



TERAGNOSIS

La nueva medicina nuclear contra el cáncer

Almacenamiento geológico profundo para residuos de alta actividad: visión global y situación en España

Eloísa del Pino, presidenta del CSIC: “Para la ciencia española, la de 2011 a 2019 ha sido una década perdida”

Pruebas nucleares atmosféricas (1945-1980) y diseminación de radiactividad artificial en el medioambiente

Sede electrónica del CSN



Desde su renovación, la sede electrónica del Consejo de Seguridad Nuclear ha ampliado el número de trámites que se pueden realizar por medios telemáticos, lo que facilita la operatividad tanto a instituciones como a empresas y particulares.

Entre la veintena de trámites que están ahora disponibles mediante esta vía destacan los siguientes:

- ▶ Registro general
- ▶ Pago de tasas
- ▶ Solicitudes de acreditación para operar o dirigir instalaciones radiactivas o de radiodiagnóstico médico
- ▶ Consultas y solicitudes de información al portal de Transparencia
- ▶ Envío de ficheros y documentación
- ▶ Consulta por parte de los trabajadores expuestos de sus datos en el Banco Dosimétrico Nacional
- ▶ Denuncias radiológicas
- ▶ Solicitudes de visita al Centro de Información

<https://sede.csn.gob.es>

La radioterapia sigue avanzando

El uso de las radiaciones para tratar a los enfermos de cáncer ha recorrido una larga trayectoria, jalonada por avances sustanciales, que aumentan su eficacia y selectividad, atacando las células tumorales evitando dañar las sanas. Uno de los últimos avances, que lleva ya algunos años practicándose para tumores neuroendocrinos y ahora se va extendiendo a otros muchos que no responden a otras terapias, es la teragnosis, que combina diagnóstico y terapia al utilizar una misma molécula, a la que se añade un isótopo radiactivo, lo que permite ver la zona a tratar al tiempo que se realiza el tratamiento. Es una terapia personalizada, que prolonga la vida del paciente y reduce los efectos secundarios. Esta técnica se explica con detalle en el reportaje que incluimos en este número.

Otro reportaje aborda el programa de becas Marie Sklodowska-Curie, puesto en marcha en 2020 por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para promover la presencia femenina en centros de investigación e instalaciones radiológicas y nucleares, un ámbito donde persiste una notable masculinización, ya que las mujeres siguen siendo una parte minoritaria. También tratamos en este número de Alfa el problema de la presencia de radioactividad de origen natural en el agua destinada al consumo humano. Se trata de un problema minoritario y puntual

en el caso español, pero al que las empresas suministradoras deben atender mediante controles de detección y, en su caso, medidas de eliminación, de acuerdo con el RD 03/2023 que regula la calidad del agua.

Algoritmo es una de las palabras que mayor difusión han tenido en los últimos años, ya que se sabe que está detrás de muchas aplicaciones tecnológicas y cuya utilización, con frecuencia junto con la

Las becas Marie Sklodowska-Curie, del OIEA, pretenden promover la presencia femenina en el ámbito radiológico y nuclear, donde aún es minoritaria

inteligencia artificial, suscita temores, a veces fundamentados. Un reportaje trata esta cuestión y se complementa con otro dedicado a la vida de Alan Turing, el genio matemático inglés, fallecido en 1954 con 41 años, que fue pionero en este campo y, en general, en el de la computación y la criptografía. Por último, dedicamos otro reportaje al programa Artemis, puesto en marcha por la NASA, la ESA y otras

organizaciones, con el propósito de enviar de nuevo astronautas a la Luna en 2025, más de 50 años después del Apolo 17, e instalar allí una base permanente.

La protagonista de la Entrevista de este número es Eloísa del Pino, presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que muestra la situación actual del mayor organismo español de I+D+i y sus perspectivas de futuro. También describe la situación creada por las crisis padecidas en los últimos años sobre la ciencia española y asegura que la de 2011 a 2019 ha sido una década perdida.

En la parte más técnica de la revista ofrecemos un artículo dedicado a la situación actual en el mundo, y las perspectivas del caso español, en cuanto al almacenamiento geológico profundo, considerado por los expertos como la opción más adecuada para la gestión final del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos de alta actividad. El otro artículo analiza la contaminación radiactiva local, regional y global de las pruebas nucleares atmosféricas realizadas por las grandes potencias, singularmente Estados Unidos y la Unión Soviética, entre 1945 y 1980. La Radiografía está dedicada a la Guía sobre protección radiológica en el manejo de fallecidos tras un tratamiento con radionucleidos.

Confiamos en que todo el contenido del número resulte de su interés. 

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 54
Junio 2023



Comité Editorial

Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
Teresa Vázquez Mateos
Javier Zarzuela Jiménez
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Ignacio Fernández Bayo

Comité de Redacción

J. Pedro Marfil Medina
Natalia Muñoz Martínez

Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Juan Enrique Marabotto García
Ignacio Fernández Bayo

Edición y distribución

Consejo de Seguridad Nuclear
Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid
Fax 91 346 05 58
peticiones@csn.es
www.csn.es

Coordinación editorial

Divulga S.L.
C/Diana, 16
28022 Madrid

Fotografías

CSN, Divulga, OIEA,
DepositPhotos, iStock.

Impresión

Editorial MIC
C/Artesiano s/n
Pol. Ind. Trabajo del Camino
24010 León

Fotografía de portada

Escaner PET-CT

Depósito legal: M-24946-2012
ISSN-1888-8925

© Consejo de Seguridad Nuclear

Las opiniones recogidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de sus autores, sin que la revista Alfa las comparta necesariamente.

REPORTAJES

6 Volver a la Luna

Más de 50 años después de la última misión tripulada a la Luna, la del Apolo 17, la NASA, junto a la ESA y otras entidades, públicas y privadas, ha puesto en marcha el programa Artemis, que pretende volver a enviar seres humanos a nuestro satélite en 2025. Esta vez se pretende ir para quedarse y construir una estación permanente en su superficie.

13 Atraer el talento femenino al mundo nuclear

La presencia femenina en el ámbito nuclear está lejos de alcanzar los mínimos rangos de paridad. Se trata de un mundo muy masculinizado. Por eso, en 2020 el OIEA puso en marcha el Programa de Becas Marie Skłodowska-Curie, para estimular la dedicación profesional de las mujeres, facilitando su formación y la realización de prácticas.

35 La nueva medicina nuclear contra el cáncer

La teragnosis es una tecnología de medicina personalizada que combina el diagnóstico preciso y el tratamiento utilizando una misma molécula con un isótopo radiactivo, lo que permite mejorar en tiempo y eficacia la terapia contra el cáncer. Usada inicialmente para tumores neuroendocrinos, se está extendiendo rápidamente su aplicación a otros pacientes oncológicos.

41 El imperio del algoritmo

Desde la concesión de un crédito a la selección de personal, desde las recomendaciones que nos aparecen en Internet a los procesos de producción industrial, desde la atención telefónica de las empresas a las labores logísticas. Cada vez más, los algoritmos y la inteligencia artificial gobiernan nuestras vidas, a veces de forma insospechada.

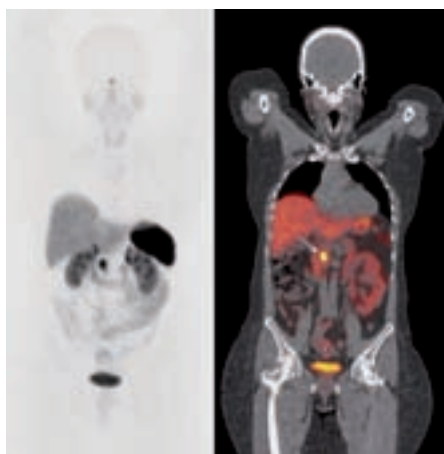
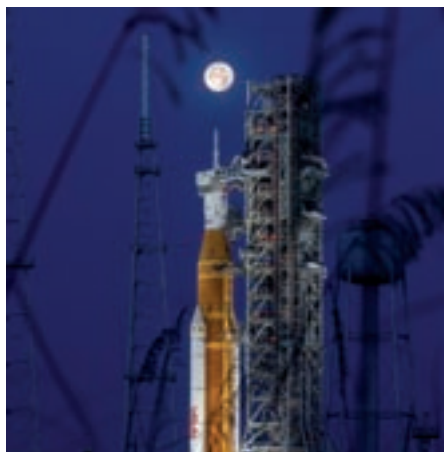
53 Agua que has de beber

La potabilización del agua exige controlar la posible presencia de radionucleidos naturales, especialmente cuando el suministro se nutre de acuíferos subterráneos. El RD 03/2023 ha actualizado las normas para el control de su presencia, establecido los límites y regulado las medidas a tomar si se detecta radiactividad en el agua.

59 Las cuatro revoluciones de Alan Turing

Muerto poco antes de cumplir los 42 años, el genio británico ya había revolucionado la ciencia de la computación, resuelto una de las cuestiones clave de las matemáticas, descifrado el código criptográfico de la sofisticada máquina Enigma, puesto los pilares de la inteligencia artificial y propuesto un modelo matemático que explica el desarrollo de los seres vivos en su medio.

NASA-CORY HUSTON



DEPOSITPHOTOS



RADIOGRAFÍA

24 **Guía sobre protección radiológica en el manejo de fallecidos tras un tratamiento con radionucleidos**

El Foro Sanitario de Protección Radiológica creó un grupo de trabajo para elaborar una guía con las directrices y recomendaciones para el manejo, desde el punto de vista de la protección radiológica, de personas fallecidas o de restos humanos tras haber recibido un tratamiento con material radiactivo.

ENTREVISTA

26 **Eloísa del Pino, presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas:**

“Para el CSIC y para la ciencia española la de 2011 a 2019 ha sido una década perdida”

ARTÍCULOS TÉCNICOS

17 **Visión global del almacenamiento geológico profundo y situación en España**

El almacenamiento geológico profundo (AGP) es la opción elegida, por amplio consenso científico, como la más segura y eficaz para la gestión final del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos de alta actividad. Se describe aquí el concepto de AGP, el estado de desarrollo de los proyectos más adelantados en los países europeos y los avances que está realizando España en la materia.

44 **Pruebas nucleares atmosféricas (1945-1980) y diseminación de radiactividad artificial en el medioambiente**

Tras las bombas nucleares arrojadas en Hiroshima y Nagasaki se inició una escalada en la realización de pruebas atmosféricas, cada vez más potentes, especialmente por parte de Estados Unidos y la Unión Soviética, que liberaron grandes cantidades de radiactividad en las zonas afectadas y en todo el planeta, hasta que acordaron suspenderlas, en 1962.



POSIVA



64 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Publicaciones**

71 **Abstracts**

El programa Artemis
pretende llevar humanos
a nuestro satélite en 2025

Volver a la Luna

Artemis es uno de los programas más ambiciosos y emocionantes en la historia de la exploración espacial. Dirigido por la NASA, en colaboración con la ESA y empresas privadas, como SpaceX, su objetivo es volver a poner seres humanos en la Luna medio siglo después de la última misión Apolo. El pasado mes de diciembre concluyó su primera fase, Artemis 1, un vuelo de prueba sin tripulación hasta la órbita lunar de una nueva nave espacial, Orion, que el año que viene repetirá el viaje con cuatro astronautas a bordo, Artemis 2, aunque no llegarán a alunizar. Eso queda reservado a Artemis 3: alrededor de 2025, una mujer y un hombre negro pasearán sobre la superficie gris de la Luna. Pero, a diferencia de lo ocurrido con las misiones Apolo, no se trata sólo de llegar, sino de quedarse. Las siguientes fases, Artemis 4 y 5, tienen el ambicioso objetivo de establecer una presencia semipermanente en la superficie lunar, con la Artemis Base Camp, y una estación espacial lunar, Gateway, en su órbita. Todo un formidable ensayo de habitabilidad en el espacio que mira mucho más lejos: hacia Marte.

■ Texto: **Eugenia Angulo** |
Periodista de ciencia ■

El último hombre que pisó la Luna fue Eugene Cernan, comandante del Apolo 17, en 1972. Antes de regresar al módulo lunar Challenger, se arrodilló y escribió las iniciales de su hija Tracy,

TDC, en el polvo lunar. Después pronunció un breve discurso: «Nos vamos como vinimos y, si Dios quiere, como volveremos, con paz y esperanza para toda la humanidad». Han pasado más de 50 años desde que aquellas letras se escribieran en tierra lunar. Aún no hemos vuelto, al menos no del todo.

El 16 de noviembre del pasado año, la NASA lanzó la primera fase de su ambicioso programa Artemis para volver a poner humanos en la Luna: Artemis 1, una misión sin tripulación a bordo de una nueva nave espacial llamada Orion y propulsada por el Sistema de Lanzamiento Especial (SLS), el segundo

cohetes más potente de la historia tras Super Heavy, de SpaceX. Orión recorrió más de dos millones de kilómetros en unos 25 días, realizó un sobrevuelo por la superficie de la Luna y regresó a la Tierra el 11

de diciembre, exactamente el mismo día, 50 años después, que dos astronautas del Apolo 17, Cernan y Harrison Jack Schmitt, alunizaran en el valle Taurus-Littrow de la Luna.

Durante tres días de aquel diciembre de 1972, el comandante Cernan y el geólogo Schmitt, único científico que ha pisado la Luna, exploraron la zona, recorrieron 31 kilómetros en su rover lunar y recogieron más de 100 kg de rocas, una de las cuales, de 150 gramos, es de las más importantes que las misiones Apolo trajeron a la Tierra. Ambos permanecieron más tiempo y viajaron más lejos sobre la superficie lunar que las tripulaciones anteriores. De camino, a una distancia de unos 29.000 kilómetros de nuestro planeta, los astronautas tomaron una de las fotografías más reproducidas de

NASA



El astronauta Harrison Schmitt y el rover de la misión Apolo 17 sobre la Luna. Abajo, la "canica azul", la primera imagen de la Tierra entera, suspendida en el espacio, tomada desde el Apolo 17.



la historia, la llamada "canica azul", en la que, por primera vez, podía verse la Tierra entera, iluminada y suspendida en medio del espacio.

Para Cernan, la misión Apolo 17 fue la exploración lunar más significativa de la historia. "Éramos

la prueba viviente de que Apolo había dado sus frutos. El mero hecho de estar allí era un triunfo de la ciencia a celebrar por los siglos, pero era más que un sueño personal hecho realidad, sentía que yo representaba a toda la humanidad. El programa Apolo tenía algo de eterno", escribió en su libro *El último hombre en la Luna*. Fue la última misión Apolo.

