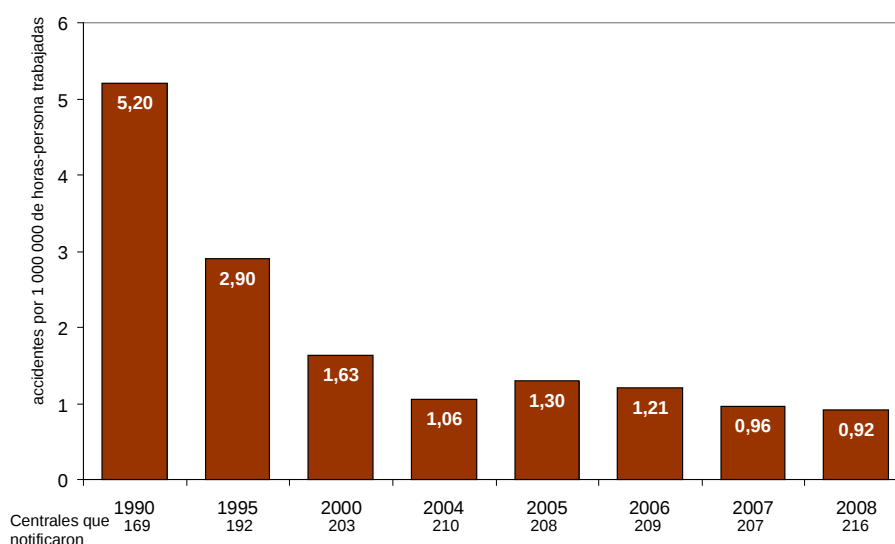


Fig. A-5. Accidentes industriales en centrales nucleares por 1 000 000 de horas-persona trabajadas (fuente: Indicadores de ejecución de la AMEIN 2008).

A.4.3. Desarrollo de recursos humanos

54. No se puede acceder fácilmente a estimaciones de las necesidades de recursos humanos asociadas a las proyecciones examinadas en la sección A.2, y se dispone de pocos datos sobre el número de personas que actualmente cuentan con las diversas aptitudes necesarias en la industria nuclear y sobre el número de las que están siguiendo programas educativos y de capacitación. Respecto al creciente interés por la energía nucleoelectrica, se ha expresado preocupación sobre una posible escasez de personas con las aptitudes que precisa la industria nucleoelectrica, aunque también se ha reconocido que la situación varía de un país a otro por diversos factores, siendo el más importante la solidez de sus programas nucleoelectricos.

55. Las preocupaciones sobre una posible escasez han dado lugar a iniciativas de los gobiernos y la industria encaminadas a atraer a estudiantes y ampliar la enseñanza y la capacitación en el ámbito nuclear. Según los datos disponibles, esas iniciativas parecen tener éxito. Por ejemplo, Électricité de France (EDF) contrató en 2008 a un número de profesionales cuatro veces mayor que en 2006, y espera mantener durante varios años más ese mayor nivel de contratación, apoyado en parte por un

proyecto interno de “renovación de aptitudes”. AREVA contrató a 8 000 ingenieros en 2009 y tiene previsto contratar a varios miles más en los próximos años. Ambas compañías se beneficiarán de un Comité de coordinación de actividades de capacitación en ciencia y tecnología nucleares (C2FSTN), de Francia, creado en 2008 por iniciativa del Presidente. En los Estados Unidos de América, el número de estudiantes de ingeniería nuclear ha aumentado un 46% en los últimos cinco años, gracias al suministro de fondos del Gobierno y a la realización de estudios bienales sobre necesidades de recursos humanos que han aumentado la visibilidad de las carreras del ámbito nuclear. China está elaborando un plan quinquenal encaminado a contratar a 20 000 nuevos ingenieros para su programa nucleoelectrico hasta 2020, y la Nuclear Power Corporation of India está ampliando sus programas de contratación existentes para aumentar a más del doble su plantilla de ingenieros hasta 2017.

56. Si se cumplen las proyecciones altas para la energía nucleoelectrica descritas en la sección A.2, esas iniciativas deberán tener éxito y repetirse varias veces. Ese desafío será considerable. La proyección alta del Organismo, por ejemplo, requeriría la conexión a la red de un promedio de 22 reactores nuevos al año hasta 2030. Éste es mucho más alto que el promedio de 3 reactores nuevos conectados a la red cada año desde 2000 hasta 2009, e incluso un tercio más alto que el promedio anual de 16 reactores nuevos registrado durante el decenio de 1970. Sin embargo, incluso en la proyección alta, la capacidad nucleoelectrica aumenta sólo un 0,5% más rápidamente que la capacidad global de producción de electricidad, lo que significa que las necesidades de recursos humanos asociadas a la energía nucleoelectrica aumentarían de forma ligeramente más rápida que las necesidades de recursos humanos relacionadas con la producción de electricidad a partir del carbón, el gas natural y las energías renovables. El desafío al que se enfrenta la energía nucleoelectrica no es excepcional.

57. Sin embargo, a fin de hacer frente al desafío, se necesitan datos más precisos para estimar:

- las necesidades de personal de distintos países en relación con el diseño, la reglamentación, la fabricación, la construcción, la explotación y el apoyo de centrales nucleares;
- la capacidad de los programas existentes para satisfacer esas necesidades; y
- las inversiones y los plazos necesarios para ampliar los programas de enseñanza y capacitación existentes con el fin de subsanar las insuficiencias de personal previstas.

58. La AEN de la OCDE, centrada en las tendencias de la OCDE según su informe de 2000 titulado *Nuclear Education and Training: Cause for Concern?*, y el Foro Europeo de la Energía Nuclear están desplegando esfuerzos para recopilar información sobre las necesidades de recursos humanos. Sin embargo, se precisa un esfuerzo internacional coordinado en la compilación y el análisis de datos para obtener conclusiones más amplias sobre la cuestión de los recursos humanos en relación con la energía nucleoelectrica a nivel mundial. En consecuencia, el Organismo, en cooperación con la AEN de la OCDE, la AMEIN, la Asociación Nuclear Mundial, el Instituto de Energía Nuclear y el Laboratorio Nacional de Los Álamos de los Estados Unidos de América, el Organismo de Energía Atómica del Japón, el Cogent Sector Skills Council del Reino Unido y otros, anunció en marzo de 2010, en la Conferencia internacional sobre desarrollo de recursos humanos para el establecimiento y la ampliación de programas nucleoelectricos, celebrada en Abu Dhabi, la puesta en marcha de una nueva iniciativa internacional. Se prevé que, como resultado de esta iniciativa, se realicen a escala mundial las siguientes actividades encaminadas a: examinar los recursos humanos de las centrales nucleares existentes, así como realizar un estudio sobre los contratistas y suministradores; examinar la demanda y oferta de recursos humanos para los órganos reguladores nucleares; realizar un estudio sobre las organizaciones de enseñanza y los programas que apoyan la energía nucleoelectrica; elaborar instrumentos de planificación del personal para los países que están considerando iniciar o que han iniciado nuevos programas nucleoelectricos; e integrar lo anterior en una base de datos accesible que pueda utilizarse para elaborar modelos de oferta y demanda mundiales o nacionales de recursos humanos.

B. Fisión avanzada y fusión

B.1. Fisión avanzada⁹

B.1.1. El INPRO y el GIF

59. El Proyecto Internacional sobre ciclos del combustible y reactores nucleares innovadores (INPRO) que ejecuta el Organismo sirve de foro para que los titulares y los usuarios de tecnologías examinen conjuntamente sistemas de energía nuclear innovadores. Desde su creación en 2001, el número de miembros del INPRO ha aumentado a 31 países, que representan el 75% del PIB mundial y el 65% de la población mundial. En 2009, las actividades del INPRO se consolidaron en cinco esferas sustantivas: las evaluaciones del sistema de energía nuclear (NESA) con el empleo de la metodología del INPRO; la visión, los escenarios y las vías mundiales del desarrollo nuclear sostenible; las innovaciones en la tecnología nuclear; las innovaciones en las disposiciones institucionales; y el foro de diálogo del INPRO sobre las innovaciones en la energía nuclear.

60. En 2009 Belarús inició una nueva NESA. Se publicó un manual del usuario de nueve volúmenes relativo a la metodología del INPRO, y en el marco de este proyecto se introdujo un “módulo de apoyo a las NESA”, que abarca la capacitación, las misiones de apoyo y la ayuda en la aplicación, el análisis y la evaluación de los resultados. Asimismo, se publicaron los siguientes documentos: *IAEA Tools and Methodologies for Energy System Planning and Nuclear Energy System Assessments* y *Common User Considerations by Developing Countries for Future Nuclear Energy Systems*. El INPRO concluyó estudios sobre los escenarios mundiales y las tendencias regionales del desarrollo de la energía nuclear en el siglo XXI y sobre las cuestiones jurídicas e institucionales de las centrales nucleares transportables.

61. Mediante un sistema de contratos y acuerdos, el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) coordina las actividades de investigación sobre seis sistemas de energía nuclear de la próxima generación seleccionados en 2002 y descritos en la publicación *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems*: los reactores rápidos refrigerados por gas (GFR), los reactores refrigerados por plomo, los reactores de sales fundidas, los reactores rápidos refrigerados por sodio (SFR), los reactores refrigerados por agua supercrítica (SCWR) y los reactores de muy alta temperatura (VHTR). Ahora bien, la mayoría de los trabajos de diseño en curso relacionados con los distintos sistemas no forman parte del programa del GIF. En la actualidad, el GIF tiene 13 miembros¹⁰.

62. A fines de 2009, nueve miembros del GIF habían firmado el *Acuerdo marco para la colaboración internacional en actividades de investigación y desarrollo relacionadas con los sistemas de energía nuclear de la Generación IV*: Canadá, China, Estados Unidos de América, Euratom, Francia, Japón, República de Corea, Sudáfrica y Suiza. El acuerdo marco define los mecanismos de colaboración del GIF, a saber, los acuerdos sobre sistemas y los acuerdos sobre proyectos. Ya existen acuerdos sobre sistemas en el caso de cuatro de los seis sistemas seleccionados: los GFR, los SCWR, los SFR y los VHTR. En 2009, el Ministerio de Ciencia y Tecnología de China se adhirió al acuerdo

⁹ Se puede consultar información más detallada sobre las actividades del OIEA relativas a los reactores de fisión avanzada en las secciones pertinentes del Informe Anual para 2009 del OIEA (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>). Véanse también los documentos del Organismo Internacional de Energía Atómica titulados *Terms for Describing New, Advanced Nuclear Power Plants*, IAEA-TECDOC-936 (1997); *Status of Liquid Metal Cooled Fast Reactor Technology*, IAEA-TECDOC-1083 (1999); *Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Technology*, IAEA-TECDOC-1198 (2001); *Heavy Water Reactors - Status and Projected Development*, Technical Reports Series No. 407 (2002); *Review of National Accelerator Driven System Programmes for Partitioning and Transmutation*, IAEA-TECDOC-1365 (2003); *Status of Advanced Light Water Reactor Designs: 2004*, IAEA-TECDOC-1391 (2004); *Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs: 2005*, IAEA-TECDOC-1485 (2006); *Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling*, IAEA-TECDOC-1536 (2007); *Liquid Metal Cooled Reactors: Experience in Design and Operation*, IAEA-TECDOC-1569 (2007); y *Advanced Applications of Water Cooled Nuclear Power Plants*, IAEA-TECDOC-1584 (2008).

¹⁰ Argentina, Brasil, Canadá, China, Estados Unidos de América, Euratom, Federación de Rusia, Francia, Japón, República de Corea, Reino Unido, Sudáfrica y Suiza.

sobre sistemas respecto de los SFR, para los que también entró en vigor un cuarto acuerdo sobre proyectos en materia de seguridad y explotación.