La carrera espacial entre Estados Unidos y la Unión Soviética terminó, al menos por un tiempo, cuando el Apolo 11 pegó al mundo al televisor con las imágenes de Neil Armstrong y Buzz Aldrin caminando como niños sobre la superficie lunar. Varios viajes tripulados después, el público pareció perder interés en mirar al espacio de siempre colgado en el cielo y las misiones Apolo 18, 19 y

20 fueron canceladas. Cuando el Apolo 17 inició su viaje de vuelta a casa, los astronautas dieron una rueda de prensa televisada que algunas cadenas ni siquiera retransmitieron. Fue un final amargo. Cernan, fallecido en 2017, dijo en 2002 al periódico *Observer*: «[Ser el último hombre que ha pisado la Luna] es un honor muy dudoso. Nos dice lo mucho que no hemos hecho, en lugar de lo mucho que hemos hecho».

Artemis es un proyecto internacional liderado por la NASA en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y la Agencia Espacial Canadiense (CSA). Cuenta con una participación muy significativa de empresas privadas, como SpaceX, de Elon Musk, y Blue Origin, del multimillonario Jeff Bezos, fundador de Amazon. SpaceX tiene sus propios planes para llegar a la Luna con la nave Starship, que ya ha recibido la autorización para su primer vuelo de prueba, impulsada por el cohete Super Heavy. Pero la NASA y SpaceX tienen una relación muy amistosa, simbiótica casi. En esta nueva carrera espacial, China es el principal competidor y ya no se trata solo de llegar, sino de quedarse.

Hasta la Luna...

El lanzamiento de Artemis 1 tuvo todos los ingredientes para provocar un ataque al corazón a quien no esté acostumbrado al *space business*: son muchas las cosas que pueden salir mal. El primer intento, el 29 de agosto, se abortó en plena cuenta atrás al detectarse una fuga de hidrógeno, una grieta en el aislante térmico entre los tanques de oxígeno e hidrógeno líquidos y un extraño fallo en la refrigeración de uno de los cuatros motores del cohete Sistema de Lanzamiento Espacial (SLS). El segundo intento, el 3 de septiembre, también se canceló, esta vez por una fuga en los aparatos para llenar el cohete de combustible. Entonces vinieron las sombras y los vientos de los huracanes Ian y Nicole que lo retrasaron hasta el 16 de noviembre. Y ya, por fin, desde el mítico Centro Espacial Kennedy en Cabo Cañaveral, y a pesar de que el llamado *red team* tuvo que actuar por otra fuga imprevista, Artemis 1 despegó hacia la Luna.

Orion es, para la NASA, la mejor nave espacial de la historia. En su construcción han trabajado más de 30.000 personas y tiene dos partes: el Módulo de Servicio Europeo (EMS), del que se ha hecho cargo la ESA, y la cápsula de la tripulación, con bandera estadounidense. El EMS, construido por Airbus, vendría a ser las piernas de Orion: proporciona aire, agua, electricidad, propulsión y control de temperatura a la cápsula de la tripulación, en la que se encuentra toda la parte electrónica y el software de control, el cerebro de Orion, y donde en el futuro viajarán los astronautas. Un español, el ingeniero de la NASA Carlos García Galán, ha sido el encargado de la integración de ambas partes.

La NASA también se ha encargado del poderoso SLS, un nuevo cohete basado en el anterior Saturno V, con un peso de 2.600 toneladas y una altura superior a un edificio de 17 plantas, por encima de la antorcha de la Estatua de la Libertad. SLS ha sido por unos meses el cohete más potente del mundo, hasta

que SpaceX lanzó el 20 de abril de este año el primer vuelo de prueba de Starship, la nave con la que Elon Musk pretende llegar a la Luna y a Marte, y que recibió el impulso de Super Heavy, la bestia, el cohete más potente del mundo. Starship despegó, pero explotó a los pocos minutos de vuelo. *Space business*.

SLS sí funcionó. «El primer lanzamiento ha sido sencillamente espectacular. Aunque nuestra misión con Orion aún está en marcha y seguimos aprendiendo a lo largo del vuelo, todos los sistemas del cohete funcionaron según lo esperado», declaró después del despegue Mike Sarafin, director de la misión Artemis. El objetivo de este primer vuelo era probar todo de esta nueva tecnología antes de que lleve tripulación. Y parece que ha salido bien.

Orion recorrió más de dos millones de kilómetros en 25 días y realizó un sobrevuelo en el que se quedó a 100 km de la superficie lunar. La Luna está a 384.000 km de la Tierra, pero Orion



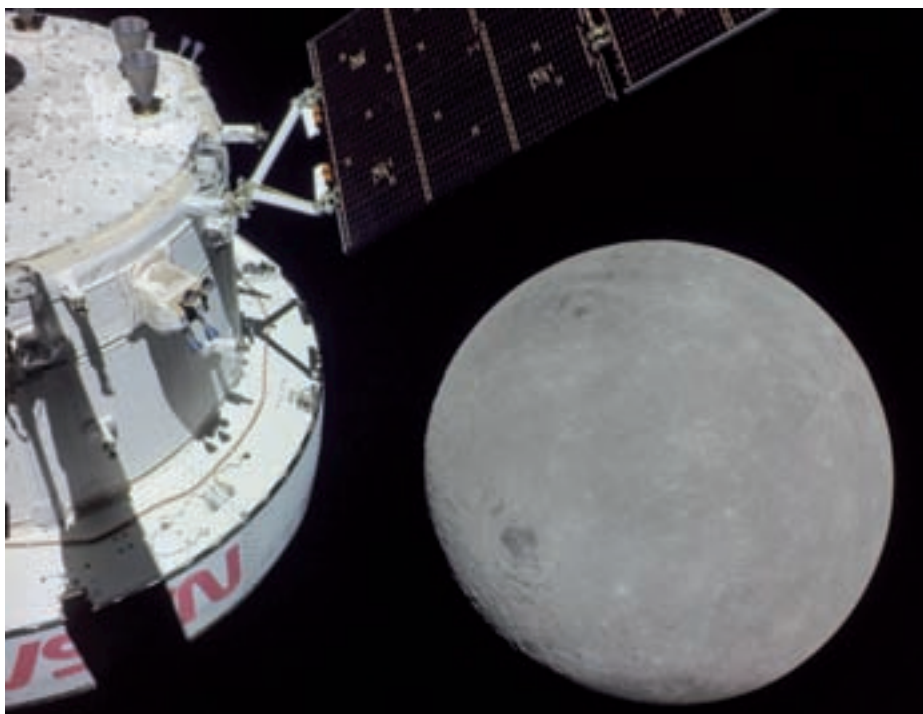
Las trece regiones candidatas para el aterrizaje de Artemis III. Cada región mide unos 15 por 15 km.

se adentró 432.192 kilómetros en el espacio profundo, batiendo el récord de mayor distancia recorrida desde la Tierra por una nave espacial diseñada para albergar tripulación, que ostentaba el Apolo 13. “Houston, tenemos un nuevo récord”, anunció la NASA. En el interior de Orion viajaron un maniquí con el nuevo traje de astronauta completo y varios sensores, y dos torsos idénticos, Helga y Zohar, para medir los efectos de la radiación del espacio sobre un chaleco especial. Orion regresó a la Tierra el 11 de diciembre con un amerizaje controlado en el océano Pacífico. Su escudo térmico también aguantó.

...y más allá

En enero, la NASA publicó un análisis muy detallado de los miles de datos que se tomaron en cada paso de Artemis I, que confirmó los buenos datos iniciales, y ya ha dado luz verde para usar el SLS en misiones tripuladas. “Estamos aprendiendo todo lo que podemos de Artemis I para asegurarnos de que comprendemos plenamente todos los aspectos de nuestros sistemas e incorporamos esas lecciones aprendidas a la forma en que planificamos y volamos las misiones tripuladas”, explicó recientemente Jim Free, administrador asociado de la NASA, en una nota de prensa. “Volar con tripulación de forma segura es nuestra máxima prioridad para Artemis 2”.

Artemis 2 despegará el año que viene con cuatro astronautas a bordo, anunciados hace pocas semanas. Serán el comandante Reid Wiseman, el piloto Victor Glover, la especialista de misión Christina Hammock Koch, estadounidenses, y el también especialista de misión Jeremy Hansen, astronauta de la Agencia Espacial Canadiense. Hammock será la primera mujer y Glover el primer hombre negro que lleguen hasta la órbita lunar, aunque tendrán



La Luna se cierne más allá de Orion. Imagen tomada el sexto día de la misión Artemis I por una cámara situada en las alas del panel solar.

que conformarse con verla desde las ventanas de Orion porque no alunizarán. Ningún astronauta europeo volará en está ni en la siguiente misión Artemis, a pesar de que la mitad de Orion lleva su bandera. Según el acuerdo de cooperación que la NASA y la ESA firmaron en 2020, Europa recibirá tres

oportunidades de vuelo para que astronautas europeos viajen a la futura estación espacial Gateway, pero eso no ocurrirá hasta después de Artemis 3.

Artemis 3 será la primera misión de alunizaje: alrededor de 2025, dos astronautas estadounidenses, una mujer y un hombre negro, volverán por fin a



NASA-JAMIE BLAIR

La tripulación del Artemis 2 en un simulador Orion en el Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston.

Puesto lunar principal.



El reto de construir una base

La cuenca de Aitken en el Polo Sur lunar ha sido la zona seleccionada para su primera misión de alunizaje de Artemis. Se trata de una cuenca impactogénica gigante con numerosos cráteres y parece la más interesante para el futuro establecimiento de una base semipermanente, por la existencia de una gran cantidad de agua en forma de hielo. Pero ¿cómo se sobrevive en la Luna?

“Sobre la habitabilidad lunar tenemos que darnos cuenta de que vamos a tener que utilizar todos los recursos que tengamos allí. Enviar material al espacio es extremadamente caro: trasladar un kilo de cualquier cosa cuesta un millón de euros. Así que tendremos que utilizar los denominados ISRU (utilización de recursos *in situ*), es decir, cualquier cosa que nos encontremos y que sepamos que es válida es un recurso potencial de habitabilidad”, explica Jesús Martínez Frías.

Martínez Frías lleva 25 años dedicado a la fabricación de simulantes de rocas de la Luna. El año pasado enviaron un fragmento de basalto de Lanzarote al espacio en un cohete de Elon Musk para estudiar cómo se comporta y entender cómo va a funcionar cuando se construya con un material prácticamente idéntico en la Luna. “Va a ser muy importante saber qué tipo de recursos geológicos son los que vamos a poder utilizar allí. Tendremos que construir pistas de despegue y aterrizaje, caminos, escudos antirra-

diación, infraestructuras, invernaderos para el cultivo plantas, alimentos, tecnologías de extracción de agua... Si tenemos allí material para trabajar nos va a ahorrar un montón de millones y además nos va a capacitar para comprender mejor cómo utilizar esto cuando estemos en otros sitios. En Marte también tenemos rocas volcánicas, basaltos y de otro tipo”, añade el investigador que ha participado en misiones de la NASA y la ESA y es instructor de astronautas en Lanzarote.

Martínez Frías también forma parte del Green Moon Project, en Lanzarote, un proyecto que estudia utilizar el polvo del suelo lunar, llamado regolito, para cultivar plantas. “Nuestro papel como geólogos es comprender muy bien la composición del suelo y saber qué tipo de aditivos habría que implementar para que esos cultivos fueran viables. Los suelos son un recurso *in situ*. En Lanzarote cultivan sobre material volcánico: vinos, plantas, alimentos... Tenemos que aprender. De alguna manera, hay una especie de conexión también entre la agricultura tradicional y el futuro de los cultivos en el espacio. Igual que la habitabilidad en cuevas, por ejemplo, en tubos de lava. Nuestros antepasados vivían en cuevas y cavernas para protegerse de las condiciones hostiles del entorno y es interesante saber que en la Luna también hay tubos de lava y cuevas volcánicas y que, probablemente, también nos ayuden a la futura habitabilidad”, concluye.

pasear por la superficie lunar en algún lugar de su Polo Sur, una zona inexplorada, de oscuros cráteres, de sombras perpetuas donde varias investigaciones han confirmado la presencia de agua en forma de hielo. Recientemente, la NASA identificó trece zonas posibles para el alunizaje, pero la nave Orion no será la que se pose sobre una de ellas. La agencia ha seleccionado una versión modificada de la nave Starship de SpaceX, el aterrizador Starship HLS, como módulo de alunizaje al que la tripulación se trasladará desde Orion. El plan es que los astronautas pasen seis días sobre la superficie lunar realizando experimentos y recolectando rocas, unos 100 kilos, que traerán de vuelta.



Jesús Martínez Frías.

A partir de ahí hay muchas dudas. Si el calendario previsto por la NASA se cumple, asunto bastante improbable cuando se lidia con el espacio, las siguientes fases, Artemis 4 y 5, tratarán de establecer una presencia semipermanente en la Luna con la base Artemis Base Camp. Esto implica construir infraestructuras permanentes, centrales de energía, hábitats para los astronautas, sistemas de soporte vital, módulos lo-



PATRICKS / NASA

Los robots, como este, denominado Hobot, serán fundamentales para construir y operar una base lunar.

gísticos, vehículos de exploración, sistemas de comunicación, pistas de despegue y aterrizaje...

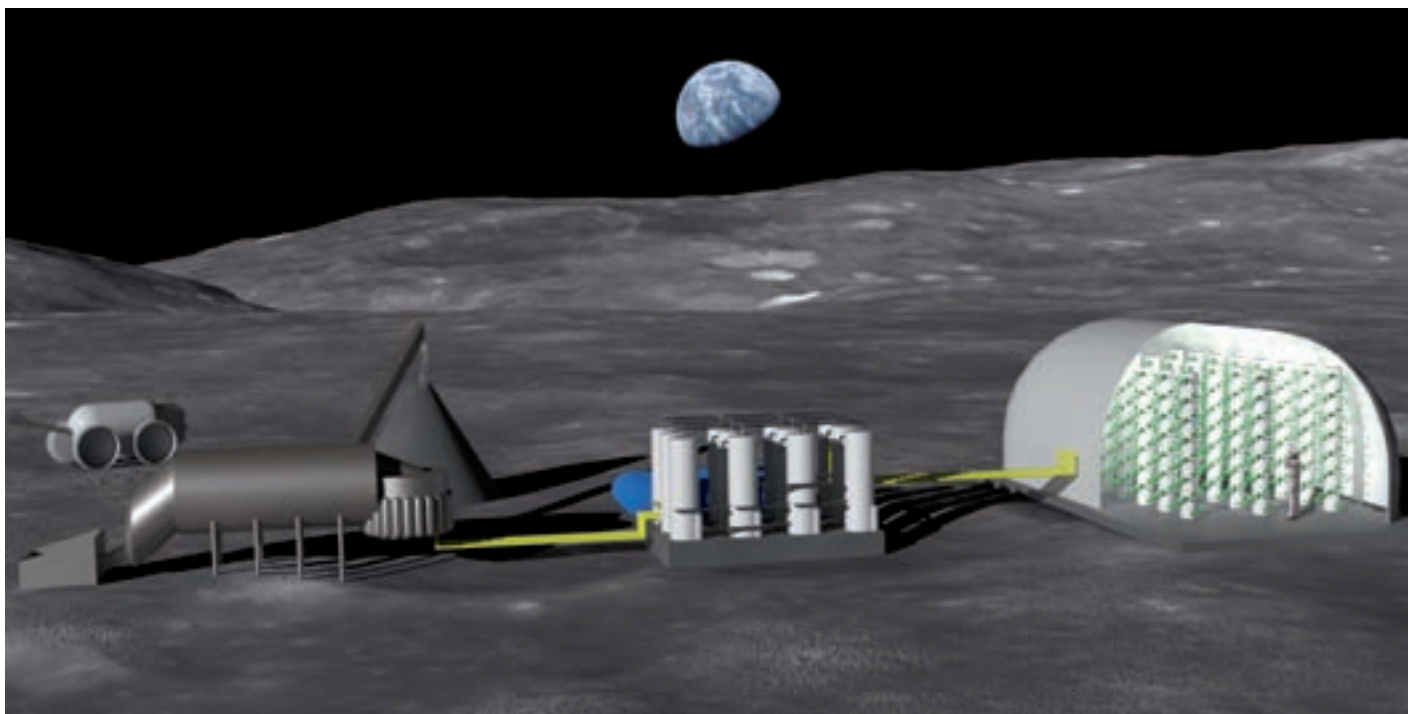
Además, Europa está construyendo buena parte de una estación espacial lunar, una especie de pequeña Estación Espacial Internacional (ISS) que orbitará alrededor la Luna, de nombre Gateway. La idea es que en el futuro los astronautas lleguen hasta Gateway en una nave Orion y después usarán un aterrizador, que funcionará como una especie de taxi entre Gateway y la base lunar.

¿Por qué volver?

La misión Artemis no solo tiene como objetivo la Luna, o poner una mujer en la Luna, sino que mira mucho más lejos: a Marte y a los planetas o a sus satélites que, se cree, podrían albergar vida. “La Luna conserva un montón de secretos importantísimos sobre nuestro pasado, es una especie de gigantesco fósil, y es muy importante desde distintas perspectivas: al carecer de atmósfera, podemos instalar telescopios que nos permitan observar mejor el universo y tener

una continua vigilancia de los asteroides y cometas que potencialmente pueden chocar contra la Tierra. También es un laboratorio para saber cómo trabajar fuera de nuestro planeta, igual que tenemos bases en la Antártida, el Ártico o la Estación Espacial Internacional. Y eso va a dar pie a nuevos hallazgos, nuevos estudios de distintas disciplinas, como los experimentos que se hacen en la ISS en biología, geología, materiales, física, medicina...”, explica Jesús Martínez Frías, fundador del Grupo de Investigación de Meteoritos y Geociencias Planetarias del Instituto de Geociencias (IGEO) y responsable del Laboratorio de Geociencias de Lanzarote.

La forma en la que vayamos aprendiendo a habitar la Luna va a servir para desenvolvernos más allá. “Aunque no es un planeta con atmósfera y los problemas son distintos, Artemis es una especie de plataforma intermedia que conecta el pasado con el futuro: proporciona mucha información científica sobre nuestro pasado y nuestros orígenes, y al mismo tiempo, también es una



Una propuesta para instalar una granja lunar que abastezca de alimentos a los habitantes de la base.



Recreación de un astronauta dejando escapar entre sus dedos el regolito lunar.

plataforma de trabajo, una especie de laboratorio natural, para saber cómo funcionar cuando viajemos a Marte o incluso más lejos. Vamos a empezar a aprovechar la Luna como plataforma

científica, tecnológica y de desarrollos de habitabilidad en el espacio”, añade el investigador. Un gigantesco, y carísimo, ensayo de habitabilidad.

Como en toda aventura del espacio,

el presupuesto asciende constantemente. En 2020, la NASA anunció que se necesitarían 28.000 millones de dólares hasta Artemis 3. Pero esta cantidad no incluía la inversión ya realizada en el SLS y en la nave Orion, con lo cual, la cifra final será mucho mayor, cercana a los 100.000 millones de dólares. Pero la presencia sostenible en la Luna podría allanar el camino para futuras misiones a Marte y más allá. Como dijo un emocionado Bill Nelson, actual administrador de la NASA, en la rueda de prensa tras el lanzamiento de Artemis 1: “¿Por qué volvemos? Porque nuestra vocación es explorar los cielos y este es el siguiente paso. Fuimos a la Luna y estuvimos allí un corto período de tiempo. Después tuvimos el Skylab, el transbordador espacial, construimos la ISS... Y ahora volvemos a la Luna no sólo por ir, sino para aprender, para entender cómo vivir en la Luna con el fin de prepararnos para enviar a los humanos hasta Marte a finales de la década de 2030. La Luna está a sólo unos días de distancia. Marte está a meses y meses de distancia. Este es el próximo comienzo.”





En 2020 el Organismo Internacional de Energía Atómica creó las becas Marie Skłodowska-Curie para facilitar el acceso profesional de las mujeres en este ámbito

Atraer el talento femenino al mundo nuclear

Las mujeres no están adecuadamente representadas en el ámbito nuclear. Es necesario incrementar el número de ellas para garantizar una fuerza de trabajo equilibrada. Para superar esta situación, en marzo de 2020 el director general del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Rafael Mariano Grossi, puso en marcha el Programa de Becas Marie Skłodowska-Curie (MSCFP), cuyo nombre rinde homenaje a la científica pionera

en el estudio de la radioactividad, galardonada en dos ocasiones con el Premio Nobel. La finalidad del programa es apoyar a las mujeres que siguen carreras profesionales relacionadas con el área nuclear para cursar programas de maestría y la oportunidad de realizar prácticas laborales o pasantías de una duración máxima de 12 meses, facilitadas por el OIEA.

■ Texto: **Pura C. Roy** | Periodista de ciencia ■

“La igualdad de género y el empoderamiento de la mujer son elementos centrales de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y son fundamentales para la plena realización de los derechos y el potencial de todos. Estos objetivos fundamentales también deben orientar nuestra labor en el OIEA. Tras finalizar sus es-

tudios, las becarias se sumarán a las filas de quienes trabajan en los usos pacíficos de la energía nuclear en todo el mundo”, dijo Grossi al presentarlas. Estos usos pacíficos tienen muchos ámbitos, como la ingeniería nuclear, la física y la química nuclear, la medicina nuclear, las técnicas isotópicas, la biología de las radiaciones,

la tecnología y la seguridad nuclear, la no proliferación y el derecho nuclear.

Grossi, experto en temas de no proliferación y desarme, ha sido, entre otras cosas, jefe de Gabinete en la Organización para la Prohibición de Armas Químicas y presidente de la Conferencia de las Partes para el Examen del Tratado de No Proli-

feración de Armas Nucleares. En 2020 declaraba a la revista Alfa que cuando asumió el cargo se encontró con que “el OIEA tenía un 27 % de mujeres en niveles profesionales y ya lo hemos situado en un 32 %. Y me he propuesto la ambiciosa meta de llegar a la paridad del 50 % en el año 2025, lo que implica un esfuerzo hercúleo en materia de reclutamiento, de búsqueda de personal y reemplazo de los profesionales. Por otro lado, he juzgado importante tratar de atacar desde el ángulo más global este problema de la representación y de las vocaciones femeninas y, por eso, uno de los primeros pasos que di fue el establecimiento de un programa de becas que llevan el nombre de Marie Skłodowska-Curie, que es la mujer más emblemática en ciencias vinculadas a lo nuclear y la física. Hemos arrancado muy bien, con apoyo de muchos países. Es una tarea de la que estoy muy convencido y debemos mantener un esfuerzo consistente para poner las cosas en una forma más equilibrada y traer mucho talento femenino que aún no está representado en la actualidad”.

En 2020, cuando se puso en marcha este programa, se concedieron becas a 100 estudiantes. En su actual edición, la tercera, 150 nuevas estudiantes de todo el mundo han sido seleccionadas. Tras recibir 522 solicitudes de 97 Estados miembros del OIEA, el número de becas concedidas en la última convocatoria es el mayor hasta la fecha. Está previsto que en julio de 2023 se abra el siguiente ciclo de presentación de candidaturas. En la última promoción hay alumnas de 91 países, de los cuales 18 están representados por primera vez. El 58 % de las estudiantes son de Asia y África, el 15 % de América Latina y el Caribe, el 21 % de Europa, el 4 % de América del Norte y el 2 % de Oceanía. Ingresar en el sector nuclear siendo mujer y procediendo de ciertos países no siempre es fácil. Gracias a esta oportunidad muchas de ellas han



Cindy Bello en las instalaciones del reactor de fusión internacional ITER, actualmente en construcción.

podido estudiar fuera de su país y utilizar las infraestructuras que se han puesto a su disposición. Desde su lanzamiento, se han recibido 1 042 candidaturas.

“Nuestro objetivo es aumentar de forma constante el número de mujeres en el ámbito nuclear a través de este programa. A la hora de seleccionar a las estudiantes, nos esforzamos por mantener un equilibrio geográfico, de ahí que haya un número limitado de becas concedidas a un país concreto”, explican desde el OIEA en Viena.

Una gran oportunidad

Entre las beneficiadas de la primera edición se encuentra la venezolana Cindy Bello, quien obtuvo una maestría en seguridad tecnológica nuclear en la Universitat Politècnica de València (UPV) de España, con la que ha dado inicio a su vida profesional como ingeniera nuclear en proyectos de fusión y reactores de la Generación IV en IDOM. En esta empresa de consultoría española, ubicada en Barcelona, trabaja en proyectos de diseño y cálculo de reactores de fusión dentro de un equipo de 13 personas. “Es un tema que me apasionaba. Tuve esta gran

oportunidad de pasantía y empezar a trabajar en mi área. Sin este programa me hubiera llevado más tiempo finalizar mi maestría, dado que el factor económico para el alojamiento y la inscripción es siempre el primer obstáculo que hay que superar”, señala Bello. Subraya también que “un gran porcentaje de las ayudas se van para Asia y África; tal vez, porque Europa dispone de otras becas, como las que ofrecen los distintos gobiernos u organismos comunitarios”.

Recuerda Bello que otras compañeras optaron por la seguridad radiológica en medicina. “A mí me interesaban más las centrales nucleares”, por ello realizó estudios en Cofrentes y Vandellós II. También recuerda que fue en el 2020, el año de la Covid, cuando fue seleccionada. Así que se sintió afortunada y contenta, ya que le ayudaba a superar los problemas económicos y las restricciones que se impusieron. “Yo ya conocía este máster porque me gustaba lo que se podía estudiar, además mi director de estudios en Venezuela ya me lo había recomendado. Así que me hizo la carta de recomendación para postularme. Al cabo de un mes me

dieron la respuesta. Dio la casualidad de que ya estaba en España con la idea de hacer un máster y con la intención de hacer un doctorado más tarde. Así que no tuvieron que pagarme el viaje. Después de terminar me ofrecieron hacer prácticas en Viena, pero yo elegí hacerlas en España”.

Los estudios de posgrado pueden ser costosos y consumir mucho tiempo. Así que este programa de becas le permitió la libertad y la seguridad financiera necesaria para completar sus estudios. Las estudiantes reciben hasta 20 000 euros para los gastos de matrícula y hasta 20 000 euros para los gastos de manutención. “Es necesario que haya más mujeres en el ámbito nuclear; en el equipo con el que trabajo solamente somos dos. Hay menos mujeres en el área nuclear, hay más en la radiológica. Lamentablemente

no conozco a ninguna otra venezolana y a ninguna española becadas con ella”, comenta Bello.

Distintas disciplinas

Según el OIEA las estudiantes de la tercera, y por ahora última, convocatoria, están realizando estudios en disciplinas muy diversas, que van desde la energía nuclear para generar electricidad hasta las aplicaciones nucleares en la medicina, la agricultura, la inocuidad de los alimentos, la salubridad del agua, el medio ambiente, en criminalística, las salvaguardias y la seguridad física nuclear. “Desde el inicio del programa, de las 360 beneficiarias de las becas 149 han elegido el área de ciencias y aplicaciones nucleares, mientras que 112 estudian temas relacionados con la energía nuclear. Las

restantes estudian seguridad nuclear tecnológica y física, salvaguardias/no proliferación y derecho nuclear. Las estudiantes representan a 110 estados miembros y estudian en 65 países”, concretan desde la organización.

Los estudios sobre algunas de las áreas relacionadas con lo nuclear pueden ayudar a los países a afrontar desafíos varios, y la demanda de profesionales cualificados en este ámbito es alta y seguirá aumentando. Las becas se conceden cada año en función de la disponibilidad de fondos y se tiene en cuenta la disciplina de estudio, así como la diversidad geográfica y lingüística.

Venezuela no permitía a Bello estudiar la disciplina que quería: “Allí tenemos laboratorios de física nuclear enfocados a las aplicaciones petroleras. En uno de

Programa Lise Meitner: mejorar el liderazgo de las mujeres

Mujeres como Marie Skłodowska-Curie o Lise Meitner y sus contribuciones a la ciencia nuclear han inspirado a multitud de mujeres al ser referentes femeninos que sufrieron dificultades pero no por ello cejaron en sus carreras. Son, por tanto, dos buenos modelos para las mujeres. Aprovechando el éxito del Programa de Becas Marie Skłodowska-Curie, el OIEA ha puesto en marcha recientemente el Programa Lise Meitner (LMP) que ofrece a mujeres profesionales del mundo nuclear que se encuentran al inicio o en mitad de su carrera la oportunidad de participar en visitas profesionales de varias semanas de duración para mejorar sus aptitudes técnicas e interpersonales, mediante actividades de capacitación en gestión y liderazgo, men-

toría, establecimiento de redes y asesoramiento y gestión de competencias.

Según informa el OIEA, en el marco del programa “se realizarán visitas profesionales a diversas instalaciones nucleares, tanto en construcción como en funcionamiento o en proceso de clausura; centros de investigación, instituciones científicas y laboratorios; y en instalaciones del sector industrial y empresas emergentes, entre otros. Estas actividades se complementarán con debates y conferencias de temática variada con expertos en la materia. Estas visitas durarán, en general, de 2 a 4 semanas y acogerán de 10 a 15 profesionales visitantes”.