63. El Organismo y el GIF cooperan en los esfuerzos por evitar duplicaciones y crear sinergias. Esa cooperación comprende el uso por el Organismo del modelo ECONS de evaluación económica del GIF para calcular los costos de los reactores refrigerados por gas y el uso por el GIF del modelo de evaluación económica del Organismo para el hidrógeno producido con técnicas nucleares (HEEP). El GIF coopera igualmente en el proyecto coordinado de investigación del Organismo sobre el comportamiento de la transferencia de calor y la validación de códigos termohidráulicos para reactores refrigerados por agua supercrítica.

B.1.2. Marco internacional de cooperación en energía nuclear (IFNEC)

64. El marco internacional de cooperación en energía nuclear (IFNEC) fue introducido originariamente por los EE.UU. en 2006 como la Alianza Mundial de Energía Nuclear (GNEP) y ha incluido: a) los esfuerzos de cooperación que realizan 25 países que convienen en la necesidad de la expansión de la energía nuclear en todo el mundo y b) un programa nacional de los Estados Unidos encaminado a la utilización de tecnologías relacionadas con el reciclado, la fabricación de combustible y los reactores para destruir los elementos radiactivos de período largo presentes en el combustible gastado. Mientras que el programa de los Estados Unidos se suspendió en 2009, los esfuerzos de cooperación internacional prosiguieron, con la celebración de reuniones de los dos grupos de trabajo pertinentes, uno sobre servicios fiables relacionados con el combustible y otro sobre desarrollo de infraestructuras, así como de la reunión del Grupo Directivo, que tuvo lugar en abril, y la reunión del Comité Ejecutivo a nivel ministerial, realizada en octubre en China. La denominación del esfuerzo de cooperación internacional se cambió en junio de 2010 como parte de la transformación a fin de prever un alcance más amplio que permitiera una mayor participación.

B.1.3. Otros adelantos en la esfera de la fisión avanzada

65. Además del INPRO, el GIF y el IFNEC, varios países, empresas y asociaciones están realizando actividades encaminadas a la investigación, el desarrollo y el uso de reactores de fisión avanzada. Estas actividades representan el grueso de los trabajos que se realizan en todo el mundo en la esfera de la fisión avanzada y abarcan los reactores de alta temperatura, los sistemas de reactores rápidos y los reactores de agua ligera mejorados de diferentes tamaños y para diversas aplicaciones. Los adelantos en 2009 fueron en gran medida una continuación de los progresos reseñados en el *Examen de la tecnología nuclear 2009*¹¹ y se describirán en más detalle en la actualización de 2010 del informe del Organismo titulado *Situación y perspectivas internacionales de la energía nucleoelectrónica, que se presentará próximamente*.

B.2. Fusión

66. Los preparativos relacionados con la infraestructura y el emplazamiento del Reactor termonuclear experimental internacional (ITER) progresaron con arreglo a lo previsto por las siete partes en el ITER (China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, India, Japón, República de Corea y la Unión Europea). En marzo se concluyeron los preparativos relacionados con el emplazamiento. Se han firmado acuerdos de contratación para las instalaciones por valor de unos 1 500 millones de euros, aproximadamente un tercio de las contrataciones totales previstas.

67. Mediante su Acuerdo de Cooperación oficial¹², el Organismo y la Organización Internacional de Energía de Fusión del ITER comenzaron a planificar la cooperación internacional en materia de intercambios de personal con fines de capacitación, conferencias y publicaciones sobre componentes e instalaciones de fusión. Prosiguió la participación, con el apoyo del Organismo, de físicos jóvenes

¹¹ Véase el sitio <http://www.iaea.org/Publications/Reports/ntr2009.pdf>.

¹² Reproducido en el documento INFCIRC/25/Add.8, disponible en el sitio web del Organismo <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/2009/infcirc25a8.pdf>.

especializados en fusión y plasma en los experimentos conjuntos (y las publicaciones ulteriores) sobre la fusión en instalaciones existentes, tales como el organizado en mayo por la comunidad brasileña de usuarios de tokamak sobre los fenómenos de turbulencia en plasmas de tokamak que degradan el confinamiento energético.

68. Se concluyeron los trabajos de construcción de la Instalación nacional de ignición en los laboratorios Lawrence Livermore de los Estados Unidos, que se inauguró en mayo. La instalación cuenta con 192 láseres con una energía total de aproximadamente 1,5 megajulios para producir radiación en un 'hohlraum' con miras a la ignición de la fusión en las pastillas de deuterio-tritio. En septiembre se notificaron, en el marco de la Conferencia Internacional sobre ciencias y aplicaciones de la fusión inercial, los primeros resultados de las interacciones de los haces, dentro del hohlraum de los que se desprendió que la Instalación nacional de ignición está dispuesta a iniciar experimentos de física relacionados tanto con la posible producción de energía mediante el empleo de la fusión inercial, como con un mejor conocimiento de la naturaleza y evolución del universo.

C. Datos atómicos y nucleares

69. Las principales bases de datos nucleares establecidas por la Red internacional de centros de datos sobre reacciones nucleares y la Red internacional de evaluadores de datos de estructuras y desintegración nucleares, y coordinadas por el Organismo, son constantemente objeto de mejoras en cuanto a la calidad y exhaustividad de los datos, su presentación visual y su distribución a escala mundial. En 2009 cabe mencionar, en particular, la colaboración internacional en la esfera de la garantía de calidad en relación con la principal base de datos experimentales sobre reacciones nucleares (EXFOR). Se pusieron a disposición nuevas bibliotecas de datos respecto de las aplicaciones en materia de cálculos asociados a los reactores rápidos, dosimetría de neutrones y análisis de materiales con haces de iones. El número de datos recuperados por los usuarios en los servidores web de los centros colaboradores ha aumentado en un 10% anualmente durante los últimos dos años.

70. La planificación de tratamientos avanzados y la dosimetría física con haces de protones e iones dependen de modelos informatizados (técnicas Monte Carlo) que utilizan datos nucleares como aportaciones importantes. En 2009, dos nuevas instalaciones de haces iónicos entraron en servicio en Alemania y el Japón. Más de diez centros de radioterapia se encuentran en una etapa de construcción avanzada. En la Conferencia Internacional sobre análisis con haces de iones de 2009, se notificaron nuevas aplicaciones de los haces iónicos en la obtención de imágenes moleculares y el estudio de nanopartículas y dispositivos de escala nanométrica, la microtomografía y el análisis con haces de iones en la superficie de Marte.

71. En lo que respecta a la energía nucleoelectrónica, los esfuerzos de la industria nuclear europea se centraron en la validación de la nueva versión 3.1.1 de la base de datos conjunta sobre datos evaluados de fisión y fusión (JEFF-3.1.1) con el fin de utilizarla para los análisis de seguridad y la planificación operacional de los reactores actualmente existentes y para el examen de los diseños de reactores de la Generación IV. En lo que atañe a la fusión, se publicó el *Handbook of Activation Data Calculated Using EASY-2007*, que condensa más de 20 años de estudios de datos sobre reacciones nucleares relacionados con dispositivos de fusión. Los datos atómicos y moleculares que son fundamentales para el proyecto ITER se están compilando en las bases de datos existentes en todo el mundo, en particular con respecto a los procesos en los que intervienen elementos ligeros de las regiones del divertor y del borde del plasma. Estas nuevas bases de datos incluyen datos sobre los procesos de excitación, ionización, recombinación y colisión de partículas.

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

D.1. Aceleradores

72. Existen unos 163 aceleradores electrostáticos de baja energía situados en más de 50 Estados Miembros, nueve fuentes de neutrones por espalación en cinco Estados Miembros y 50 fuentes de luz sincrotrónica ubicadas en más de 20 Estados Miembros. El número de aceleradores electrostáticos de baja energía en todo el mundo se mantiene en general constante, ya que las retiradas de servicio en los países desarrollados se compensan con los nuevos aceleradores de los países en desarrollo en cuanto a la prestación de servicios analíticos nucleares. El número de fuentes de neutrones por espalación y de fuentes de luz sincrotrónica está aumentando en varias máquinas cada decenio.

73. Los aceleradores modernos se utilizan en las esferas de la radiofísica médica, la radiobiología, la física nuclear experimental, la agricultura, los procesos de esterilización, la investigación de materiales, el estudio de objetos culturales y la protección ambiental. Habida cuenta de los problemas de recursos humanos a los que se enfrentan la ciencia y la tecnología nucleares (véase la sección A.4.3), en los planes de estudios de esas disciplinas se incorporan también cada vez más los aceleradores pequeños a fin de ayudar al desarrollo de las capacidades generales y específicas de los alumnos. Por ejemplo, en 2009, Ghana creó una instalación nacional de aceleradores para fortalecer más la capacidad institucional de apoyo a la investigación y al desarrollo de recursos humanos. En particular, los aceleradores pequeños ofrecen oportunidades de adquirir conocimientos y experiencia prácticos, que no suelen darse en las instalaciones más grandes.

74. Los blancos de las fuentes de neutrones por espalación utilizados en los aceleradores de alta potencia aportan información útil sobre los daños radiológicos en los sistemas accionados por acelerador, incluidos los destinados a la transmutación de desechos nucleares y generación de energía eléctrica. En 2009 comenzó a desmantelarse el blanco de metal líquido utilizado en el experimento integral MEGAPIE de la Fuente de neutrones por espalación de Suiza (SINQ), que se irradió a una potencia de 0,8 MW durante cinco meses en 2006. Los materiales estructurales del blanco están siendo separados y diseccionados en muestras para realizar ensayos de las propiedades del material irradiado por los asociados internacionales de MEGAPIE. La información obtenida ayudará en el diseño de futuros blancos de período largo y alta potencia en sistemas accionados por acelerador.

D.2. Reactores de investigación

75. Los reactores de investigación pueden tener múltiples usos: capacitación en ciencias nucleares, investigación nuclear, ensayo de materiales, producción de radioisótopos de uso industrial y médico, y servicios comerciales como el dopado con silicio, el análisis por activación neutrónica, la coloración de piedras preciosas y los ensayos no destructivos. También pueden ser un avance en los programas nacionales de implantación de la energía nucleoelectrónica. Debido al creciente interés en la energía nuclear, más de 20 Estados Miembros están considerando la posibilidad de construir nuevos reactores de investigación. En 2009, la coalición de la Iniciativa sobre reactores de investigación de Europa oriental puso en marcha, con el apoyo del Organismo, un curso de capacitación en grupo para becarios a fin de prestar asistencia a los Estados Miembros interesados en iniciar un primer proyecto sobre reactores de investigación. El curso ofrece capacitación en materia de planificación, evaluación, desarrollo, construcción, puesta en servicio, utilización, explotación y mantenimiento de los reactores de investigación.

76. Existen más de 240 reactores de investigación operacionales en todo el mundo. En 2009 no se pusieron en servicio nuevos reactores de investigación. Puesto que los reactores más antiguos son retirados y sustituidos por un número menor de reactores más polivalentes, se espera que el número de reactores de investigación operacionales disminuya hasta situarse entre 100 y 150 antes de 2020. Será precisa una mayor cooperación internacional para garantizar un acceso amplio a esas instalaciones y el uso eficiente de las mismas. Las redes cooperativas también serán útiles para mejorar las instalaciones

existentes y crear otras nuevas. En 2009 siguió avanzándose en la creación de esas redes (en las regiones del Mediterráneo, Europa oriental, el Caribe y Asia central, más una red temática sobre tensiones residuales y análisis de texturas); sin embargo, todavía queda un gran trabajo por hacer.

77. La Iniciativa para la reducción de la amenaza mundial (IRAM) de los Estados Unidos proporciona el marco de uno de los principales esfuerzos para convertir, de uranio muy enriquecido (UME) a UPE, el combustible de los reactores de investigación, y los blancos utilizados en las instalaciones de producción de isótopos. En 2009, el alcance del programa se amplió de 129 reactores de investigación a 200. A finales de abril de 2010, 72 reactores de investigación de todo el mundo que utilizaban combustible de UME fueron convertidos para que utilizaran combustible de UPE o se sometieron a régimen de parada antes de la conversión, y se identificaron otros 33 cuya conversión es posible para el uso de combustibles de UPE existentes que cumplen los requisitos necesarios. Para proceder a su conversión, los reactores de investigación de alto rendimiento necesitarán los nuevos combustibles de alta densidad que se están desarrollando (véase el párrafo 79). Respecto a la conversión, de UME a UPE, de los blancos utilizados en la producción de molibdeno 99, Sudáfrica, que convirtió plenamente el reactor Safari-1 para que utilizara combustible de UPE en 2009, fue el primer productor a gran escala de molibdeno 99 en notificar un avance sustantivo también en la conversión a UPE de blancos para la producción de isótopos de uso médico.

78. En 2009 se realizaron importantes progresos en el marco del programa de devolución de combustible de origen ruso para reactores de investigación (RRRFR) de la IRAM. Se devolvieron a la Federación de Rusia aproximadamente 270 kg de combustible nuclear de UME gastado y 49 kg de combustible nuclear de UME sin irradiar desde Hungría, Kazajstán, Libia, Polonia y Rumania. Desde la creación del programa, se ha logrado devolver a la Federación de Rusia aproximadamente 1 350 kg de UME, comprendido combustible nuclear sin irradiar y gastado.

79. Para la conversión de reactores de investigación de alto flujo y alto rendimiento se necesitan los combustibles avanzados de uranio-molibdeno de muy alta densidad que se están desarrollando actualmente. A este respecto, se han alcanzado progresos considerables en los últimos años. El comportamiento y el rendimiento del combustible de uranio-molibdeno están siendo investigados por un Grupo Internacional de Trabajo sobre desarrollo de combustibles, integrado por Alemania, Argentina, Bélgica, Canadá, Chile, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Francia y República de Corea. En los Estados Unidos, los esfuerzos se centran en el desarrollo de combustible de uranio-molibdeno monolítico para utilizarlo en reactores de investigación de alto flujo. Se están produciendo importantes adelantos a medida que avanza la tecnología de fabricación. En 2009 se consolidó una nueva iniciativa europea para lograr la cualificación del combustible de uranio-molibdeno disperso de muy alta densidad, a base de UPE, con miras a la conversión de los reactores europeos de alto flujo para que utilicen combustible de UPE.

80. Aunque en 2009 se lograron avances sustanciales en el desarrollo y la cualificación del combustible de uranio-molibdeno, se necesitan nuevos progresos y ensayos importantes para lograr la disponibilidad comercial oportuna de los combustibles de UPE de muy alta densidad que cumplen los requisitos necesarios.

E. Tecnologías nucleares en la agricultura y la alimentación

E.1. Mejora de la productividad y la sanidad pecuarias¹³

81. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) han determinado que el análisis de recursos zoogenéticos es una esfera de alta prioridad, ya que presenta opciones de crucial importancia para el desarrollo sostenible de la producción pecuaria y para la mejora de la seguridad alimentaria. Gracias al apoyo del OIEA, se han realizado progresos importantes en el análisis de la diversidad genética en las razas bovina, ovina y caprina, para mejorar la selección de animales deseables con el fin de aumentar la productividad, ya que, en muchos casos, la capacidad de esos animales para resistir enfermedades endémicas o condiciones ambientales adversas está vinculada a su constitución genética. Los datos y resultados de esos análisis genéticos son valiosos para garantizar la sostenibilidad de los futuros programas de cría de animales y su capacidad para seleccionar animales que lleven genes adecuados. Sin embargo, existen importantes deficiencias en la capacidad para utilizar los datos genéticos procedentes de esos análisis en los programas de cría de animales, particularmente en los países en desarrollo. En ese sentido, se elaboró una interfaz de sistemas de redes informáticas para poner los datos genéticos a disposición de todos los Estados Miembros y facilitarles el acceso a protocolos de laboratorio, procedimientos operacionales normalizados para el análisis de genes, instrumentos para la búsqueda de genomas, y a una base de datos de marcadores moleculares en relación con el ganado¹⁴. Se han obtenido datos genómicos y fenotípicos de más de 4 000 ovejas y cabras de 89 razas, que se utilizarán para determinar los genes comunes que se podrían aprovechar a efectos de mejorar la producción pecuaria.

82. Las sondas de nucleótidos radiomarcadas han contribuido a la secuenciación del genoma bovino completo¹⁵. Estos instrumentos proporcionan un medio para seleccionar animales que utilicen la energía de forma más eficiente y tengan menor impacto ambiental, y en particular animales que produzcan menos emisiones de gases efecto invernadero. Este descubrimiento podría llevar a aumentar la eficiencia de la producción de carne y leche, y proporciona nueva información sobre la evolución de los mamíferos y la biología específica del ganado. También indica el camino que deberían seguir las investigaciones para lograr una mayor sostenibilidad de la producción alimentaria en un mundo enfrentado al crecimiento demográfico.

83. El diagnóstico temprano y rápido de enfermedades veterinarias mediante el empleo de técnicas nucleares combinadas con la biotecnología moderna es fundamental en los esfuerzos por limitar impactos en animales y seres humanos y mejorar la seguridad alimentaria. La alta sensibilidad y especificidad de las tecnologías nucleares junto con la biotecnología moderna puede utilizarse para la detección específica de patógenos de enfermedades pecuarias antes de que causen una enfermedad, para el rastreo de la huella genética de un animal y para la caracterización de microorganismos que afectan a la salud humana y a la sanidad pecuaria. Por ejemplo, las tecnologías nucleares moleculares permiten realizar el diagnóstico de confirmación de la gripe aviar y la gripe porcina en un día, mientras que el diagnóstico clásico de ambas enfermedades puede tardar hasta una semana.

¹³ Se puede consultar información adicional en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) o en <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>.

¹⁴ *Development of RT-db (Real Time Database) for Quantitative Trait Loci (QTL)/Genes/DNA Sequences and Genetic Characterization in Small Ruminants* (http://www.intl-pag.org/16/abstracts/PAG16_P08a_852.html)

¹⁵ The Bovine Genome Sequencing and Analysis Consortium, Christine G. Elsik, Ross L. Tellam, Kim C. Worley. The Genome Sequence of Taurine Cattle: A Window to Ruminant Biology and Evolution, *Science* 24 April 2009: Vol. 324, 522-528.



Fig. E-1. Cabras autóctonas de Myanmar, resistentes a enfermedades parasíticas y bien adaptadas al entorno local, que formaron parte de un ejercicio de cartografía del genoma mediante la utilización de tecnologías nucleares.

E.2. Lucha contra plagas de insectos

84. En la esfera de la lucha contra plagas de insectos, el empleo de técnicas nucleares no se limita a la irradiación gamma para la esterilización de insectos como parte de la aplicación zonal de la técnica de los insectos estériles (TIE) y los métodos de control genético conexos, sino que comprende también el uso de isótopos para realizar estudios sobre la biología, el comportamiento, la bioquímica, la ecología y la fisiología de los insectos. El Organismo ha participado también en la utilización de radionucleidos en investigaciones entomológicas para abordar problemas relacionados con las plagas de insectos. El *Laboratory Training Manual on the Use of Nuclear Techniques in Insect Research and Control* del Organismo, reeditado y publicado en 1992, es una importante contribución del Organismo en esta esfera. Desde mediados del decenio de 1990 ha habido cambios significativos en el entorno científico y social mundial. Desde el punto de vista ambiental, ya no es aceptable proceder a la emisión de radionucleidos con insectos sobre el terreno. Además, es cada vez más costoso utilizar radionucleidos en el laboratorio por motivos de seguridad.

85. Los métodos de isótopos estables sustituyen muchos métodos de radionucleidos. Esos isótopos no son radiactivos, están omnipresentes de forma natural en el medio ambiente, y el personal no se enfrenta a riesgos para la salud cuando los manipula. Puesto que son pocos los aspectos de seguridad que se deben abordar, no se precisan reglamentos especializados en relación con los edificios y el equipo. Todos estos factores ayudan a reducir los costos y facilitar el uso de isótopos estables, y posibilitan la suelta segura de insectos marcados con esos isótopos en el medio ambiente.

86. En 2009, el Organismo y la FAO publicaron el *Manual for the Use of Stable Isotopes in Entomology*, que presenta los principios y técnicas básicos de la ciencia de los isótopos estables y examina el empleo de isótopos estables en las investigaciones entomológicas. Los adelantos en la espectrometría de masas de relación isotópica desde el punto de vista de la detección, la exactitud y la automatización han ampliado enormemente las posibilidades experimentales en los últimos 25 años. Los procesos naturales en la biosfera originan firmas isotópicas distintivas y, por consiguiente, los isótopos estables pueden ser sumamente útiles en las investigaciones entomológicas para contestar a muchas preguntas de biología y ecología, como el rastreo del movimiento de los insectos, las pautas de alimentación en la cadena alimentaria, la transferencia de nutrientes y esperma, y la respuesta a preguntas específicas sobre el uso de recursos.

87. Por otra parte, una de las principales desventajas de utilizar isótopos estables es el costo de capital de los espectrómetros de masas para la determinación de relaciones isotópicas. Además, el equipo requiere un entorno a temperatura controlada y personal cualificado para mantener y revisar los instrumentos sensibles. Esos problemas se pueden superar mediante la subcontratación de un laboratorio comercial de análisis para que realice análisis isotópicos. En la actualidad, existen muchos laboratorios que ofrecen servicios de análisis isotópico mediante el pago por muestra, y es sencillo, seguro y económico enviar muestras de isótopos estables en todo el mundo.

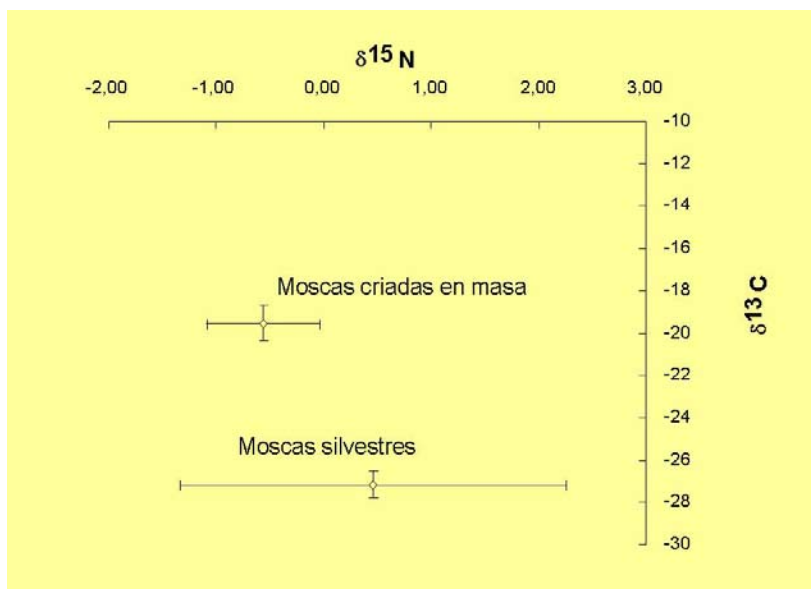


Fig. E-2. La firma de isótopos estables puede utilizarse para distinguir las moscas silvestres de las moscas de laboratorio criadas en masa y soltadas, a efectos de vigilar las poblaciones de plagas como parte de la ejecución de programas que emplean la técnica de los insectos estériles. Esta figura muestra el promedio de firmas isotópicas de las moscas macho de la especie *Ceratitis capitata* procedentes del campo y las procedentes de una instalación de cría en masa; las líneas indican la desviación típica más/menos con respecto a los valores medios.