El programa se financia con cargo a “contribuciones extrapresupuestarias y en especie de los Estados miembros del OIEA y otros donantes”. De esta manera reivindica el OIEA a Lise Meitner: “Lleva el nombre de la física austrosueca, para rendir homenaje a su brillantez y su valentía. Meitner y su sobrino Otto Robert Frisch dieron la explicación teórica del proceso que más tarde se denominó fisión nuclear. Lise Meitner trabajó con Otto Hahn durante 30 años, estudiando la radiactividad, gracias a los conocimientos de física de ella y los de química de él, pero solo Hahn recibió el Premio Nobel de Química en 1944 por el trabajo que habían realizado conjuntamente”.





estos laboratorios estudié las posibles concentraciones de elementos radiactivos. Estuve también en el área de radioquímica procesando el agua, pero me interesaba conocer las plantas nucleares y todo lo derivado de su seguridad, pero Venezuela no tiene centrales así que necesitaba otro país para ampliar conocimientos”, explica. La experiencia fue muy positiva y por eso, después de llevar dos años trabajando como ingeniera nuclear, recomienda vivamente estas becas.

Incorporación a la industria

Aunque cada vez más mujeres se están incorporando a la industria nuclear, todavía hay desafíos que afrontar para lograr una representación de género más equitativa. Susana Falcón, presidenta de WiN España (Woman in Nuclear) y responsable de la unidad de formación del Ciemat en protección radiológica y tecnología nuclear, muestra su apoyo a estas becas, ya que “todo lo que sea mentorizar, divulgar, enseñar un campo de trabajo interesante y poder ofrecer oportunidades de entrar a trabajar en una empresa es necesario. Estas becas son interesantes porque financian la estancia durante un año en una empresa, en una institución o entidad que tenga que ver con el sector nuclear en cualquier país. Te puede dar una visión global para luego poder tra-

bajar. El OIEA nos ha pedido a los distintos países que estamos integrados en la organización que aportemos empresas que puedan acoger a las becadas. Nosotras en concreto estamos colaborando en ello. Hemos enviado a todos nuestros socios corporativos y universidades la información para que puedan ofrecer estancias y recibir a las estudiantes”.

“La energía nuclear ha estado rodeada de prejuicios. Hace varios años, España tenía 10 másteres en nuclear, hoy tiene dos, quizás por el estigma de pensar que iba a ser un campo donde no se podría encontrar trabajo. Los alumnos no se matriculaban y solo han quedado uno en la Politécnica de Madrid y otro en la Politécnica de Cataluña, aunque hay otros másteres que tienen algún módulo en nuclear, lógicamente”, comenta Falcón.

Esta situación la refuerza Bello con su opinión: “En mi carta de motivación expuse mi interés en el área de fusión pero no hay un máster específico en fusión, así que decidí conocer el funcionamiento de las centrales en España, ya que mi grado es en ingeniería química y algo conocía de energía nuclear; pero cómo es su seguridad lo conocí gracias a esta beca”.

Dentro de la Sociedad Nuclear Española, a la que está asociada WiN, hay una bolsa de trabajo. “Las personas que salen de estos dos másteres se colocan



Susana Falcón.

antes de acabar. Así que una de nuestras conclusiones es que la educación es el mayor desafío que hay que afrontar para aumentar la representación femenina en el sector. No se puede tener una paridad si en la bolsa de trabajo hay menos mujeres”, opina Falcón. “España está en estos momentos intentando volver a dar importancia a las carreras tecnológicas, que curiosamente cuando más se necesitan, los estudios han ido a la baja. Además darán trabajo. Se va a necesitar mucha gente porque es necesario un cambio generacional por las jubilaciones. Nuestras ingenierías tienen proyectos por todo el mundo, con lo cual hay demanda de profesionales y las empresas se los están quitando unas a otras”.



WiN se creo hace 25 años con el objetivo de difundir las posibilidades de la energía nuclear y crear una red entre las mujeres profesionales. “Los primeros años solo hacíamos divulgación en colegios, universidades, con la gente en general, para que supieran que vivimos rodeados de radiación. En los últimos seis años estamos más enfocadas en visibilizar el trabajo de las mujeres en este sector. Ahora estamos ‘todas a una’ para que las carreras STEM sean conocidas por su importancia. Y que las mujeres que están en empresas se involucren en la difusión y divulgación de nuestro campo. Antes era impensable encontrar mujeres en las centrales nucleares. De hecho, cuando se construyeron las primeras no había vestuarios femeninos. Pero ahora ya hay mujeres operadoras o jefas de servicio radiológicos entre otros puestos”, dice Falcón.

Después de tres años, ya se están viendo resultados concretos, según responsables del programa desde el OIEA. “La mayoría de las estudiantes del MSCFP están estudiando activamente, y muchas ya han completado sus estudios de máster. De las que han terminado, 60 han iniciado becas en los departamentos técnicos del OIEA y en organizaciones asociadas. Otras han empezado a trabajar o han continuado estudios de doctorado en campos relacionados con la energía nuclear. Los re-



sultados de este programa serán aún más evidentes en los próximos años, a medida que más estudiantes completen sus estudios y prácticas y se incorporen al sector en su faceta profesional”.

Para dar a conocer estas becas, el OIEA participa y realiza presentaciones en diversos eventos técnicos (conferencias, reuniones, talleres). También se realizan actividades de divulgación específicas a través de universidades y asociaciones, además de una campaña promocional continua en las redes sociales. Pasos necesarios para atraer el talento femenino a los múltiples campos de la energía nuclear.

El primer estudio sobre igualdad de género en el sector nuclear, en el que participaron más de 8 000 mujeres de 32 países, completado con datos de trabajadoras de 96 organizaciones nucleares de 17 países, reveló, entre otros aspectos, que

sólo el 24,9 % de la fuerza laboral del sector nuclear de los países de la OCDE/NEA es femenina; que existe una pobre representación en la alta gerencia y niveles ejecutivos de los organismos nucleares, ambos por debajo del 20 %; y que las mujeres cobran un 5,2 % menos. Asimismo, se indica que la sensación de falta de modelos femeninos dificulta que el sector atraiga más talento femenino. ©

Presentación de los programas Marie Curie (izquierda) y Lise Meitner, por Rafael Grossi, director general del OIEA



Almacenamiento geológico profundo: visión global y estado de la cuestión en España

POSIVA



Uno de los túneles excavados del AGP de Onkalo (Finlandia).

El almacenamiento geológico profundo (AGP) es la última etapa del ciclo de combustible. Actualmente es la opción elegida, por consenso científico generalizado, como la más segura y eficaz para la gestión final del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos de alta actividad. La clave de su seguridad se basa en un diseño multibarrera constituido por elementos pasivos, intrínsecamente seguros, que no dependen del mantenimiento ni de la intervención humana a largo plazo. A raíz de la misión Artemis, realizada en 2018 y refrendada por la versión inicial del 7º Plan General de Residuos Radiactivos, se ha reactivado en España el trabajo para la concepción de un proyecto de AGP, definiéndose la estrategia global en una hoja de ruta elaborada por el grupo de trabajo entre el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD), el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa). En este artículo se describe el concepto de AGP, el estado de desarrollo de los proyectos más adelantados en los países europeos y los avances que está realizando España en la materia.

■ Texto: **Mª Aránzazu Sogo Aldamendi** | Área de Residuos de Alta Actividad | **Antonio Vela Guzmán** | Secretaría General del CSN ■

Los residuos de alta actividad (RRAA) son aquellos que contienen concentraciones apreciables de radionucleidos emisores alfa de vida larga y/o emisores beta-gamma con periodos de semidesintegración superiores a 30 años, que pueden generar calor por efecto de la desintegración radiactiva dada su elevada actividad específica. Este tipo de residuos están constituidos esencialmente por el combustible gastado generado durante la operación de las centrales nucleares, en forma de elementos combustibles. Además, en España se contará con una pequeña cantidad de materiales procedentes del reprocesado del combustible gastado de la central Vandellós I (actualmente almacenados en Francia).

Adicionalmente, a efectos de gestión integral, se incluyen también en este conjunto otros residuos de media actividad que por sus características no son susceptibles de ser gestionados de forma final en las condiciones establecidas para el Centro de Almacenamiento de El Cabril y requieren instalaciones específicas.

Combustibles nucleares son, de acuerdo con la definición recogida en la Ley de Energía Nuclear, las sustancias que pueden producir energía por un proceso de fisión nuclear. En las centrales españolas se utilizan elementos combustibles de dióxido de uranio ligeramente enriquecido, que permanecen en el reactor de tres a cuatro ciclos de operación (entre tres y seis años, en función del tipo de instalación), después de los cuales se considera gastado, ya que el crecimiento de los productos de fisión (absorbentes de neutrones) y el decrecimiento del U-235

que se va consumiendo hacen que el elemento ya no colabore en mantener la cadena de fisiones. En España, la estrategia de gestión del combustible gastado (CG) elegida es de ciclo abierto: una vez descargado del núcleo, el combustible se considera directamente como residuo a almacenar a la espera de su gestión final, sin considerar su reproceso.

A lo largo de la irradiación del combustible nuclear se producen una serie de cambios en la composición isotópica que determinarán las necesidades para su gestión posterior. Los factores más importantes a considerar son: el calor, que disminuye rápidamente a medida que se desintegran los radionucleidos que lo producen (sólo después de un enfriamiento adecuado pueden transportarse o tratarse estos elementos); las radiaciones beta-gamma, producidas principalmente por los radionucleidos de vida corta (con períodos de semidesintegración inferiores a 30 años), frente a las que es necesario un blindaje adecuado, y la presencia de emisores alfa de vida larga, con períodos de semidesintegración de hasta miles de años. La protección frente a las partículas alfa se logra mediante el confinamiento a largo plazo de la sustancia emisora.

Por ello, en la gestión del CG, debe haber una etapa corta de enfriamiento para reducir la carga calorífica (en las piscinas de CG de la propia central), una etapa más larga de blindaje para protección contra las radiaciones gamma (almacenamiento temporal en húmedo en piscinas o en seco en contenedores) y una etapa muy larga de confinamiento hermético para impedir que los emisores alfa alcancen la biosfera (acondicionamiento, encapsulado y almacenamiento definitivo del CG).

Gestión del CG y RRAA. Objetivos de seguridad

La gestión segura de los residuos radiactivos derivados del uso de la energía nuclear constituye un desafío socio-político

clave para los actores implicados (operadores, reguladores, gobiernos y organizaciones internacionales).

El objetivo de esta gestión es disponer de medidas eficaces para proteger a los trabajadores, al público y al medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, en el presente y en el futuro, como recoge la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y los Residuos Radiactivos, firmada en Viena en 1997.

La gestión definitiva del CG y de los RRAA se apoya en dos objetivos fundamentales:

- *Estrategia de Seguridad y Protección Radiológica:* Los residuos radiactivos de alta actividad deben ser acondicionados y aislados para evitar la emisión de sustancias radiactivas que pueden alcanzar la biosfera en concentraciones inaceptables, antes de que su decaimiento las haga inocuas. Por tanto, es necesario asegurar la protección radiológica de acuerdo con los principios establecidos en las directivas internacionales, que se basan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, en concreto la ICRP 122.
- *Responsabilidad con las generaciones futuras:* Por las características del CG y de los RRAA, el aislamiento de los residuos debe garantizarse durante largos períodos de tiempo (desde cientos de miles de años hasta un millón de años), sin la necesidad del mantenimiento permanente de la integridad del sistema de almacenamiento y sin la necesidad de establecer medidas activas para garantizar el objetivo de seguridad.

Sobre estos criterios se establecen los principios y la normativa de seguridad que rigen y condicionan el diseño, la construcción, la operación y la clausura

de los sistemas de almacenamiento definitivos.

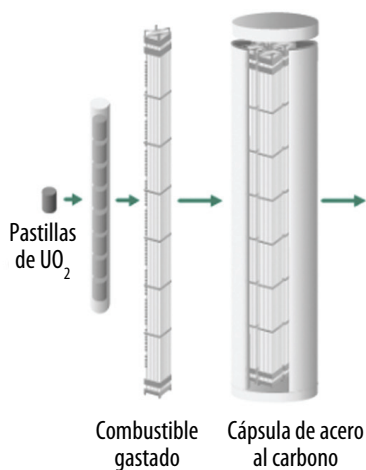
En relación con el sistema de almacenamiento definitivo del CG y de los RRAA y considerando los riesgos asociados a los radionucleidos de larga vida, se aplica el concepto de defensa en profundidad, que consiste en establecer niveles sucesivos de protección en forma de funciones de seguridad y de barreras, para garantizar la seguridad, tanto en condiciones esperadas como inesperadas, en el presente y a largo plazo.

Concepto de almacenamiento geológico profundo (AGP)

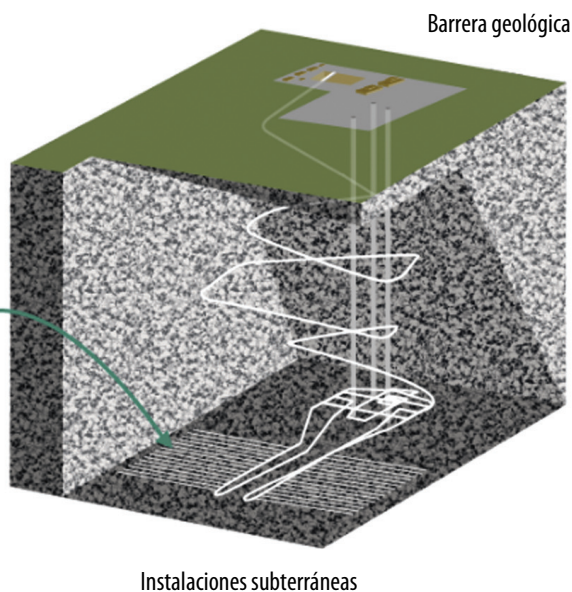
Desde la década de los setenta se han desarrollado proyectos de investigación científica y debates sobre la gestión de los residuos radiactivos. En la Unión Europea, la Directiva de Residuos de Euratom, traspuesta al RD 102/2014, señala que es ampliamente aceptado a nivel técnico que el AGP representa la opción más segura y sostenible para la gestión final del CG/RRAA. La citada Directiva especifica que los estados miembros deben incluir la planificación e implementación de opciones de almacenamiento definitivo en sus políticas nacionales. El RD asigna a Enresa la responsabilidad de buscar emplazamientos, diseñar, construir y operar instalaciones de almacenamiento definitivo del CG y de los RRAA. No obstante, en su desarrollo, que abarcará varias décadas, intervienen diversos aspectos técnicos, científicos, sociales y políticos.