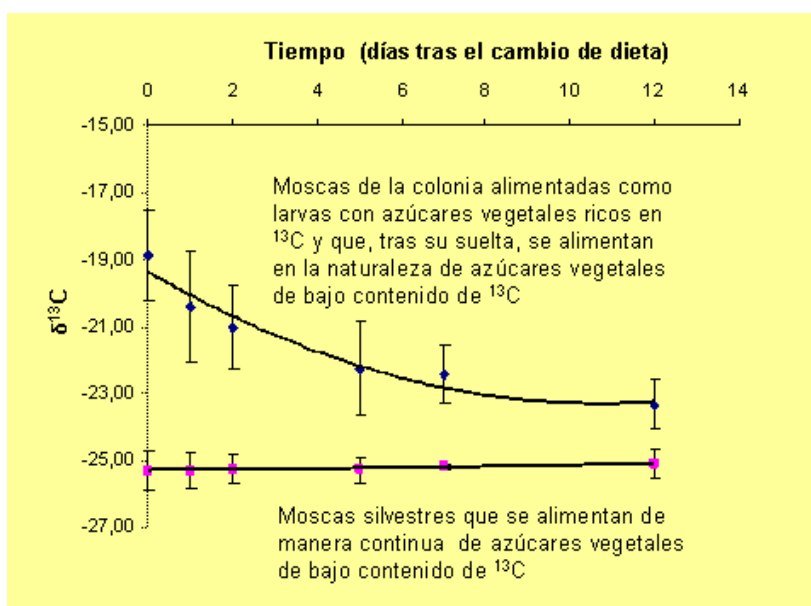


Fig. E-3. La firma isotópica de las moscas criadas en masa perdura a lo largo de sus vidas, incluso cuando las moscas se sueltan el día 0 cuando pasan de una dieta larval de alto contenido de carbono 13 a una dieta adulta de bajo contenido de carbono 13, imitando la práctica de la técnica de los insectos estériles. Es posible distinguir las moscas estériles de las silvestres con una certeza superior al 99%.

E.3. Calidad e inocuidad de los alimentos

88. La irradiación de alimentos es una técnica útil para controlar los microorganismos, entre ellos, los que causan una serie de enfermedades transmitidas por los alimentos. Los brotes de enfermedades transmitidas por los alimentos se han asociado a todos los tipos de alimentos, y los patógenos pueden transferirse a los alimentos por medio de diferentes fuentes de contaminación resultantes de la manipulación, el procesamiento y la preparación de los productos.

89. Dado que el calor prolongado no es el método de tratamiento apropiado para todos los alimentos, la irradiación es un método alternativo de procesamiento y tratamiento de alimentos. Una de las ventajas importantes de la tecnología de irradiación es que permite destruir los microorganismos sin aumentos significativos de la temperatura. La irradiación puede aplicarse en el caso de las verduras y frutas frescas, así como de los alimentos congelados, sin que produzca cambio significativo alguno en su sabor o textura. También puede utilizarse para tratar alimentos que se han cocinado de manera convencional y se han empacado listos para su distribución a los consumidores. Otra ventaja de la irradiación es que destruye organismos que provocan deterioro de los alimentos, lo que permite mantener la carne, las aves y los mariscos por más tiempo.

90. La mayoría de las actividades de investigación y desarrollo realizadas hasta ahora en materia de irradiación de alimentos se han centrado en el procesamiento de productos básicos para su consumo por el público en general. Sin embargo, de los adelantos recientes se desprende el potencial de las aplicaciones de la irradiación de alimentos para lograr niveles excepcionales de seguridad microbiológica para determinados grupos destinatarios de consumidores que son muy sensibles a los microorganismos presentes en su dieta y que requieren un suministro seguro de alimentos inocuos y sanos. Por ejemplo, los consumidores con sistemas inmunológicos comprometidos son especialmente sensibles a las bacterias transmitidas por los alimentos, lo que con frecuencia limita la variedad de alimentos que pueden comer. A fin de cumplir los exigentes requisitos de la comunidad médica, se podrían investigar y desarrollar, mediante el empleo de la irradiación, una serie de alimentos irradiados destinados a fines dietéticos especiales.



Fig. E-4. La Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos aprobó recientemente la irradiación de espinacas a raíz de los brotes de bacterias en este cultivo.

91. Los pasos siguientes en la aplicación más amplia de la irradiación de alimentos consisten en desarrollar y mejorar las técnicas de irradiación, junto con otras tecnologías de procesamiento de alimentos que sean adecuadas para una amplia gama de alimentos. En particular, estos alimentos deben ser idóneos para su consumo por determinados grupos destinatarios que requieren niveles excepcionales de salubridad de los alimentos. El tratamiento por irradiación, solo o en combinación con otras tecnologías de procesamiento de los alimentos, continuará utilizándose con miras a obtener alimentos inocuos para ensayos nutricionales, microbiológicos y de aceptabilidad, contribuyendo así a mejorar la salud humana.

E.4. Mejora de los cultivos

92. Se registra un renacimiento del empleo de la inducción de mutaciones para la mejora de los cultivos y en apoyo de las investigaciones fundamentales. Se están desarrollando dos técnicas nuevas que complementan otras técnicas utilizadas en la fitotecnia por mutaciones, a saber, la implantación de haces iónicos, que permite que un isótopo se desintegre *dentro de* la célula, y la reproducción espacial (región exterior a la atmósfera terrestre), en la que los rayos cósmicos *atraviesan* la célula. El número de variedades mutantes oficialmente distribuidas a nivel mundial para la producción comercial y provenientes de 170 especies diferentes de plantas está aumentando de manera constante y ya se acerca a 3 100¹⁶. Entretanto, se están construyendo nuevas instalaciones de tratamiento por mutágenos, tales como implantadores iónicos, fitotrones gamma e invernaderos gamma, que se están utilizando para la fitotecnia por mutaciones en algunos países de Asia.

93. Paralelamente, se están cruzando nuevas fronteras en el desarrollo de tecnologías innovadoras para el descubrimiento rápido y en gran escala de diferentes tipos de mutaciones inducidas. A nivel molecular, la tendencia es a desarrollar conjuntos de tecnologías que combinen las técnicas modernas en la esfera de la biotecnología, tales como el cribado de alto rendimiento y la secuenciación de nueva generación con inducción de mutaciones. Mediante técnicas de cribado fenotípico sistemático y de alto rendimiento basadas en instrumentos automatizados de análisis de imágenes e instalaciones robóticas, como las que se utilizan actualmente en el centro de fenómica de plantas de alta resolución de Australia, se pueden tratar colecciones de variedades mutantes muy amplias (entre 10 000 y 100 000 plantas cuyo fenotipo ha sido plenamente definido) y colmar la denominada brecha “fenotipo/genotipo”. La importancia de este tipo de cribado es fundamental, ya que permite al fitotécnico determinar eficazmente una línea mutante útil que posea las características necesarias para producir más, incluso en condiciones adversas. Es esencial encontrar la manera de salvar el abismo entre los recursos mutantes disponibles y la gama completa de fenotipos de plantas a fin de aprovechar plenamente el potencial de la biodiversidad de las plantas, comprendidos los principales cultivos estudiados. La mejora de la eficiencia mediante la fitotecnia por mutaciones basada en los genes puede ayudar a mejorar la calidad y disponibilidad de las variedades de cultivos, permitiendo así aumentar los suministros alimentarios y propiciar la tan necesaria reducción de los precios de los alimentos. Hoy en día es posible secuenciar un genoma en forma económica, lo que pone esta técnica al alcance de los países de bajos ingresos.

E.5. Ordenación sostenible de las tierras y los recursos hídricos

E.5.1. Mejora de la ordenación de los recursos hídricos para fines agrícolas mediante el empleo de métodos isotópicos

94. El agua del suelo disponible para el crecimiento de los cultivos depende de la pérdida de agua del suelo desnudo (es decir, la evaporación) y la transpiración de las hojas de las plantas. Para mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego es importante cuantificar estos dos componentes de pérdida de agua. Sin embargo, la evaporación y transpiración son difíciles de medir con precisión a escala de campo, debido a complejas interacciones con otros factores, tales como la intensidad de las

¹⁶ Véase la base de datos sobre variedades mutantes y existencias de material genético en el sitio <http://mvgs.iaea.org/>

precipitaciones, la situación del agua del suelo, la profundidad radicular de las plantas y la cubierta terrestre. Los isótopos estables del agua (oxígeno 18 e hidrógeno 2) pueden utilizarse eficazmente para dilucidar esas interacciones, ya que son trazadores naturales del movimiento del agua dentro de la secuencia suelo-vegetación-atmósfera. La evaporación del suelo conduce al enriquecimiento de la composición isotópica del agua del suelo en oxígeno 18 e hidrógeno 2. En cambio, la transpiración de las plantas no afecta a la composición isotópica del agua del suelo. Recientemente se han llevado a cabo con éxito investigaciones en pastizales semiáridos, bosques coníferos y sistemas de cultivo con el fin de cuantificar la evaporación y transpiración mediante el empleo de técnicas basadas en los isótopos estables del agua. La información obtenida se utilizará para elaborar conjuntos y modelos de tecnologías con miras a mejorar la ordenación de las tierras y los recursos hídricos en diferentes entornos.



Fig. E-5. Medición de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas en un campo de maíz mediante el uso de técnicas convencionales e isotópicas (cortesía del Prof. Xurong Mei).

E.5.2. Secuestro de carbono orgánico del suelo y mitigación del cambio climático

95. El secuestro de carbono orgánico del suelo (COS) puede atenuar el aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera y mitigar el cambio climático. Mediante la fotosíntesis, las plantas utilizan CO_2 para crecer. Al morir y descomponerse, parte del carbono que contienen queda secuestrado en el suelo como COS. Si bien se han realizado progresos importantes en la evaluación del COS, los mecanismos de control y regulación de flujos de COS no se comprenden aún totalmente. En particular, no está bien identificado el vínculo entre el secuestro de COS y la disponibilidad de nitrógeno y fósforo en el suelo. Mediante el uso de isótopos de carbono radiactivos (carbono 14) y estables (carbono 13), junto con técnicas de fraccionamiento del carbono edáfico y de mesocosmo (monolitos de suelo), se descubrió que la disponibilidad de nitrógeno y fósforo desempeñaba un papel fundamental para determinar la capacidad de secuestro de COS y la separación de COS en distintas reservas edáficas con distintos grados de absorción. A fin de mejorar los modelos de secuestro de COS, muy necesarios, como instrumentos de mitigación del cambio climático, es preciso evaluar el secuestro de COS en respuesta a los cambios de nitrógeno y fósforo en los ecosistemas agrícolas en que la rehabilitación de tierras cobra cada vez más importancia para la sostenibilidad de la producción alimentaria. Esa información es muy importante para que se tenga en cuenta la agricultura en futuros planes de comercio de derechos de emisión de carbono y para reducir las emisiones de carbono^{17, 18}.

¹⁷ Véase también Trumbore, S. 2009. *Radiocarbon and soil carbon dynamics*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 37, págs. 47–66.

¹⁸ Bradford, M., Fierer, N., Jackson, R., Maddox, T., Reynolds, J., 2008. *Nonlinear root-derived carbon sequestration across a gradient of nitrogen and phosphorous deposition in experimental mesocosms*. Global Change Biology, 14, págs. 1113–1124.

F. Salud humana

F.1. Lucha contra la malnutrición mediante el empleo de técnicas nucleares

96. La carencia de micronutrientes, conocida como el “hambre oculta”, afecta a una gran parte de la población mundial, en particular a lactantes, niños y mujeres en edad de procrear de países en desarrollo. La carencia de vitamina A, zinc y hierro es un grave problema de salud pública, ya que influye desfavorablemente en el crecimiento y desarrollo cognitivo durante los primeros años de vida y contribuye a la mala salud de los niños.

97. Es preciso elaborar urgentemente estrategias alimentarias eficaces y sostenibles para luchar contra la carencia de micronutrientes. Las estrategias alimentarias incluyen intervenciones convencionales como el enriquecimiento de los alimentos y la modificación de la dieta, así como enfoques más innovadores, como la mejora de los alimentos básicos desde el punto de vista nutricional — el “bioenriquecimiento”. Como parte integrante de la elaboración y evaluación de intervenciones nutricionales para luchar contra la carencia de micronutrientes, las técnicas nucleares se utilizan con el fin de evaluar la biodisponibilidad de micronutrientes.

98. Los resultados de aplicaciones recientes de técnicas de isótopos estables para evaluar la biodisponibilidad de hierro y carotenoides provitamina A en grupos de población vulnerables ayudarán a los responsables de la formulación de políticas, a los profesionales de la salud y a otros interesados directos, como la industria alimentaria y los fitomejoradores, a determinar opciones para el futuro. Por ejemplo, el impacto global de las estrategias de enriquecimiento de los alimentos destinadas a luchar contra la carencia de hierro dependerá de la biodisponibilidad de compuestos de hierro, así como de la presencia de inhibidores y potenciadores de la absorción de hierro en la dieta, según se subrayó en las directrices elaboradas recientemente por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la FAO¹⁹.



Fig. F-1. Los lactantes, los niños y las mujeres en edad de procrear de países en desarrollo son los grupos de población más vulnerables con riesgo de sufrir “hambre oculta” (por cortesía de Stephanie Good, (Etiopía).

99. En la actualidad, las técnicas de isótopos estables destinadas a estimar las cantidades totales de vitamina A se utilizan para proporcionar nueva información sobre el valor biológico de las batatas de pulpa naranja, que son ricas en carotenoides provitamina A²⁰. El Organismo colabora estrechamente

¹⁹ Organización Mundial de la Salud (OMS), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). *Guidelines on food fortification with micronutrients*. Allen L, De Benoist B, Dary O, Hurrell RF, eds. <http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/9241594012/en/index.html>

²⁰ Véase <http://www.harvestplus.org/content/biofortified-foods-offer-protection-vitamin-deficiency>

con asociados internacionales como HarvestPlus en esta esfera, así como en la evaluación de otros cultivos estables bioenriquecidos como el trigo con alto contenido de zinc.²¹

100. En el último informe del Consenso de Copenhague 2008²² se destaca la importancia de estos esfuerzos. Un grupo de ocho de los economistas más distinguidos del mundo clasificaron las soluciones propuestas a los desafíos mundiales sobre la base de las ventajas y los costos económicos. Las soluciones para luchar contra la carencia de micronutrientes, es decir, la alimentación suplementaria, el enriquecimiento de los alimentos y el bioenriquecimiento, quedaron primer, tercer y quinto lugar en la clasificación de las 30 soluciones propuestas para abordar los diez desafíos planteados por los especialistas en nutrición.

F.2. Sistemas híbridos de formación de imágenes: la SPECT/TC y la PET/TC²³

101. El diagnóstico por imágenes es una de las esferas más innovadoras de la medicina moderna. Puede dividirse en dos categorías amplias: las modalidades que permiten definir con mucha precisión los detalles anatómicos, y las que permiten producir imágenes funcionales o moleculares. En la primera categoría, cabe citar como ejemplos la tomografía computarizada (TC) y la obtención de imágenes por resonancia magnética (MRI), que sirven para identificar los cambios estructurales al milímetro. La tomografía por emisión de positrones (PET) y la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT) son ejemplos de la segunda categoría y sirven para investigar enfermedades a nivel molecular.

102. En el último decenio, la tecnología ha hecho posible la fusión de las modalidades anatómica y funcional en sistemas híbridos de formación de imágenes, como la SPECT/TC y la PET/TC. Los sistemas híbridos de formación de imágenes posibilitan una investigación combinada de la anatomía y la función de los órganos humanos. Las ventajas clínicas son numerosas y, entre ellas, figuran una mejor identificación y localización de lesiones combinadas con una mejor caracterización de los cambios estructurales y metabólicos en las lesiones identificadas. En consecuencia, las enfermedades se detectan en su fase más temprana con mayor precisión, lo que permite realizar un tratamiento temprano con mayores posibilidades de recuperación completa y rápida. Los sistemas híbridos de formación de imágenes se han aplicado con éxito en las esferas de la cardiología y la oncología. La PET/TC se utiliza para evaluar los problemas del flujo sanguíneo relacionados con la oclusión de la arteria coronaria, que pueden ocasionar la necrosis de los tejidos. En oncología, los sistemas híbridos de formación de imágenes posibilitan la detección temprana del cáncer y muestran los cambios a nivel celular mucho antes de que surjan cambios anatómicos. En cirugía ortopédica, la SPECT/TC y la PET/TC son las mejores modalidades de obtención de imágenes para la investigación de dolores lumbares y pueden utilizarse también en situaciones postoperatorias y postraumáticas. Otros ámbitos de aplicación de los sistemas híbridos de formación de imágenes son la evaluación de enfermedades benignas que afectan al cerebro, la tiroides, la paratiroides y cualquier otro órgano del cuerpo humano.

²¹ Véase <http://www.harvestplus.org/content/study-shows-women-absorb-more-zinc-biofortified-wheat>

²² Véase <http://www.copenhagencensus.com/The%2010%20challenges-1.aspx>

²³ Se puede consultar información adicional en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) o en <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>).

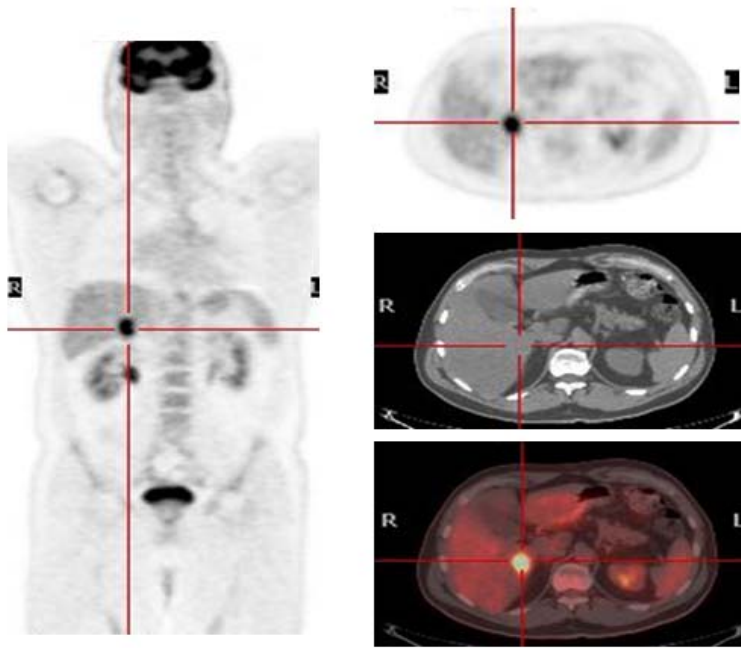


Fig. F-2. Imágenes como la anterior, que muestra los órganos internos de un hombre de 50 años con un historial de cáncer de colon extraído quirúrgicamente, son fundamentales para vigilar la evolución de la enfermedad. Las zonas más claras indican un aumento del marcador tumoral debido a una posible recaída tumoral. La PET/TC muestra una única metástasis de hígado sin otras lesiones, lo que indica que podría extraerse sin cirugía adicional (por cortesía de S. Fanti).

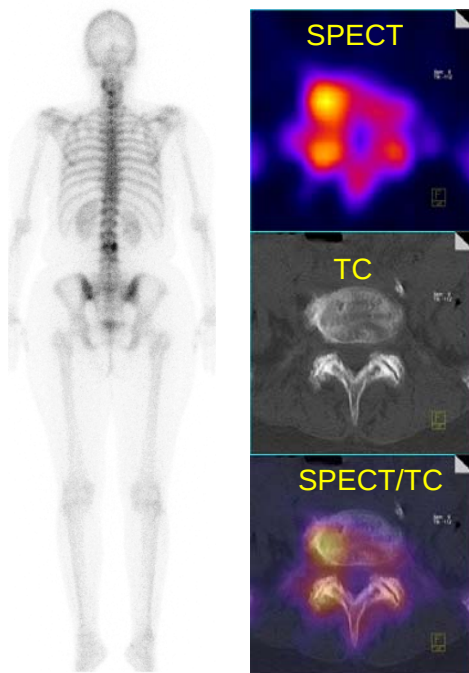


Fig. F-3. Un estudio de SPECT muestra un aumento del metabolismo óseo en la columna lumbar y cervical de esta mujer de 65 años con un caso de melanoma en su historial médico. El registro combinado de las imágenes de SPECT y TC muestra cambios óseos importantes en la anatomía asociados a procesos degenerativos. Las metástasis óseas pudieron ser descartadas.

F.3. Avances en las aplicaciones radiooncológicas

103. En 2009 se lograron varios nuevos adelantos tecnológicos en la esfera de la radiooncología que se pusieron de relieve en abril de 2009 durante la Conferencia Internacional sobre avances en radiooncología (ICARO)²⁴ del Organismo.

104. La primera cuestión importante está relacionada con los esfuerzos por evaluar el valor comparativo de las unidades de cobalto frente a los aceleradores lineales, que reviste especial importancia para países de ingresos bajos y medios. Durante la ICARO, y posteriormente en una evaluación comparativa de las tecnologías nucleares en el ámbito de la salud humana llevada a cabo por el Organismo, los expertos convinieron en que la elección entre estas dos modalidades de tratamiento dependerá de diversos factores, entre ellos la disponibilidad de planes nacionales de control del cáncer, la existencia de una masa crítica de personal científico y médico cualificado y la disponibilidad de infraestructura adecuada.

105. En segundo lugar, las cuestiones relativas a la incertidumbre y la precisión de la radiooncología adquieren cada vez mayor importancia a escala mundial a medida que las técnicas de tratamiento son cada vez más sofisticadas, con la utilización de dosis más elevadas para mejorar los índices de cura del cáncer. Se observa cada vez más la necesidad de llevar a cabo actividades de garantía de calidad y de contar con documentación precisa durante todas las etapas del plan de tratamiento del paciente. Se está fomentando la elaboración de protocolos y directrices clínicas basados en hechos comprobados.

106. Va en aumento el examen de nuevas tecnologías, como la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), la radioterapia guiada por imágenes (IGRT) y la utilización de protones y partículas cargadas, para garantizar que la práctica clínica se base en pruebas científicas sólidas. Esto es importante no sólo para los países de ingresos bajos y medios, sino también para los países de altos ingresos, puesto que los recursos son limitados y las medidas costo-utilidad revisten cada vez mayor importancia.

107. La utilización de “planes de tratamiento hipofraccionados” está experimentando también un resurgimiento, gracias a los esfuerzos por recortar los costos y a la mejora de la precisión en la administración de dosis elevadas de radiación con equipos técnicamente avanzados.