El concepto AGP se basa en el almacenamiento de residuos en formaciones geológicas estables a gran profundidad (pueden llegar a los 500 metros) que proporcionen el aislamiento de los residuos radiactivos de la biosfera durante largos períodos de tiempo (hasta un millón de años). Este aislamiento se consigue mediante la interposición de un conjunto redundante de barreras naturales y artificiales

Barreras artificiales



Barreras naturales



Concepto multibarrera del AGP. Barreras artificiales-naturales. Enresa

(o ingenieriles) con diferentes funciones de seguridad en el tiempo y que interactúan de forma combinada. El principal agente movilizador y de transporte de radionucleidos en este contexto es el agua.

Los **residuos** que por su composición dificultan los procesos de disolución, constituyen una primera barrera. Los residuos se introducen en **contenedores** metálicos (acero al carbono) resistentes a la corrosión u otras formas de degradación, que constituyen una barrera de contención durante el periodo inicial en el que se producen la mayor parte de los procesos de desintegración de los productos de fisión. Los **materiales de relleno** y sellado (bentonita) protegen el contenedor, minimizan el flujo de agua y generan un ambiente químico favorable que retarda y atenúa la salida de radionucleidos. La **barrera natural** constituida por la formación geológica que hospeda el sistema de almacenamiento es la barrera fundamental a largo plazo, ya que protege las barreras de ingeniería. La barrera geológica genera un ambiente químico, mecánico, térmico e hidrogeológico estable,

limitando el flujo de agua y retardando la migración hacia la biosfera de los radionucleidos potencialmente liberados.

Las barreras artificiales pierden credibilidad al cabo del tiempo (miles de años como máximo), cobrando protagonismo la barrera geológica, que puede garantizar estabilidad y capacidad de aislamiento durante un millón de años. El AGP constituye también la solución más fiable en términos de seguridad física (presenta una mínima vulnerabilidad a la intrusión humana o al sabotaje).

Para cumplir las funciones de seguridad definidas para la barrera natural, las formaciones geológicas candidatas a albergar un AGP deben cumplir una serie de requisitos mínimos, relacionados con la:

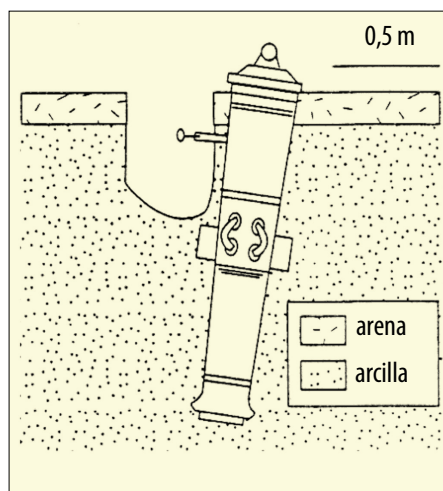
- Estabilidad tectónica (carencia de fallas activas y baja sismicidad)
- Estabilidad mecánica y térmica (viabilidad de construcción y operación)
- Impermeabilidad y bajo flujo de agua subterránea
- Capacidad de retardo al movimiento de radionucleidos y química favorable de las aguas subterráneas.

Además, dichas formaciones deben tener espesores, profundidad y extensión suficiente para aislar el repositorio de procesos naturales y de actividades humanas indeseadas.

Las rocas estudiadas que cumplen estos requisitos en mayor o menor medida según sus características son las arcillas, la sal y las rocas cristalinas (magmáticas, metamórficas o volcánicas, tales como granito, gneis, basalto o toba). La profundidad a la que deben emplazarse los residuos depende en gran medida del tipo de formación seleccionada y de la capacidad de aislamiento de aquellas que rodean a la roca hospedante del AGP.

Estudios de seguridad del AGP

Para garantizar la seguridad de un AGP, es necesario llevar a cabo sucesivos estudios de seguridad en las distintas etapas de su desarrollo, desde el diseño genérico, la selección del emplazamiento, caracterización, construcción y explotación, hasta su desmantelamiento y cierre, tomando como base los requisitos reguladores establecidos a tal efecto. En este proceso iterativo se



Análogos naturales: Resistencia de materiales, Cañón del Kronan (Suecia)

evalúa el comportamiento del sistema de almacenamiento en su conjunto (emplazamiento e instalación, barreras naturales y artificiales) y su evolución a futuro (período posterior al cierre), considerando las incertidumbres en los datos y analizando distintos escenarios de fallo de barreras y sistemas de seguridad.

En España, el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR) especifica las autorizaciones de las instalaciones nucleares: previa o de emplazamiento, de construcción, explotación, desmantelamiento y declaración de clausura o cierre, en su caso.

Aunque no se recoge explícitamente en el RINR, el proceso de selección del emplazamiento para albergar el AGP es la primera etapa del proyecto y un hito fundamental, por la importancia de la barrera geológica a largo plazo y las implicaciones sociales. Para su éxito, debe desarrollarse mediante un proceso participativo y transparente, basado en criterios y requisitos científicos y técnicos, sociales, ambientales y socioeconómicos; establecidos previamente en un marco normativo consensuado entre todos los estamentos implicados (regulador, promotor, agentes sociales especializados) y contando con la participación pública (Ley 27/2006).

El proceso de selección del empla-



Laboratorio subterráneo de Hades (Bélgica).

zamiento se realiza a partir de actividades de investigación y caracterización de los emplazamientos candidatos a escala regional, incrementando su grado de detalle y evaluando y comparando los distintos emplazamientos hasta la selección del idóneo. La caracterización del emplazamiento seleccionado requerirá de estudios de detalle que analicen los distintos parámetros geológicos, geotécnicos, tectónicos, hidrogeológicos, etc., que puedan incidir sobre la seguridad nuclear y la protección radiológica y que establezcan las bases fundamentales del diseño de la instalación definitiva.

Los largos períodos de tiempo posteriores al cierre de la instalación constituyen una fuente de incertidumbre. La investigación sobre análogos naturales¹, que son ejemplos de procesos y fenómenos que se han producido en la naturaleza durante largos periodos y que tendrán lugar en los AGP, ayuda a comprender el

comportamiento a escala de tiempo geológica, mucho más allá de las escalas temporales de los experimentos de laboratorio y de campo. Los análogos también proporcionan información sobre la idoneidad de los materiales utilizados en las barreras artificiales.

Otra herramienta esencial para reducir las incertidumbres en el comportamiento de los AGP son los proyectos en laboratorios subterráneos de investigación (en inglés URL), que constituyen una fuente de información sobre la demostración y optimización del diseño, el conocimiento de los procesos, la mejora de las capacidades tecnológicas, el desarrollo y el ensayo de técnicas de investigación, construcción y operación, y para la elaboración de modelos de funcionamiento del emplazamiento y la validación de los estudios de seguridad. También son un factor clave en la cooperación internacional, permitiendo mejorar los proyectos en curso y desarrollar aproximaciones novedosas. Los URL también son eficaces para educar, promover la confianza y conseguir el compromiso del público, así como para motivar a las nuevas generaciones a participar en el campo de la gestión de residuos.

¹ Aplicación de los análogos a la evaluación de seguridad y comunicación del almacenamiento geológico. Síntesis ilustrativa. Colección Documentos I-D 10.2004. CSN.

Además de los aspectos científicos y técnicos descritos para el desarrollo de los programas de AGP, es prioritario el apoyo social y público, que se garantiza mediante la información y la transparencia. Es necesario un marco normativo robusto que garantice y respalde el avance por fases del proyecto, que se desarrollará a lo largo de varias décadas.

Situación en España: desde el Plan de Búsqueda de Emplazamientos de 1987 hasta hoy

El RD 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos, dispone que el Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR) es el documento en el que se establece la política sobre la gestión de los residuos radiactivos, incluyendo el CG, y el desmantelamiento y clausura de las instalaciones nucleares. Constituye, asimismo, el programa nacional de aplicación de dicha política, según lo establecido en la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo, de 19 de julio de 2011.

El PGRR debe recoger las estrategias, actuaciones necesarias y soluciones técnicas a desarrollar en España en el corto, medio y largo plazo, encaminadas a la gestión responsable y segura del CG y los residuos radiactivos.

El primer PGRR (1987) ya incluía un Plan de Selección de Emplazamientos para el almacenamiento definitivo de residuos de alta radiactividad, con una serie de fases de estudio que, partiendo de un “Inventario nacional de formaciones favorables”, culminaba con la elección de un emplazamiento candidato, su caracterización, valoración y aprobación, dando comienzo al proceso de construcción y puesta en marcha.

Los sucesivos PGRR establecieron la estrategia de creación de un AGP. Enresa planteó un programa escalonado –el Plan de Búsqueda de Emplazamientos– para

localizar en España formaciones geológicas capaces de albergar un AGP, que incluía las siguientes etapas:

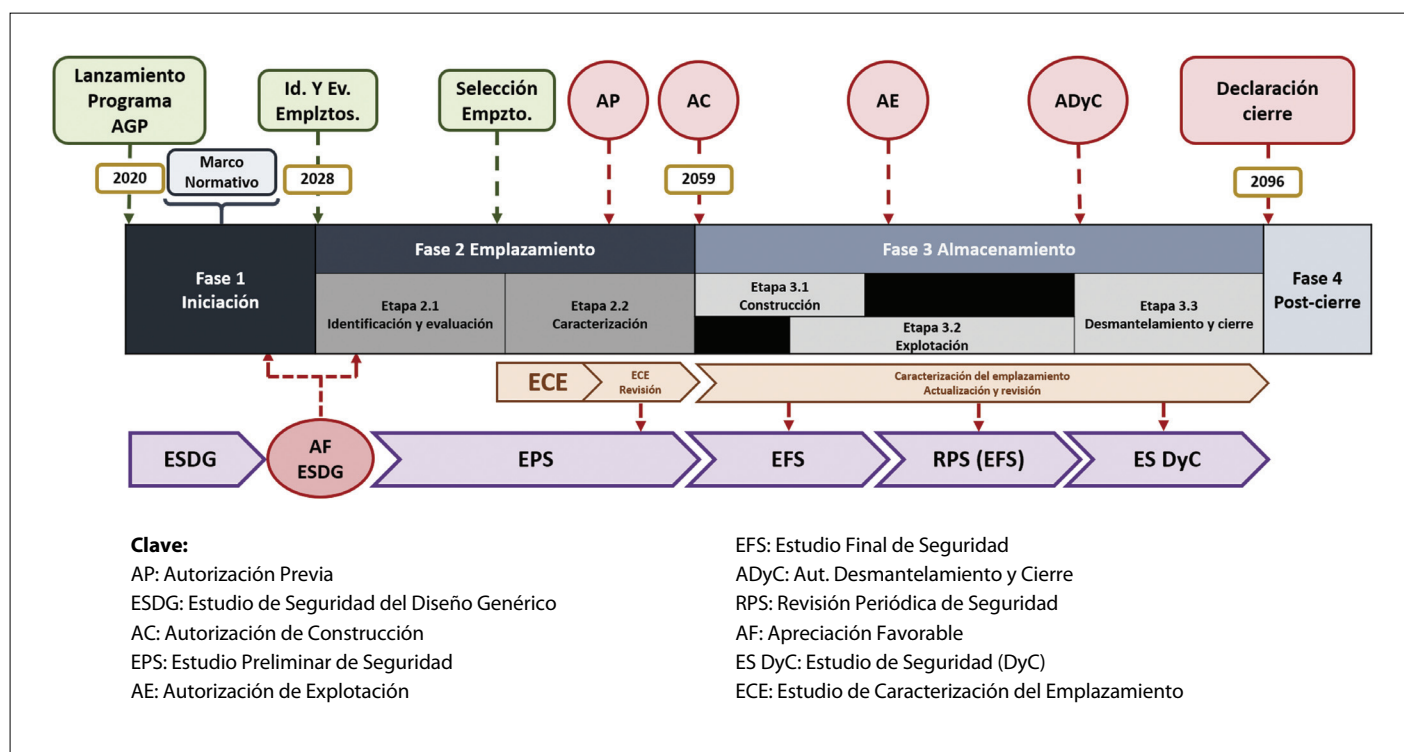
- 1 Realización del “Inventario nacional de formaciones favorables” (proyecto IFA, de 1986 a 1987) elaborado mediante la recopilación de cartografía regional de toda la superficie peninsular y el establecimiento de una serie de factores excluyentes, que dieron lugar a once informes regionales con formaciones favorables para albergar el AGP.
- 2 Estudios regionales (proyecto ERA, de 1988 a 1990), centrados en seis de las once regiones obtenidas en la fase anterior, cuyo objetivo era estudiar la extensión y características de las formaciones geológicas seleccionadas. Se obtuvieron mapas zonales (por sistotectónica, hidrología-hidrogeología, morfología, socioeconomía), mapas de descalificación y mapas de favorabilidad.
- 3 Estudio de áreas favorables a escala 1:50.000 en 37 áreas (Proyecto AFA, de 1990 a 1994); Basado en criterios de favorabilidad definidos y analizados por una comisión interdisciplinar de técnicos pertenecientes a diversos organismos y empresas, entre las que se encontraban Enresa, CSN, Ciemat, CSIC, universidades y empresas privadas españolas.
- 4 Estudio de zonas favorables a escala 1:20.000 sobre 20 zonas (proyecto ZOA, de 1995 a 1999). El alcance de los trabajos contemplaba estudios de detalle, incluyendo trabajos de campo, sobre 5-6 disciplinas técnicas (estratigrafía-sedimentología, hidrogeología, etc.).

En el cuarto PGRR (1994) se incorporó un diseño conceptual de las instalaciones de superficie y subterráneas del AGP. Sin embargo, en el quinto PGRR, de 1999, debido al retraso generalizado de los programas de AGP y al creciente interés en las nuevas tecnologías de separación y transmutación, se modificó la estrategia nacional y se paralizaron las actividades de búsqueda de emplazamientos para el AGP, poniéndose el énfasis en mantener las capacidades tecnológicas desarrolladas hasta la fecha y adecuar las actividades de I+D a los nuevos planteamientos.

El sexto PGRR (2006), actualmente vigente, establece como política nacional para la gestión final del CG y de los RRAA una estrategia basada en el almacenamiento temporal limitado, seguido de una instalación de almacenamiento definitivo (AGP) que entraría en operación a partir del año 2050. Las actividades definidas en relación con el proyecto consisten en la consolidación y actualización del conocimiento adquirido, aprovechando los desarrollos internacionales.