F.4. Impacto de la tecnología digital en la obtención de imágenes por rayos X

108. Los adelantos en el campo de la tecnología digital han favorecido un aumento de la aplicación de la tomografía computarizada (TC). La utilización de TC rápidas, zonales y de varias capas, por ejemplo, ha extendido la utilización de la TC a una amplia gama de aplicaciones, desde la cardiología a las investigaciones pediátricas. Esta nueva tecnología viene acompañada de dosis de radiación cada vez mayores y pone en tela de juicio nuestras prácticas establecidas en materia de determinación de la dosis. El diagnóstico radiológico es una esfera de la medicina de vital importancia para una atención de salud eficaz. En el mundo, un promedio de una persona de cada dos se somete a un examen radiológico cada año. La figura F.4 muestra que el número de exámenes radiológicos por rayos X se ha duplicado con creces en los últimos 20 años (datos basados en los facilitados por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR)). Existe un marcado desequilibrio en la distribución geográfica de los servicios — en efecto, menos del 2% de todos los exámenes realizados en el mundo se producen en países de ingresos bajos. Otra característica distintiva actual de la radiología es el ritmo del cambio tecnológico, caracterizado por una transición drástica de las imágenes analógicas, como las películas fotográficas, a las técnicas de obtención de imágenes digitales.

109. Para los países de ingresos bajos, la tecnología digital trae consigo oportunidades imprevistas, así como nuevos desafíos. Lamentablemente, muchos países en desarrollo todavía dependen casi por completo del revelado manual de las películas fotográficas para obtener imágenes con fines de diagnóstico. Esta metodología es difícil desde un punto de vista técnico y a menudo da lugar a

²⁴ Para más información, véase la dirección <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Meetings/Announcements.asp?ConfID=35265>

imágenes de mala calidad. También es nociva para el medio ambiente. No obstante, resulta especialmente grave el modo en que ese proceso puede limitar la prestación eficaz de servicios, cuando escasean los equipos radiológicos y la mano de obra cualificada. Las imágenes médicas digitalizadas pueden enviarse electrónicamente a lugares lejanos, lo que permite acceder a centros de excelencia desde lugares remotos o con recursos limitados para obtener diagnósticos de expertos y recibir ayuda para la capacitación profesional. Gracias al perfeccionamiento de esta tecnología y a una mayor reducción de los costos, la imaginología digital es cada vez más viable para los países en desarrollo desde el punto de vista financiero. Las constantes mejoras de la tecnología digital auguran una alternativa futura al procesamiento manual de imágenes de películas fotográficas, y traen consigo la esperanza de una utilización más eficaz y generalizada de los servicios radiológicos.

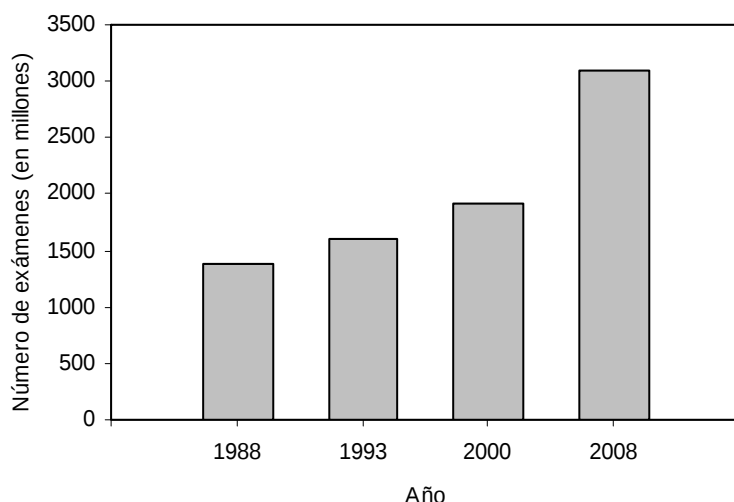


Fig. F-4. Tendencia mundial de los exámenes radiológicos por rayos X (registros oficiales del UNSCEAR, 2008)

G. Medio ambiente

G.1. Técnicas nucleares para la cuantificación de la descarga submarina de aguas subterráneas²⁵

110. El agua fluye de los continentes hacia el mar a través de los ríos y los acuíferos. Cuando los acuíferos llegan a la costa descargan agua dulce en el océano. Las estimaciones acerca de esa descarga submarina de aguas subterráneas (SGD) varían considerablemente entre el 6% y el 100% de aportaciones de agua dulce a las aguas costeras, debido en gran medida a la variabilidad regional y temporal de la SGD. Más recientemente, la SGD ha sido objeto de especial atención en la esfera de la gestión de zonas costeras debido a su potencial como fuente de agua dulce en zonas que sufren escasez de agua. Asimismo, si la SGD contiene agua salobre, puede utilizarse en plantas de desalación. Por otro lado, la SGD también puede contener altos niveles de contaminantes (nutrientes, metales, plaguicidas), afectando así a los ecosistemas costeros. Esto puede derivar en brotes de floraciones de algas nocivas y en la contaminación de las regiones costeras. Por último, como instrumento de gestión, el conocimiento del volumen de la descarga submarina de aguas subterráneas ayuda a evitar la sobreexplotación de los acuíferos costeros y la intrusión de agua salada.

²⁵ Se puede consultar información adicional en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) o en <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>.

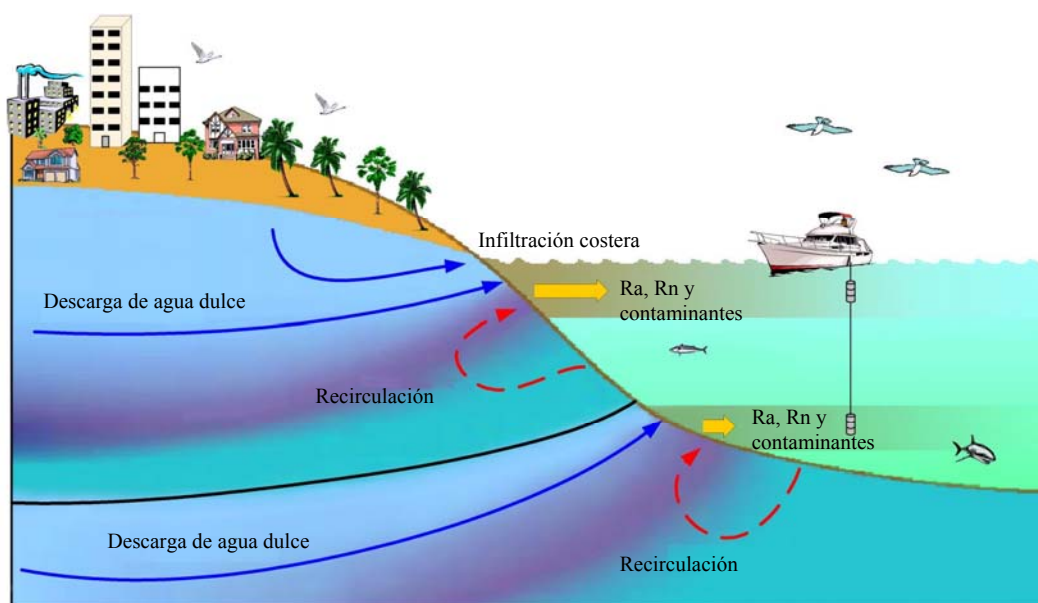


Fig. G-1. Ilustración del concepto de descarga submarina de aguas subterráneas. El gradiente hidráulico provoca la descarga de agua dulce en el mar. La recirculación del agua marina provocada, por ejemplo, por las mareas, contribuye a la SGD.

111. Se han desarrollado técnicas de medición de radio y radón para detectar y cuantificar la SGD en regiones costeras²⁶; la concentración de ambos radionucleidos en la SGD es mayor que en el agua marina. Se pueden detectar fuentes de SGD mediante la medición de la distribución espacial de radio y radón en las aguas costeras. Los cambios temporales en sus concentraciones — principalmente como resultado de la mezcla de la SGD y el agua de mar provocada por las mareas — permiten determinar el volumen de la SGD. Además, la determinación de cuatro isótopos del radio (radio 223, radio 224, radio 226 y radio 228) ayuda a entender los períodos de dispersión y mezcla de la SGD en las aguas costeras. Habida cuenta de lo fácil que resulta utilizar el radón y el radio, como trazadores de la SGD, se prevé un aumento de su empleo en las zonas costeras sometidas a presiones ambientales.

G.2. Conocimiento del ciclo del carbono: aplicación de técnicas nucleares en la evaluación de los flujos de partículas entre la superficie del océano y el fondo del mar

112. Una cuestión fundamental y aún no resuelta en relación con la biogeoquímica marina es el conocimiento de los mecanismos que controlan y aumentan el flujo de materiales entre la superficie del océano y el fondo del mar. El océano es un enorme sumidero de carbono y la captura de cantidades cada vez mayores de CO₂ está provocando su acidificación. Las “partículas sumergidas” constituyen el mecanismo de eliminación definitiva del carbono y otros elementos y contaminantes de las capas superiores del océano. Ello incluye al carbono atmosférico, que es convertido de CO₂ a biomasa y secuestrado al fondo del mar por las partículas sumergidas, los contaminantes y los elementos radiactivos. Mediante el análisis de muestras de partículas en suspensión de distintas profundidades del océano se pueden evaluar diversos factores que controlan la transferencia de carbono de la superficie al fondo del océano.

²⁶ Véase también el documento titulado *Nuclear and Isotopic Techniques for the Characterization of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Zones* (IAEA-TECDOC-1595, 2008).

113. Esas partículas sumergidas son el principal vehículo para la exportación de carbono de la superficie al fondo del océano. Cuando estas partículas caen al fondo del mar, el carbono orgánico que contienen se remineraliza y adquiere forma inorgánica, lo que facilita en gran medida su liberación y redistribución en las aguas oceánicas a distintas profundidades. El alcance de esa redistribución determina la cantidad de CO₂ que el océano puede absorber de la atmósfera. El radionucleido natural torio 234 se ha utilizado crecientemente en los últimos años para cuantificar los flujos de partículas y la exportación de carbono de las capas superiores del océano, tanto en alta mar como en entornos costeros. El torio 234 es un isótopo reactivo frente a partículas producido en el agua de mar por la desintegración radiactiva de su predecesor conservador disuelto, el uranio 238. El desequilibrio entre el uranio 238 y la actividad total medida del torio 234 refleja la tasa neta de exportación de partículas de la superficie del océano en periodos de tiempo de días a semanas.

114. Esta técnica se aplicó recientemente en un proyecto internacional realizado en la costa del Océano Ártico para evaluar las repercusiones del derretimiento de los hielos perennes provocado por el calentamiento climático, y el consiguiente aumento de la descarga de material orgánico a través de los ríos, desde la costa hasta las aguas abiertas.



Fig. G-2. Utilización de una bomba de gran volumen in situ a fin de recoger partículas que se utilizan para medir la concentración de radionucleidos en aguas árticas.

H. Recursos hídricos

115. El tercer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo²⁷ y el quinto Foro Mundial del Agua, celebrado en Estambul en 2009, destacaron cuestiones cruciales relacionadas con el agua en un mundo en evolución. Como factor crítico que afecta a la sociedad humana y la sostenibilidad de los ecosistemas, las amenazas que suponen para los recursos hídricos el cambio climático, el aumento de los costos de los alimentos y de la energía y la crisis económica mundial hacen aún más urgente la necesidad de solucionar los problemas relacionados con el agua.

²⁷ Tercer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (UNESCO, 2009) http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/index_es.shtml

116. Por ello, es fundamental el refuerzo de la cooperación entre organismos de todo el mundo para estudiar los vínculos entre el agua y otros factores. El Organismo analiza esos vínculos en el marco de su programa de recursos hídricos. La hidrología isotópica proporciona instrumentos únicos para abordar problemas complejos relacionados con el agua y ayuda al personal directivo y los encargados de elaborar políticas a comprender el estrecho vínculo que existe entre la producción de energía y alimentos por un lado, y la utilización de los recursos hídricos por el otro. Tanto los alimentos como la energía tienen un impacto significativo en la sostenibilidad de los recursos hídricos y la disponibilidad de agua incidirá de manera importante en la eficacia con que se satisfará la demanda de alimentos y energía. Una multitud de factores afectan y se ven afectados por los recursos hídricos, o por su escasez, y los vínculos entre el agua y los factores y las presiones de carácter político, económico, social y ambiental indicados en la figura H-1 señalan la necesidad de una gestión y planificación integradas de los recursos hídricos.

117. Con demasiada frecuencia, la falta de conocimiento de los sistemas hidrológicos y del ciclo del agua a escala local y nacional impide una gestión eficaz y sostenible del agua. Los enfoques nucleares, tales como la hidrología isotópica, ayudan a abordar esa deficiencia y pueden ser un medio mucho más rápido para obtener información clave que los enfoques hidrológicos de vigilancia tradicionales.

118. Las técnicas isotópicas para la evaluación de los recursos hídricos son cada vez más accesibles debido al uso ampliado de los analizadores de espectroscopia láser recientemente desarrollados para medir los isótopos del agua. El OIEA desempeñó un papel fundamental en la evaluación del comportamiento de esta tecnología y en la actualidad presta asistencia a los Estados Miembros en la adquisición de los analizadores y ofrece capacitación a los técnicos. Esos instrumentos son más baratos y fáciles de usar que los espectrómetros de masas para la determinación de relaciones isotópicas que se han utilizado comúnmente desde el decenio de 1940. Por lo tanto, esa tecnología permite que un creciente número de grupos de expertos sobre recursos hídricos tengan acceso a instrumentos basados en isótopos para la evaluación de esos recursos. Se prevé un aumento exponencial de la utilización de esa tecnología láser durante el próximo decenio.

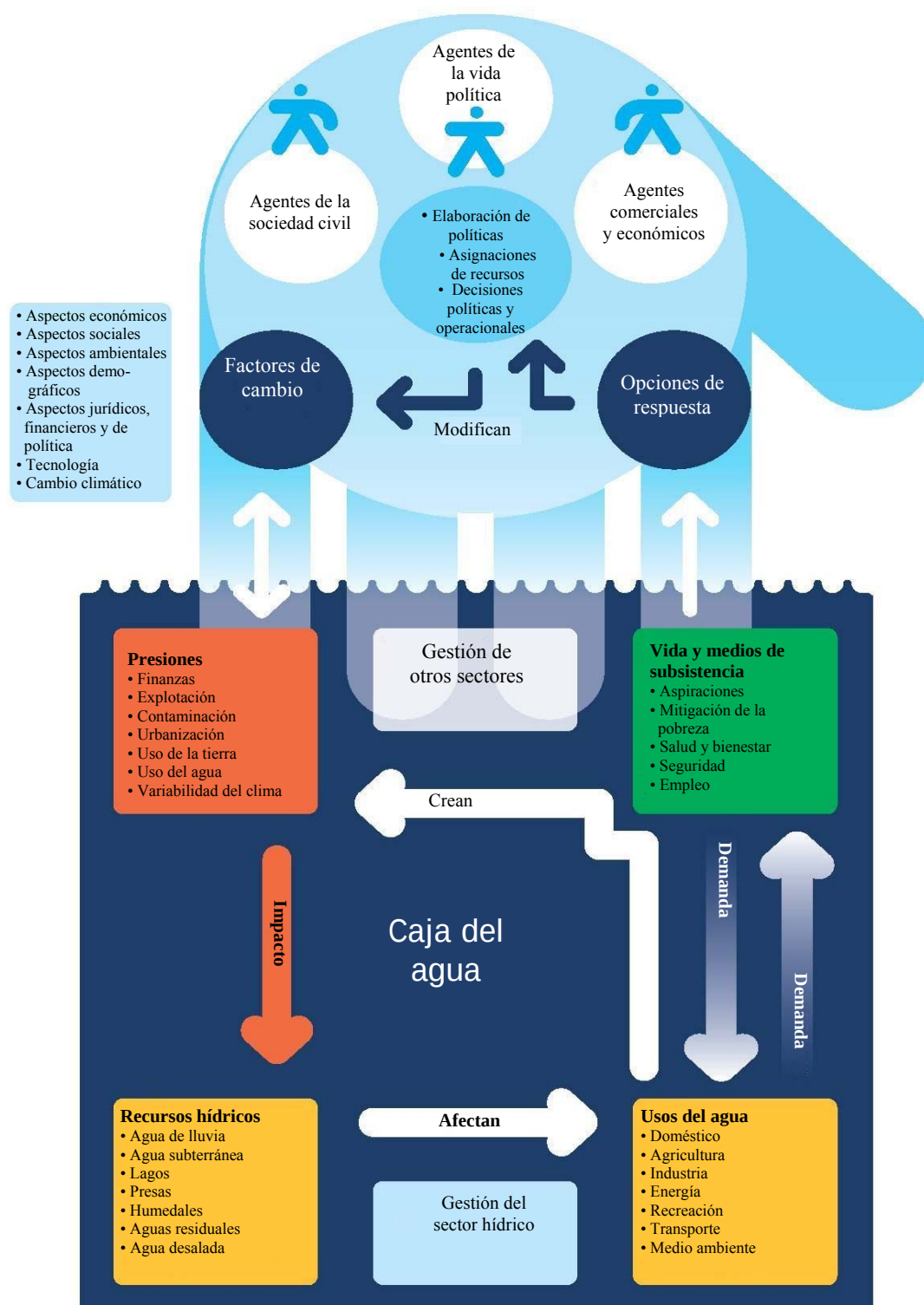


Fig. H-1. Elementos y procesos sociales, políticos y económicos que afectan la sostenibilidad de los recursos hídricos (Fuente: Tercer Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo, 2009).

H.1. Actuar con conocimiento de causa

119. Entre sus ideas fundamentales y en el marco de su tema “Conciliar las Divisiones por el Agua”, el quinto Foro Mundial del Agua hizo hincapié en la necesidad de “actuar con conocimiento de causa” (es decir, primero hay que saber bien cómo funciona un determinado sistema hidrológico para poder tomar después las medidas de gestión apropiadas). A fin de adaptar o mitigar el impacto del cambio

climático, es esencial entender primero la situación y el funcionamiento de un recurso hídrico dado en las condiciones actuales. El quinto Foro Mundial del Agua²⁸ formuló tres recomendaciones clave que guardan relación con la aplicación de tecnologías nucleares:

- ✓ Se requiere una mayor comprensión del impacto del cambio climático a nivel mundial en los recursos hídricos, los procesos hidrológicos naturales y los ecosistemas;
- ✓ Se requiere la elaboración, aplicación y fortalecimiento de planes y programas transnacionales, nacionales y/o subnacionales a fin de prever y abordar el posible impacto del cambio climático a nivel mundial;
- ✓ Se requiere más apoyo para las investigaciones en la esfera de la utilización y gestión sostenibles de los recursos hídricos y debería promoverse la cooperación entre los organismos internacionales.

H.2. Utilización de isótopos estables para adquirir conocimientos sobre la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas

120. Las técnicas basadas en los isótopos estables se utilizan crecientemente para comprender la distribución espacial de los diversos procesos que afectan a la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas a nivel tanto local como mundial. Esto se demuestra en la figura H-2, en la que se observa un mapa de los valores correspondientes al oxígeno 18 presente en las aguas subterráneas de la región de Los Naranjos, en México, que indica la importancia de la recarga en lugares altos de la parte noroeste de la zona de estudio (color azul) y el impacto de la infiltración de aguas superficiales en lugares menos altos de las otras partes de la región (colores rojo y naranja). Esa información proporciona datos de referencia clave para evaluar el impacto del cambio climático y otros factores en los recursos de aguas subterráneas locales.

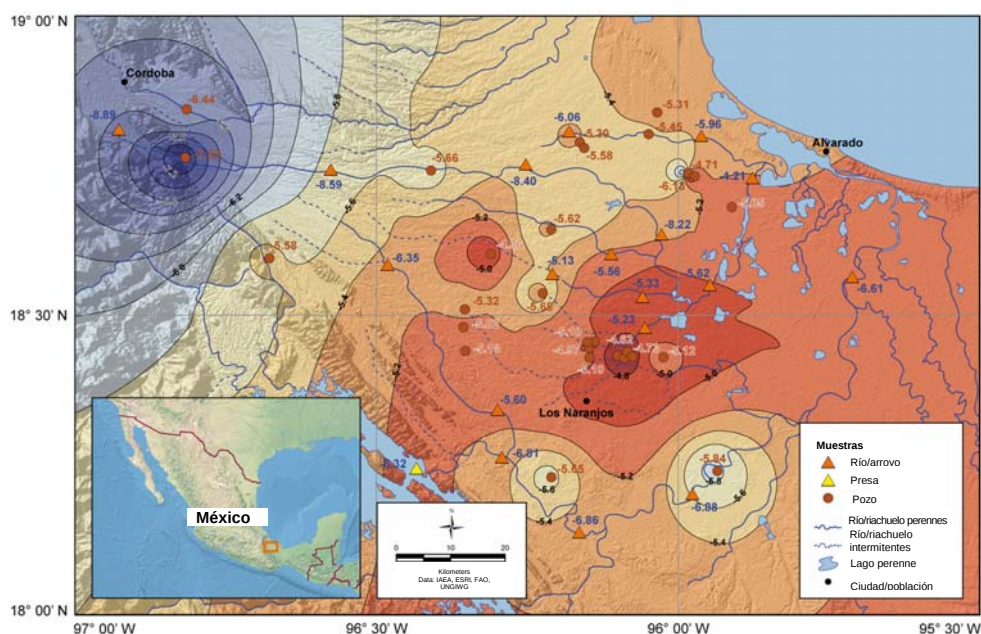


Fig. H-2. Interpolación de los valores del oxígeno 18 presente en las aguas subterráneas de la región Los Naranjos, en México. Los valores del isótopo más negativos (color azul en la parte superior izquierda) indican la recarga en lugares altos. Los colores rojo y naranja indican las contribuciones de la recarga y mezcla en lugares situados a menor altura.

²⁸ Véase el sitio <http://www.worldwaterforum5.org/>

121. En la medida en que la hidrología isotópica ayuda a mejorar la evaluación de los recursos hídricos, también está llamada a desempeñar una función en la planificación energética. El personal encargado del programa de recursos hídricos del Organismo y el personal de la Sección de Gestión de Suelos y Aguas y Nutrición de los Cultivos de la División Mixta FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Agricultura y la Alimentación, y el de la Sección de Estudios Económicos y Planificación del Departamento de Energía Nuclear cooperan conjuntamente en una iniciativa relacionada con la planificación del clima, la tierra, la energía y el agua (CLEW). Si se logra establecer un enfoque eficaz, éste se utilizaría para ayudar a los Estados Miembros a evaluar el impacto combinado de una amplia gama de cuestiones, entre ellas, cuestiones económicas, sociales, ambientales, demográficas, normativas, jurídicas, financieras y tecnológicas, así como la cuestión relacionada con el cambio climático. La planificación del CLEW también facilitaría la cooperación entre diferentes ministerios y organismos públicos en el establecimiento de soluciones integradas para el desarrollo sostenible de los recursos hídricos y energéticos.

I. Producción de radioisótopos y tecnología de la radiación

I.1 Radioisótopos y radiofármacos

I.1.1. Productos radioisotópicos y su disponibilidad

122. La demanda cada vez mayor de radioisótopos para aplicaciones médicas e industriales así como los avances en las tecnologías conexas atrajeron la atención a escala mundial en 2009 debido a la severa escasez de suministros de isótopos médicos, en especial de molibdeno 99 producido por fisión. Los radioisótopos producidos en reactores siguen siendo el principal apoyo para las aplicaciones médicas e industriales, mientras que las capacidades de producción de los ciclotrones también continúan aumentando, principalmente a raíz del establecimiento de centros regionales que producen radioisótopos con períodos de semidesintegración muy cortos para su utilización en la tomografía por emisión de positrones (PET). Éste y otros adelantos recientes en el desarrollo de radiofármacos se consideraron en tres reuniones internacionales importantes que se celebraron en 2009²⁹.