En junio de 2016, el Gobierno de España solicitó al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) una evaluación internacional combinada IRRS/ARTEMIS² para dar cumplimiento a la Directiva 2009/71/EURATOM, que establece un marco comunitario para la seguridad nuclear de las instalaciones nucleares, y a la Directiva 2011/70/EURATOM, que establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del CG y de los RRAA. Ambas Directivas requieren que los estados miembros realicen, al menos cada diez años, una autoevaluación y una revisión internacional *inter pares*. En particular, el propósito de la revisión fue evaluar el marco regulador español sobre la seguridad nuclear y la protección radiológica (IRRS) y el sistema de gestión de residuos radiactivos (ARTEMIS). En la evaluación (en octubre de 2018) participaron el en-

² IRRS (Integrated Regulatory Review Service). ARTEMIS (Integrated Review Service for Radioactive Waste and Spent Fuel Management, Decommissioning and Remediation).



Hoja de ruta para el AGP, del GTT. Etapas

tonces Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO), el CSN y Enresa.

Como resultado³ se emitieron una serie de recomendaciones, entre las que destaca la necesidad de reactivar el programa AGP, dirigida a las tres partes involucradas en el proceso:

- El Gobierno debería complementar el actual marco jurídico de regulación para la creación de un AGP, clarificando las funciones y responsabilidades e implicando a las partes interesadas en todas las etapas de implantación.
- El CSN y otras autoridades competentes deberían desarrollar, junto con Enresa, un plan de compromiso legal, expedición de licencias y puntos de espera reguladores.

³ Servicio Integrado de Revisión Reguladora (IRRS) y Servicio Integrado de Revisión para Programas de Gestión de Residuos Radiactivos y Combustible Gastado, de Clausura y de Restauración (ARTEMIS). Misión combinada a España 14 a 26 de octubre de 2018.

- Enresa debería completar la fundamentación técnica del programa de AGP, especialmente para la selección del emplazamiento, y definir los hitos y plazos principales.

Otra de las recomendaciones se centra en la necesidad de disponer de un PGRR actualizado para dar soporte a todas las actuaciones en la gestión de los residuos radiactivos.

Como respuesta a las recomendaciones, Enresa elaboró el 7º PGRR, actualmente en tramitación⁴, que establece un nuevo programa para el AGP, con hitos para todas las fases, y se acordó, en el Comité de Enlace Enresa-CSN, la creación de un grupo de trabajo tripartito (GTT) entre el MITERD, el CSN y Enresa, que se constituyó formalmente el 18 de mayo de 2020. Su objetivo es el análisis y desarrollo de propuestas de instrumentos legales y normativos

⁴ Versión revisada del 7º Plan General de Residuos Radiactivos, 7 de noviembre de 2022.

adecuados para el desarrollo del proyecto en España, la definición de las etapas, los actores y las responsabilidades en cada una de ellas, los puntos de decisión y la definición de otras actuaciones y/o programas a desarrollar, como el diálogo operador-regulador, campañas de información pública, etc.

El GTT ha elaborado diversos informes, el primero de ellos una Hoja de Ruta donde se establecen las pautas para el desarrollo de un marco legal, reglamentario y procedimental para el AGP y un programa técnico que comprende tanto la planificación de las fases y principales actividades como un calendario tentativo.

Otra de las actividades organizadas por el CSN y Enresa para impulsar el proyecto de AGP fue la celebración en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, en noviembre de 2022, del Seminario Internacional sobre Almacenamiento Geológico Profundo, con dos objetivos principales: repasar la situación actual en España y

el estado de desarrollo en el ámbito europeo de los AGP, contemplando todas sus facetas. El encuentro sirvió de foro para el debate técnico y la participación social en torno a las opciones para adoptar una solución definitiva y el planteamiento de distintos puntos de vista.

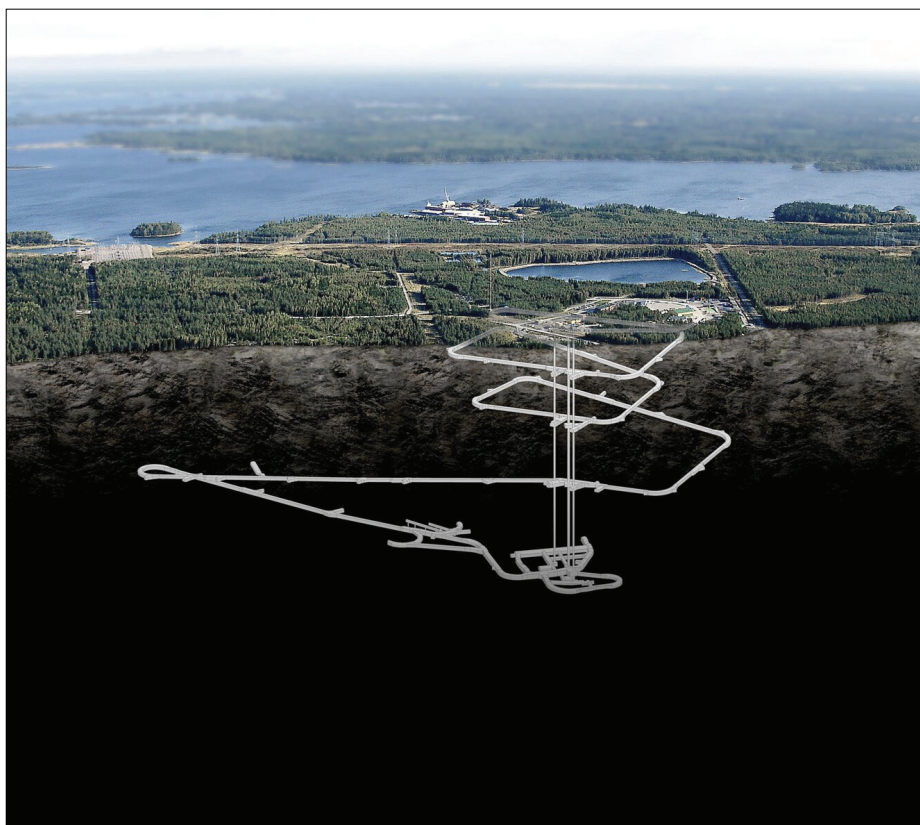
El seminario proporcionó una visión de los aspectos más relevantes para el desarrollo de un AGP. Las sesiones presentaron, entre otros aspectos, la posición ante el AGP de las tres organizaciones estatales involucradas, el marco legislativo actual en España sobre gestión del CG y de los RRAA, el desarrollo normativo a nivel internacional en materia de AGP y cómo adecuar el marco regulador español para el desarrollo del proyecto.

También se presentaron las conclusiones de los estudios llevados a cabo en España desde finales de los años 80 y las principales líneas de I+D en las que se está trabajando actualmente.

Además, los expertos internacionales mostraron las experiencias de otros países (Suiza, Alemania, Francia, Finlandia y Suecia) en los procesos seguidos para la selección de emplazamientos y el licenciamiento del AGP. También se puso de manifiesto la importancia y las claves para mantener un diálogo fructífero operador-regulador. Del mismo modo, se analizaron las necesidades de información y participación públicas en el proceso de selección de emplazamiento, explorando el papel de las comisiones consultivas como medio de información y participación pública y proporcionando la visión de países como Francia, Suecia y Alemania.

Situación internacional

En el ámbito internacional no son muchos los países que tengan ya un planteamiento completo de su AGP. Destacan Estados Unidos, con su instalación



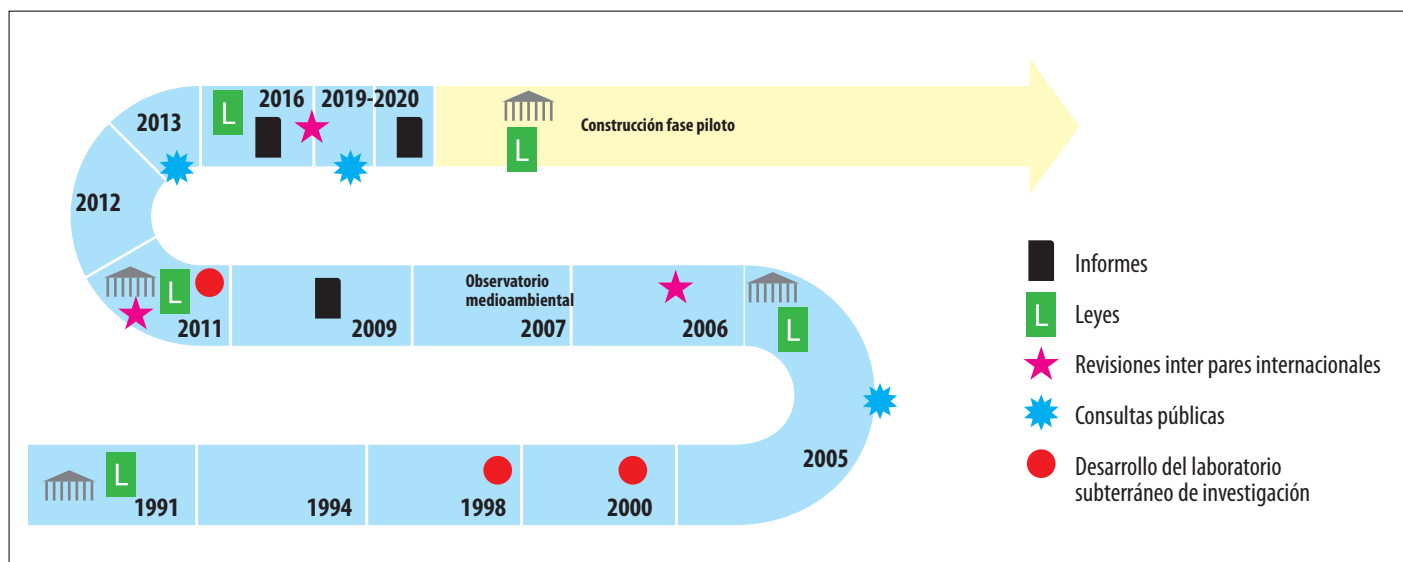
Esquema en profundidad del AGP de Onkalo, en Finlandia.

WIPP en Nuevo México para residuos de larga vida provenientes del programa militar americano, y Finlandia, en la que Posiva (responsable de llevar a cabo el proyecto) lleva construyendo desde

2015 las instalaciones subterráneas de su AGP en Olkiluoto, a unos 500 m de profundidad. En 2021 presentó la solicitud de autorización de explotación del AGP.



Construcción del AGP de ONKALO, en Finlandia.



Principales etapas de desarrollo del proyecto Cigéo Andra.

Amparado bajo un marco normativo específico para este proyecto (Regulation on the Safety of Disposal of Nuclear Waste STUK Y/4/2018 y Guías YVL D.5 y D.7 de 13/02/20218) y reforzado por los trabajos en su URL (Onkalo®, en formación de roca cristalina a 455 metros de profundidad) Finlandia ha conseguido mediante un proceso transparente y basado en el diálogo social un emplazamiento elegido voluntariamente y el apoyo de la opinión pública.

Francia también está a la cabeza del grupo internacional, con un emplazamiento elegido desde 2006 (Cigéo, en Meuse/Haute-Marne) y una detallada hoja de ruta para el desarrollo del proyecto. Andra, la agencia nacional para la gestión de residuos radiactivos, presentó en 2023 la solicitud para la autorización de construcción del AGP en arcillas a unos 490 metros de profundidad. En el caso francés destacan las actividades de diálogo social, llevadas a cabo mediante debates públicos, conferencias ciudadanas y comités locales de información, y los variados comités de acompañamiento del proceso.

En Suecia, SKB (compañía sueca para la gestión del CG y de los RR) dispone de un laboratorio subterráneo en

Äspö, al norte de Oskarshamn (en roca cristalina, a 460 metros de profundidad) y de emplazamientos para la planta de encapsulamiento y para el AGP (en los municipios de Oskarshamn y Östhammar, respectivamente). En 2022 el Gobierno sueco concedió dos licencias separadas para construir y operar la instalación de encapsulamiento y el AGP y se espera que en 2024 se lleve a cabo el proceso formal de licenciamiento para iniciar la construcción de ambas instalaciones.

Conclusiones

El AGP es la solución internacionalmente aceptada para la gestión segura a largo plazo del CG y de los RRAA. Tras más de 30 años de experiencia en la investigación, en el momento actual el conocimiento científico y técnico requiere el apoyo político y social.

Para el éxito del proyecto AGP es necesario disponer de una estrategia, una normativa y un programa por fases lo suficientemente robustos para proporcionar los objetivos y el respaldo político y social necesarios para su desarrollo.

El compromiso político debe ser sólido y a largo plazo, especialmente desde la primera etapa de selección del em-

plazamiento para albergar el AGP, que supone un hito fundamental y debe contar con un soporte normativo adecuado. En todas las fases, la aceptación pública es fundamental y es necesaria la interacción y el diálogo entre las partes interesadas: reguladores, comunidades, Gobierno, licenciario y ciudadanía.

La cooperación internacional es esencial, porque permite compartir experiencias, desarrollar proyectos de investigación conjuntos y discutir soluciones a problemas concretos.

En España, como respuesta a las recomendaciones de la misión IRRS/Artemis, se han reactivado las actividades para el desarrollo del AGP: Enresa ha incorporado en el 7º PGR un nuevo programa para el AGP y se ha creado un grupo de trabajo tripartito (MITERD, CSN y Enresa) para proponer instrumentos legales y definir las etapas, responsabilidades y los puntos de decisión que permitan el desarrollo del AGP. Con objeto de servir de foro para el debate técnico y la participación social, en noviembre de 2022 se celebró en Madrid un seminario internacional que sintetizó el estado del arte en el desarrollo del AGP y los aspectos clave a abordar en la situación actual. ©

Guía sobre protección radiológica en el manejo de fallecidos tras un tratamiento con radionucleidos

■ Texto: **David Masedo Martín** | Inspector del Área de Inspección de Instalaciones Radiactivas ■ **Asunción Díez Sacristán** | Consejera Técnica del Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas ■

Entre el 14 y el 26 de octubre de 2018 se desarrolló en España la misión combinada del Servicio Integrado de Revisión Reguladora (IRRS) y del Servicio Integrado de Revisión para Programas de Gestión de Residuos Radiactivos y Combustible Gastado, de Clausura y de Restauración (Artemis) del OIEA. Una de las conclusiones del informe final emitido como resultado de la misión identificaba que la legislación española en el momento del desarrollo de la citada misión no contenía disposiciones relativas a las fuentes encapsuladas o no encapsuladas contenidas en personas fallecidas o en restos humanos. Dicha cuestión había sido detectada previamente por el Consejo de Seguridad Nuclear en la fase de autoevaluación previa a la realización de la misión IRRS, incluyéndose una tarea específica en el plan de acción elaborado por el organismo.

Por ello, dentro del Foro Sanitario de Protección Radiológica se creó un grupo de trabajo para elaborar una guía que incluyera recomendaciones o directrices para el manejo, desde el punto de vista de la protección radiológica, de personas fallecidas o restos humanos tras haber recibido

un tratamiento con material radiactivo.

Si la muerte de un paciente tratado con material radiactivo se produce antes de que haya pasado un determinado tiempo (denominado *tiempo de seguridad*) desde la administración de la fuente radiactiva, será necesario realizar la práctica correspondiente (autopsia, embalsamamiento, incineración o hidrólisis alcalina) adoptando unas precauciones adicionales, que se describen en esta guía,

con objeto de reducir el riesgo debido a la radiación. En cambio, si el fallecimiento se produce pasado el tiempo de seguridad se podrá seguir cualquier práctica mortuoria con toda normalidad.

En la guía se han contemplado los casos de fallecimientos (o gestión de restos humanos) posteriores a una terapia reciente con radionucleidos no encapsulados (Sr-89, Y-90, Sm-153, Lu-177, Ra-223, Ho-166, P-32, y I-131) y radionucleidos encapsulados, mediante implantes permanentes de semillas de I-125 para tratamientos de cáncer de próstata.

No son objeto de la guía los casos de fallecimientos de pacientes con material radiactivo incorporado para el diagnóstico, ya que, por lo general, la concentración de material radiactivo potencialmente existente en el cadáver no es significativa, por lo que no es preciso, con carácter general, tomar precauciones especiales. Tampoco es objeto de la guía los casos de fallecidos que hayan incorporado material radiactivo como causa de una emergencia radiológica o nuclear.

Los riesgos radiológicos en la manipulación de fallecidos se reducen aplicando las medidas básicas de protección



radiológica; tiempo, distancia y blindaje. La guía incluye recomendaciones para minimizar el tiempo de exposición, aumentar la distancia y el uso de barreras.

Para un fácil manejo de la guía se han elaborado unas fichas para cada uno de los radionucleidos indicando los tiempos de seguridad y las precauciones adicionales a seguir si no hubieran transcurrido dichos tiempos. Por ejemplo, si los familiares de un fallecido al que se le realizó un implante de semillas de I-125 cinco meses antes de su fallecimiento, deciden que su cuerpo sea incinerado, la cremación debería realizarse con precauciones adicionales, debido a la radiactividad remanente, ya que el tiempo de seguridad para esta práctica es de 21 meses; en cambio, podrá realizarse sin restricciones un embalsamamiento, ya que el tiempo de seguridad para embalsamamiento en el caso de fallecidos con semillas de I-125 es nulo.

Los objetivos principales de la guía son:

- Describir cómo se deben aplicar los principios de protección radiológica para garantizar que las dosis recibidas, tanto por parte de los profesionales de la sanidad mortuoria como los miembros del público, sean lo más bajas posibles.
- Establecer, para los distintos isótopos contemplados en este documento, el *tiempo de seguridad*, definido como “el tiempo a partir del cual se considera que las prácticas mortuorias pueden llevarse a cabo de la forma habitual, es decir, sin ningún tipo de restricciones adicionales”.

De las conclusiones de la guía, cabe destacar las siguientes:

- El entierro o sepultura de cadáveres con actividad residual puede reali-

zarse en cualquier momento. El blindaje proporcionado por el ataúd y la tierra o las paredes de una cripta garantizan la seguridad. Tampoco son necesarias precauciones especiales ni restricciones durante el velatorio de personas fallecidas con actividad residual ni durante su transporte.

- Siguiendo las recomendaciones descritas en este documento, los riesgos radiológicos asociados al manejo de pacientes fallecidos con actividad residual son mínimos, tanto para los profesionales que intervienen en cada una de las fases de atención al fallecido, como para los familiares y el medio ambiente.

La guía se encuentra disponible de forma gratuita en la página web institucional del CSN (www.csn.es)



TIEMPOS DESDE LA ADMINISTRACIÓN DEL ISÓTOPO EN LOS QUE SON NECESARIAS LAS PRECAUCIONES						
ISÓTOPO	Embalsamamiento	Autopsia	Cremación			
			Profesionales	Guardado cenizas en domicilio	Destino final cenizas	Material urna
Sr-89	5 semanas	5 meses	-	-	1 año	a
Y-90	3 semanas	1 mes	-	-	6 semanas	a
Sm-153	-	2 días	-	10 días	3 semanas	b
Lu-177	-	2 semanas	-	7 semanas	2 meses	b
Ra-223	-	-	-	3 días	9 semanas	a/b
Ho-166	-	1 día	-	5 días	3 semanas	b
P-32	-	1 mes	-	-	4 meses	a
I-131	3 semanas	6 semanas	-	3 meses	4 meses	b
I-125	-	3 meses	-	21 meses	21 meses	b

a: madera, plástico o vidrio b: Acero inoxidable, u otro metal.

Tiroides maligno	611
Hipertiroidismo	1267
Enfermedad Mieloproliferativa	21,8
Metástasis Hueso	72,3
Sinovitis	63,3
Otros	5,6
Braquiterapia I-125	21,2
Total	2061

Número de tratamientos con material radiactivo en España por millón de habitantes al año. (Fuente: UNSCEAR, 2008)

Autopsia	Tiempo de seguridad: 3 meses - Asegurarse de que el tejido alrededor del implante permanece intacto durante la autopsia. En el caso de implantes de próstata, por ejemplo, esta debe permanecer intacta. Esto proporcionará protección del material radiactivo y evitará la diseminación de las semillas. - Evitar el contacto directo con el tejido alrededor del implante, para ello usar herramientas (pinzas, etc.). - Los tejidos/órganos con semillas no deben ser retirados de la persona fallecida. En caso de que esto sea necesario, se almacenarán adecuadamente protegidos y custodiados en un recipiente señalado como “radiactivo” y con la fecha de evacuación. El personal debe ser informado adecuadamente. - Limitar la duración de la autopsia a un máximo de dos horas cuando el implante se haya realizado un mes antes del fallecimiento.
Embalsamamiento	Tiempo de seguridad: NO
Cremación	ALMACENAMIENTO DE LAS CENIZAS EN EL DOMICILIO Tiempo de seguridad: 21 meses Precauciones durante el almacenamiento de los restos cremados: - Almacenar los restos cremados en un recipiente cerrado hecho de acero inoxidable u otro metal. - Almacenar los restos en una zona de baja ocupación. DESTINO FINAL DE LAS CENIZAS Tiempo de seguridad: 21 meses Precauciones durante la manipulación de los restos cremados: - No diseminar los restos cremados. - Etiquetar el contenedor con la fecha en la que se pueden diseminar los restos cremados. - No utilizar los restos incinerados para la fabricación de joyas de recuerdo o tatuajes. - No manipular directamente los restos cremados.
Hidrólisis alcalina	Tiempo de seguridad: 21 meses No se debe llevar a cabo antes de este tiempo la hidrólisis alcalina.

Ejemplo de ficha de recomendaciones incluidas en la guía para implantes permanentes de próstata con semillas de I-125.

Eloísa del Pino Matute (Soria, 1969) ocupa desde junio de 2022 la presidencia del principal organismo de investigación de España, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, una institución que agrupa a 124 centros que cubren todas las disciplinas y donde trabajan más de 14 000 personas. Es la segunda mujer que ocupa el cargo, tras su predecesora, Rosa Menéndez, y procede de un ámbito marginal en el imaginario de la investigación, el de las ciencias sociales. Licenciada y doctorada en Ciencias Políticas por la Universidad Complutense de Madrid, se licenció también en Derecho por la UNED y cursó un máster en Organización en ESIC.

Ha compaginado su trayectoria académica e investigadora en el Instituto Ortega y Gasset, las universidades Rey Juan Carlos y Autónoma de Madrid y el Instituto de Políticas y Bienes Públicos del CSIC, donde tiene plaza como científica titular; con cargos públicos como la dirección del Observatorio de Calidad de los Servicios de la Agencia de Evaluación de Políticas y Calidad de los Servicios del Ministerio de Política Territorial (2009-2011) y la dirección del Gabinete de la ministra de Sanidad, Consumo y Bienestar Social (2018-2020). Además, es editora de Agenda Pública y directora de la revista Gestión y Análisis de Políticas Públicas.

Entrevista a Eloísa del Pino, presidenta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas

“Para el CSIC y para la ciencia española la de 2011 a 2019 ha sido una década perdida”

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■ Fotos: **Julio Fernández González** ■

PREGUNTA: Ya lleva casi un año al frente del CSIC. ¿Tiene ya un diagnóstico de la institución?

RESPUESTA: Desde luego que lo tengo. Hemos estado la primera parte de este año, desde que me incorporé, el 21 de junio del 2022, trabajando no solo en un diagnóstico, sino también en un plan para fortalecer la institución. Y está bas-

tante avanzado y de hecho ya hemos empezado a implementar algunas medidas.

P: Entre ellas, el plan Simplifica, para reducir la burocracia, que según algunos investigadores más bien la está incrementando.

R: Bueno, dentro del plan que hemos hecho, nos hemos dado cuatro objetivos estratégicos fundamentales. Uno de ellos,

yo siempre lo explico cuando voy por los 124 institutos del CSIC, diciendo que imaginen una pirámide y en la base de la pirámide uno de los objetivos estratégicos es gestionar mejor la institución. Para conseguir ese objetivo estratégico hemos diseñado seis planes y uno de ellos es efectivamente el plan Simplifica. Se ha formado un equipo de 25 personas



que han analizado cinco áreas de la gestión institucional: compras, viajes, contratación, riesgos laborales y gestión de proyectos. Y entonces han hecho un análisis de cada una de esas áreas e identificado qué aspectos se pueden mejorar desde un punto de vista de la simplificación administrativa. Hemos puesto en marcha ya algunas medidas de simplifi-

cación en el ámbito de las compras y ahora estamos analizando qué podemos implementar en el ámbito de los viajes. ¿Qué cosas no podemos hacer? No podemos hacer las que no dependen de nosotros sino del Ministerio de Hacienda. Entonces, lo que hacemos es elaborar un informe para entregarles y hacer las sugerencias de qué se puede mejorar.

P: *A veces es complicado que las medidas se implanten en la práctica cotidiana.*

R: Es verdad que no son fáciles de implementar, porque a veces implican no solo reducir la burocracia, sino también hacer cambios en todos los sistemas de información. Pero fundamentalmente el incremento de la burocracia que se haya podido producir tiene que ver

con la nueva normativa de conflictos de interés que viene de la Unión Europea, ni siquiera del Gobierno de España. Y que implica que todos los recursos que gastemos que vengan de los fondos europeos tienen que someterse a un control, a mi juicio demasiado estricto, desde el primer euro que gastemos. Implica un incremento de la presión, fundamentalmente para los gerentes de la organización.

P: *España y la Unión Europea tienen fama de tener mucha burocracia, pero en otros países, como Alemania y Francia, los centros de investigación tienen mucha más libertad para contratar, para gastar... Tienen más independencia ¿no?*

R: Hay de todo, pero el problema está en la Comisión. El otro día estuve en Baviera reunida con los presidentes del G6 de la ciencia europeas, que está formada por tres instituciones alemanas (Helmholtz, Leibnitz y Max Planck), el CNR italiano, el CNRS francés y el CSIC, y los seis presidentes nos quejamos al representante de la Comisión Europea que estaba allí de la burocracia que implica el acceso a los fondos de recuperación. No solo para las instituciones científicas, para todas las instituciones. Lo que pasa es que las instituciones científicas hemos estado especialmente debilitadas en la etapa anterior. El Gobierno de España, por ejemplo, está canalizando mucho dinero a la ciencia, a proyectos de investigación, pero eso tiene que pasar por una tubería, que es la estructura de las organizaciones científicas, que es muy estrecha, porque a partir de los recortes del 2011, 2012, este es un aspecto que no se ha cuidado. Entonces, ahora tienes muchos recursos para entrar por una tubería muy estrecha.

P: *¿No pueden aprovechar todos los recursos que les ofrecen?*

R: El personal de gestión ha disminuido, además de haber envejecido y los sistemas de información se han quedado

obsoletos durante estos años. Ahora se gestiona más del doble de lo que se gestionaba en 2012. Los científicos siempre diremos que nunca es suficiente, pero ahora hay mucho más dinero para proyectos científicos, pero tienen que atravesar una tubería que es muy fina y eso es la clave. Yo estoy trabajando mucho con el Ministerio de Ciencia e Innovación para intentar superar esta situación. De hecho, y es la primera vez que lo digo en público, en el Consejo Rector del CSIC hemos aprobado una nueva versión del contrato de gestión que va a ser el primero desde que se convirtió en una agencia, en el año 2008.

P: *Durante años el CSIC tenía el sueño de convertirse en agencia para ganar independencia. ¿Se ha conseguido?*

R: No se ha ganado porque depende en muy buena medida de aprobar el contrato de gestión, que es el instrumento que nos daría parte de esa independencia y que, como su propio nombre indica, es un contrato por el que el CSIC se compromete a cumplir una serie de objetivos científicos y de otro tipo. A cambio, el Ministerio de Ciencia e Innovación y el



“Hemos presentado un nuevo contrato de gestión que va a ser el primero desde que el CSIC se convirtió en una agencia en 2008”

“Solo el 22 % de los institutos del CSIC están dirigidos por mujeres”

P: *Usted es la segunda presidenta del CSIC. ¿Cree que ya se está consiguiendo normalizar la presencia femenina en puestos decisivos?*

R: A ver, yo creo que nos falta mucho todavía en el día a día. Por ejemplo, solo una parte, el 22 % de los 124 institutos del CSIC están dirigidos actualmente por mujeres. Me cuesta muchísimo tirar de ellas todavía. Los eventos todavía siguen ocupados, casi siempre, por varones. Cuando le pido a alguna mujer que lidere alguna iniciativa, hay que hacer un especial esfuerzo todavía para conseguirlo. Tenemos una brecha muy grande en profesores de investigación que, como seguramente sabes, es la máxima categoría, donde el 74 por ciento son varones. Y es verdad que con el paso del tiempo eso puede irse cerrando. Pero no solo, es insuficiente y de hecho en algunos puntos estamos viendo con preocupación que la brecha aumenta. En el área de las ingenierías o la física estamos especialmente mal. Cuando voy a los institutos de física, casi no se ven mujeres o se ven muy pocas, sobre todo de edad mediana, porque sí que suelen empezar el predoc, pero luego se va cerrando, van desapareciendo y estamos trabajando en ello porque la situación nos preocupa. El año pasado aprobamos el III Plan de Igualdad.

P: *¿Se mantiene el efecto tijera?*

R: Espero que en junio o julio tengamos el primer resultado de un informe que he encargado a una de nuestras investigadoras del CSIC, Laura Cruz, que es experta en política científica y género, porque no podemos seguir dando pasos de ciego. Digamos que ahora ponemos parches y ponemos en marcha acciones de manera intuitiva. Lo que le hemos pedido es que analice cuáles son los factores que explican la famosa tijera. ¿Para qué? Pues porque si hay un factor que explica el 30 por ciento de la tijera, por ejemplo, podemos percutir ahí e insistir con algún tipo de iniciativa específica dirigida a ese factor. Porque son muchas las intuiciones que tenemos, pero tenemos poca evidencia en concreto de por qué se produce ese efecto en el CSIC. Y nosotros no podemos tener poca evidencia, somos una organización científica.