123. El creciente interés en el uso de la PET y la PET/TC (tomografía computarizada) se observa claramente en el número de ciclotrones establecidos exclusivamente para la producción de trazadores para PET. Se calcula que actualmente hay en funcionamiento en todo el mundo unos 650 ciclotrones y 2 200 sistemas de PET. Los usos clínicos siguen estando dominados por las aplicaciones bien establecidas de la fluorodesoxiglucosa (FDG) marcada con flúor 18 en pacientes con cáncer, al mismo tiempo que la atención se centra cada vez más en la necesidad de hacer frente a los desafíos y requisitos inherentes al desarrollo y la utilización de otros radiofármacos utilizados en la PET. La mayor disponibilidad de generadores de germanio 68-galio 68 y el creciente número de centros de PET han impulsado el desarrollo de radiofármacos basados en galio 68, incluidos módulos de síntesis automatizados conexas. La idea de utilizar radioisótopos de período relativamente más largo para la PET en el caso de determinadas investigaciones de procesos y distribución biológicos que entrañan períodos más prolongados ha llevado a numerosos centros a estudiar la posibilidad de producir ese tipo de trazadores para PET, como por ejemplo, productos de cobre 64 y yodo 124, utilizando el tiempo libre disponible de los ciclotrones médicos existentes. Otro factor que explica el interés en estos productos es el papel que desempeñan como instrumentos precisos para proporcionar datos dosimétricos para aplicaciones terapéuticas en las que se utilizan radioisótopos análogos con fines terapéuticos.

²⁹ Reunión anual de la Sociedad de Medicina Nuclear, en Toronto (Canadá), y de la Asociación Europea de Medicina Nuclear, en Barcelona (España); Simposio Internacional bienal sobre radiofarmacología, en Edmonton, Canadá.



Fig. I-1. Distribución de ciclotrones para la producción de trazadores de PET (fuente: Dr. D. Schlyer, Laboratorio Nacional de Brookhaven (Estados Unidos de América) basada en la información facilitada por cuatro importantes fabricantes de ciclotrones)

124. Los progresos en la aplicación de enfoques de terapia con radionucleidos, como el tratamiento de tumores neuroendocrinos mediante el uso de péptidos marcados con lutecio 177 o itrio 90, han impulsado el desarrollo de unidades de síntesis y dispositivos de blindaje automatizados para la preparación in situ en pequeña escala de radiofármacos terapéuticos, lo que requiere la manipulación de cantidades relativamente mayores de radioisótopos, así como de los radioisótopos equivalentes utilizados en PET para estudios de dosimetría. Del mismo modo, el interés por utilizar radioisótopos emisores de partículas alfa para la terapia contra el cáncer ha permitido perfeccionar los métodos de producción de emisores alfa de período corto, como el bismuto 213.

I.1.2. Seguridad del suministro de molibdeno 99³⁰

125. La grave escasez de suministros de molibdeno 99 producido por fisión y de generadores de tecnecio 99m ha seguido afectando a las aplicaciones médicas para el diagnóstico de pacientes de casi todo el mundo. El Reactor de Alto Flujo de Petten (Países Bajos) está en régimen de parada desde febrero de 2010 para realizar las actividades de mantenimiento y las mejoras necesarias, y se prevé volver a ponerlo en funcionamiento en agosto de 2010. Además, el reactor NRU, del Canadá, se puso en régimen de parada en mayo de 2009 para realizar reparaciones importantes debido a fugas y no se prevé reanudar su explotación al menos hasta finales de julio de 2010.

126. A fin de compensar en parte la escasez, se aumentó, en la medida de lo posible, la producción del reactor BR2, de Mol (Bélgica), y la del reactor Safari-1, de Sudáfrica. La instalación de producción de isótopos de Covidien en Petten (Países Bajos) está utilizando el reactor MARIA de Polonia para irradiar los blancos de UME existentes para la producción de molibdeno 99 a fin de aumentar el suministro de ese isótopo. Del mismo modo, la instalación de producción del Instituto de Radioelementos de Fleurus (Bélgica) está utilizando el reactor de Řež (República Checa) para irradiar blancos de UME. La Organización Australiana de Ciencia y Tecnología Nuclear (ANSTO) completó la puesta en servicio en caliente de su nueva instalación de producción, en la que se irradian blancos de UPE, en el reactor australiano de agua ligera de piscina abierta (OPAL), y obtuvo la aprobación del órgano regulador para iniciar la producción periódica en gran escala, lo que le permitirá producir hasta el 10% de la demanda mundial con fines de exportación. Otra instalación de producción basada en UPE, construida en Egipto (sobre la base de tecnología argentina) y adyacente al reactor ETRR-2

³⁰ Se puede consultar información adicional en las secciones pertinentes del último Informe Anual (<http://www.iaea.org/Publications/Reports/Anrep2009/index.html>) o en <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>.

casi ha concluido los exámenes técnicos requeridos por el órgano regulador y se prevé recibir permiso para iniciar la puesta en servicio en caliente a mediados de 2010.

127. Diversos interesados directos, como asociaciones médicas profesionales, han hecho llamamientos a la cooperación internacional y el apoyo gubernamental. A petición del Gobierno del Canadá, la AEN/OCDE creó el Grupo de Alto Nivel sobre la seguridad del suministro de radioisótopos médicos³¹ para abordar cuestiones pertinentes relativas a la mejora de la fiabilidad de los suministros de molibdeno 99³². Además, la Asociación de Productores de Imagen y Proveedores de Equipamiento (AIPES) ha intensificado su función de coordinación y difusión de información relacionada con los calendarios de explotación y los períodos de parada de los reactores. A este respecto, el apoyo del Organismo a la tarea de facilitar coaliciones de reactores de investigación ha dado lugar a una iniciativa empresarial en la que se cuenta con cuatro reactores de Asia central y Europa y una instalación de procesamiento de Hungría. El Gobierno del Canadá estableció un grupo de cuatro expertos con el objetivo de recomendar medidas para asegurar los suministros de radioisótopos de uso médico, y su informe se publicó en diciembre de 2009³³.

I.2. Aplicaciones de las tecnologías de la radiación

I.2.1. Esterilización con haces de electrones de materiales de embalaje y contenedores asépticos

128. La radiación gamma se ha utilizado como método seguro y rentable para la esterilización de productos de atención de salud, componentes y embalajes desechables durante más de 50 años. La irradiación con haces de electrones se aceptó para fines de esterilización hace unos 30 años, cuando se dispuso de aceleradores de electrones de mayor eficiencia y fiabilidad, y actualmente éste es el método preferido para procesar productos de gran volumen y poco valor (por ejemplo, jeringas), así como los de poco volumen y gran valor (por ejemplo, dispositivos cardiorácicos).

129. Recientemente se puso a disposición una nueva metodología de haz de electrones, desarrollada en los Estados Unidos de América, que ofrece una alternativa sin componentes químicos para la esterilización o desinfección de materiales de embalaje y contenedores asépticos. El embalaje aséptico de jugos de fruta, bebidas lácteas y otras bebidas figura entre los segmentos de mayor crecimiento de la industria de procesamiento de alimentos y, por tanto, existe un interés considerable en las tecnologías alternativas de esterilización de embalajes que reduzcan al mínimo el consumo de energía y agua, y ofrezcan al mismo tiempo los resultados requeridos. Actualmente están instaladas o en fase de construcción en todo el mundo 27 unidades de este tipo que utilizan haces de electrones. El dispositivo más nuevo en esta esfera utiliza emisores de haces de electrones de baja energía concebidos para esterilizar el interior de botellas de bebidas (véase la figura I-2). Los emisores de haces de electrones se pueden combinar y configurar de diversas maneras y se pueden instalar en las líneas de producción, lo que posibilita la esterilización de botellas, tapas, bolsas y bolsitas. Según la configuración, se pueden irradiar tanto el interior como el exterior, o ambas superficies, en cuestión de segundos. De este modo, se eliminan los procesos de tratamiento a alta temperatura y el uso de productos químicos, así como el lavado posterior al tratamiento químico, ahorrando así energía y agua, reduciendo los costos y simplificando la logística.

³¹ <http://www.nea.fr/html/ndd/med-radio/>

³² El Organismo está representado como observador en el Grupo de Alto Nivel sobre la seguridad del suministro de radioisótopos médicos.

³³ Véase <http://nrca.gc.ca/eneene/sources/uranuc/pdf/panrep-rapexp-eng.pdf>

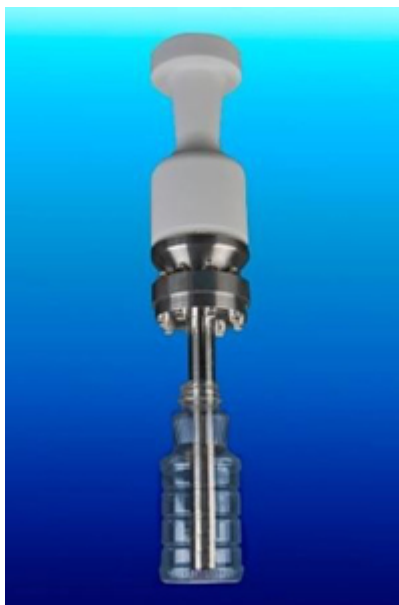


Fig. I.-2. Emisor de haces de electrones esterilizando el interior de una botella que se llenará de bebida (<http://www.aeb.com/>).

I.2.2. Radiosíntesis de nanoestructuras basadas en el carbono

130. Las nanoestructuras basadas en el carbono, como los nanotubos de carbono, han abierto posibilidades estimulantes en las aplicaciones de la nanotecnología, especialmente la transformación de la microelectrónica basada en el silicio a la escala nanométrica. Los métodos basados en haces de electrones tienen características excepcionales que permiten realizar tareas como la soldadura de nanotubos de carbono, la configuración de estructuras que contienen nanotubos de carbono mediante litografía electrónica, la síntesis de alambres metálicos confinados en nanotubos, y la canalización de iones para posibles aplicaciones en los sistemas de liberación de medicamentos y la industria de la electrónica. El año pasado, un grupo de investigadores del Japón y China informó de que, al centrar un haz de electrones de 120 keV en una nanoescama de grafito, ésta puede convertirse en grafeno y, ulteriormente, en una nanocinta de grafeno. Por último, la irradiación continua da como resultado un único filamento de carbono que podría ser un alambre molecular perfecto. De este modo, la tecnología de haces de electrones facilita la fabricación de la mayoría de las nanoestructuras basadas en el carbono, que encierran muchas posibilidades como componentes básicos clave de dispositivos moleculares de uso médico y electrónico.

131. A fin de facilitar la interacción entre grupos de investigación, la transferencia de soluciones científicas a la industria y los productos a los usuarios finales³⁴, se creó EUMINAFab, un consorcio de empresas, universidades y laboratorios nacionales europeos en el ámbito de la micro y la nanofabricación, que integra tecnologías, instalaciones y conocimientos especializados, y ofrece acceso gratuito a 36 instalaciones con el personal de apoyo técnico necesario en las esferas de la micro y la nanoconfiguración, y la deposición, replicación y caracterización de películas finas.

³⁴ También se abarcó un ámbito similar en un taller del Organismo celebrado en Rumania sobre las “Tendencias de la nanociencia: teoría, experimento, tecnología”, en que se describió el papel de las técnicas de la radiación en la nanotecnología. El taller fue organizado conjuntamente por el Centro Internacional de Física Teórica “Abdus Salam” (CIPT), el OIEA y el Instituto Nacional Horia Hulubei de Física e Ingeniería Nuclear.