P: *Su primer plan de igualdad es de 2013. ¿Se han detectado efectos positivos en estos diez años?*

R: Sí, se han introducido nuevas medidas, también de todo tipo, desde conciliación hasta otras medidas. Ahora hemos avanzado en el número de comités que tenemos de igualdad. Yo me estoy involucrando con el Comité de Mujeres y Ciencia de la Comisión, porque es un tema en el que creo. Ahora, por ejemplo, vamos a dar la medalla de oro del CSIC a Donna Strickland, que es una física y premio Nobel. En principio será el día 28 de septiembre, aunque no es fecha definitiva. Y vamos a hacerle ese reconocimiento para visibilizar a las físicas. También hacemos cosas con los colegios, estamos en los institutos, estamos en todos los sitios, pero yo creo que hay que afinar un poco más todavía. ▶

Ministerio de Hacienda se comprometen a darnos una financiación estable y previsible y una oferta de empleo público estable y previsible para los cuatro años que dura el contrato de gestión.

P: *¿Y eso se va a conseguir ahora?*

R: Yo he puesto toda el esfuerzo, la carne en el asador. Lo hemos pasado ya por el Consejo Rector de la institución hace un par de semanas, que no solo lo aprobó, sino que nos felicitó, porque hemos hecho un análisis muy profundo. No es mi primer contrato de gestión. Yo ya estuve en otra agencia, AEVAL, y ahí también hicimos un contrato de gestión que se aprobó. El contrato de gestión que ahora hemos presentado recoge todo el análisis y el diagnóstico y yo creo que es inapelable.

P: *¿Cuándo va a estar aprobado?*

R: Bueno, eso ya no depende de nosotros, pero me gustaría que llegásemos al verano con el contrato aprobado.

P: *El CSIC ha absorbido otros tres organismos públicos de investigación recientemente. ¿Ha digerido bien esa absorción?*

R: Yo siempre digo que no absorbimos, que se incorporaron al CSIC, el Oceanográfico (IEO), el INIA, que se dedica a la agricultura fundamentalmente; y el IGME en el ámbito geológico. La integración empezó en marzo de 2021 pero todavía estamos en el proceso. Este 2023 es el primer año que se integran las cuentas de esos tres centros en las del CSIC y ha sido complejo. En general, las infraestructuras, y especialmente los edificios del Oceanográfico, han llegado en una situación muy mala. Vamos a hacer una enorme inversión, ayudados por el Ministerio de Ciencia e Innovación, para destinar muchos recursos a renovar las infraestructuras. Estos centros, como están todos al borde del mar, pues sufren mucho. Vamos ahora a inaugurar un nuevo centro en Málaga y vamos a construir un nuevo centro en Vigo, porque el que tenemos hay que demolerlo.

P: También supone un aumento de plantilla

R: Se han integrado 1 738 personas. Creo que para el CSIC son un impulso fantástico por distintas cosas. Científicamente, por un lado, nos fortalecen en áreas en las que estábamos bien, pero nos viene bien un fortalecimiento. Por ejemplo, ahora pasamos a tener una de las flotas científicas más importantes del mundo. Y tienen una *expertise* que el CSIC tenía, pero menos, que es en el asesoramiento científico y la transferencia del conocimiento para la elaboración de las políticas públicas. Tienen un papel muy importante, por ejemplo, en la política pesquera, en la vigilancia sísmica y en el asesoramiento al Ministerio de Agricultura. Es decir, que las sinergias son fantásticas.

P: ¿No se está sobredimensionando así el CSIC?

R: Es que el CSIC es pequeño. Somos 14 000 personas, pero todo depende de con quién se compare. Estando en el G6, somos los más pequeños, junto con el CNR italiano. Por ejemplo, la Helmholtz tiene 44 000 personas, el Leibnitz 23 000, la Max Planck veintitantas mil. Somos los más pequeños y yo diría que es fundamental fortalecernos, porque tenemos muy pocos recursos en comparación con otros.

P: El Consejo ya tenía centros en estas áreas. ¿No se duplican investigaciones?

R: No, yo creo que no. Más bien se complementan, porque son disciplinas enormes y hay mucho que investigar. Queremos provocar un diálogo entre los nuevos centros y los del antiguo CSIC, para que se adapten y vean en qué medida pueden encajar. Y hemos tomado varias iniciativas de política científica para que se integren mejor todas las áreas. Por ejemplo, en el ámbito del Oceanográfico, tenemos un montón de institutos de ciencias del mar y viene el IEO, que es muy potente, pues hemos creado un comité de flota

para ver cómo gestionar toda nuestra flota y no solamente desde el punto de vista de la gestión, sino también desde el punto de vista científico. Otro ejemplo, hemos reformulado una iniciativa que puso en marcha el equipo anterior, que son las conexiones científicas, que lo que hacen es reunir a todos los científicos del CSIC

P: Decía antes que el CSIC es pequeño en comparación con sus colegas europeos. 14 000 personas incluyendo las procedentes de los OPI integrados ahora, pero en el año 2010 creo que había unas 15 000.

R: No recuerdo ahora esa cifra, pero es verdad que hemos perdido. Es que la crisis fue letal. Hemos perdido personal



que trabajen en un área, estén donde estén. Fue una excelente iniciativa y lo que hemos cambiado es que en lugar de diseñar esas conexiones desde arriba sean los propios investigadores los que las sugieran. Por eso digo que empezó la integración, pero hay que esperar a que transcurra un poco de tiempo.

en estos años en todos los colectivos: técnicos, científicos y personal de gestión. Para el CSIC y la ciencia española la de 2011 a 2019 ha sido una década perdida. No se cubrían las jubilaciones y algún año tuvimos cero promociones en personal científico, por ejemplo. Ahora, este es uno de mis empeños, tener

una oferta de empleo público que no solamente nos permita mejorar nuestras cifras, sino prepararnos para el enorme problema que se nos viene encima, que son las jubilaciones.

P: *Porque la edad media además es elevada, más de 50 años ¿no?*

R: La edad de los científicos titulares, que es el escalón más bajo, es 52,7. Y la de los profesores de investigación, creo recordar, 59. Y eso no puede ser. Por eso las cifras incluso van a bajar más. Fíjate, los científicos titulares que entran aquí tienen una edad media de 45 años, lo cual es una barbaridad. Estos últimos años hay ofertas de empleo público muy generosas, y espero que este año también lo sea. Estamos negociando ahora con los ministerios y espero que nos permita un respiro, aunque no es suficiente, porque tenemos una plantilla muy, muy envejecida.

P: *Otro problema del sistema español de ciencia es que la carrera profesional del científico es muy complicada.*

R: Es muy dura hasta que se consolida y ha habido mucha precariedad. Hasta que tu carrera puedes considerarla estable vas dando tumbos de un sitio a otro. La nueva Ley de la Ciencia acaba en buena medida con la precariedad y nosotros en el CSIC estamos por ello: poco a poco estamos utilizando la contratación indefinida e intentando ver cómo podemos mejorar a nuestros predoctor y, sobre todo, a los postdoc. Y también los tecnólogos, que son un elemento clave en el sistema porque hay muchas actividades científicas que sin ellos no se podrían hacer, son otro colectivo que tiene una carrera muy difícil, porque es muy corta y se ha puesto en marcha una nueva escala que les permite alcanzar el nivel administrativo 26, con lo cual han mejorado un poco sus perspectivas, y hay que seguir mejorando en esa dirección. Y también hemos hecho un plan dentro del contrato de gestión para me-

jorar los niveles administrativos y las retribuciones del personal de gestión, como reconocimiento del enorme esfuerzo que hacen y la responsabilidad que tienen al gestionar mucho dinero.

P: *¿Cuáles son las debilidades y las fortalezas del Consejo?*

R: Yo diría que sus fortalezas son también sus debilidades. Somos una organización grande y potente, capaz de abordar muchos problemas, que muchas veces son a la vez científicos y sociales; por ejemplo, la resistencia a antibióticos, los fuegos, las sequías, etcétera y hacerlo desde distintas perspectivas. Esa es una

“Tenemos una plantilla muy envejecida: la edad media de los científicos titulares es 52,7 y la de los profesores de investigación 59”

gran fortaleza y al mismo tiempo una debilidad, porque si apuestas solo por una disciplina puedes hacerlo con más intensidad. Además, estamos repartidos por todo el territorio nacional, somos un elemento de cohesión territorial porque ¿qué institución del Estado llega hoy a todo el territorio nacional? Pero eso, a su vez implica problemas comunicativos y una complejidad organizativa.

P: *Precisamente cada vez es más frecuente crear equipos multidisciplinares donde quizá deberían estar integradas también las ciencias sociales.*

R: Yo misma, dentro del CSIC, antes de ser presidenta, pertenecía a la plataforma Salud Global, donde hay mucha gente de todas las disciplinas vinculadas a la salud desde las ciencias naturales,

pero también desde las humanidades éramos unos cuantos. Mi especialidad son políticas sanitarias. Por ejemplo, yo trabajé mucho en el tema del análisis del efecto de la pandemia en las residencias de mayores. Es verdad que si lo miras de cerca las ciencias sociales son casi como un adorno o una guinda en estos equipos y tendrían probablemente que estar más presentes.

P: *Usted es la primera persona procedente de las ciencias sociales que preside el CSIC desde Alejandro Nieto, hace 40 años.*

R: Bueno, Alejandro Nieto es de derecho, que no es en sí de ciencias sociales. Creo que en 80 años del Consejo la mía es la primera presidencia del ámbito de las ciencias sociales. Las humanidades son un poco más fuertes, pero las ciencias sociales están poco presentes y muchas veces se echan a faltar. Por ejemplo, en políticas de transición energética, sanitaria, de medio ambiente. Hay que apostar un poco más por las ciencias sociales. Y también es uno de mis objetivos.

P: *¿Siente que los otros científicos les miran por encima del hombro?*

R: Yo creo que no. Sería una torpeza. Primero, porque los problemas que tienen que resolver las ciencias sociales son extraordinariamente graves, como por qué perviven o mueren las democracias o las cuestiones de igualdad y desigualdad, pobreza. Es decir, son problemas tan importantes como los de ciencias naturales. Es verdad que las prácticas son muy diferentes. Tenemos muchas cosas en común, todos aplicamos el método científico, pero nuestro cerebro está amueblado ligeramente diferente. La forma de publicar, el sistema de citación, el trabajo individual o de equipo son distintos; ni mejor ni peor.

P: *¿Cómo se consigue el equilibrio entre el centralismo que supone que un solo organismo acumule tantos centros y el grado de autonomía que tenga cada instituto?*

R: Pues justamente es uno de nuestros propósitos. Estoy convencida de que hay que dar un poco más de autonomía a los institutos, porque ellos saben lo que necesitan. Y estamos haciendo dos cosas. Primero, si aprobamos el contrato de gestión, tendremos más recursos, porque yo podría hablar de que les voy a dar más autonomía, pero sin recursos eso no es posible. No nos engañemos. Si quieres ser autónomo debes tener capacidad.

P: *Quien manda en este país es Hacienda.*

R: Exactamente. Y tienes que tener capacidad de gasto y decidir qué recursos vas a destinar a esto o a lo otro. Mi idea es, si nos da tiempo y conseguimos el contrato de gestión, que los institutos tengan cierta autonomía. Y en segundo lugar estamos en pleno diseño de un programa que se llama MaX CSIC, marco de autoevaluación de excelencia. La idea es que los institutos se autoevalúen y vean qué es lo que les separa de ser excelentes, definido objetivamente por los programas Severo Ochoa y María de Maeztu. El 17 por ciento de nuestros centros ya lo son y hay muchos más que podrían serlo con un pequeño empujón. Si saben lo que les hace falta, la institución central les va a ayudar en términos financieros, de apoyo o lo que sea para lograr la excelencia.

P: *El suyo es un puesto privilegiado para observar la ciencia española, ¿cómo la ve?*

R: Hombre, yo creo que en los últimos años hemos pegado un buen salto. Los fondos europeos son fundamentales y que el Gobierno los haya canalizado hacia estos temas muestra su grado de compromiso, aunque también porque está en la Ley de la Ciencia. Pero hay aún muchísimas cosas por hacer, sin duda. Y está el problema de la inversión privada en ciencia, tecnología y en innovación, que es pequeñísima en comparación con los países de nuestro entorno. El dinero

público que se destina a ciencia ha crecido, pero tiene que hacerlo mucho más en los próximos años. El otro día en el G6, los alemanes hablaban ya de llegar al 3,5 del PIB.

P: *Y nosotros estamos en poco más del 1,40.*

R: Claro, pero ellos hablaban de fondos públicos y privados. Nosotros de privada nada. Hemos creado una cuarta vicepresidencia, dedicada a Innovación y Transferencia. Hemos doblado el presupuesto en este tema y hemos alineado todos nuestros objetivos con el plan fantástico de colaboración y transferencia



“Que el Gobierno haya canalizado los fondos europeos hacia temas científicos muestra su grado de compromiso”

que ha hecho el Ministerio de Ciencia e Innovación, que yo creo que está muy bien, y en el CSIC vamos a hacer muchas cosas concretas, como un hub de innovación. La semana pasada tuvimos, por ejemplo, un evento en el que un montón de investigadores nuestros nos contaron sus propuestas de crear *spin off* y 20 de ellos van a recibir respaldo, porque vimos que eran propuestas interesantes. Vamos a acelerar mucho la creación de *spin off* en el CSIC, cambiando la normativa interna y desburocratizando. Hay un montón de iniciativas dentro de un plan que se llama Converte. Una filosofía que yo claramente tengo es que el CSIC tiene que mirar hacia afuera.

P: *Crear una spin off nunca fue fácil en España.*

R: No, pero ahora va a ser más fácil, porque es muy importante. Además de publicar de forma excelente, a nuestros científicos les pedimos captar fondos y financiación, porque vivimos de eso. Una parte muy importante de nuestra financiación, el 40 por ciento, viene de lo que captan los investigadores en contratos, patentes, proyectos y con el sector público y privado. Tenemos *spin off* que nos están dando dinero y también prestamos servicios científicos y técnicos a las empresas. Eso es muy poco conocido. Para ayudar a crear más *spin off* hemos creado un comité donde hay mucha gente del sector privado y también de las Administraciones Públicas.

P: *El discurso de implicar al sector privado se ha oído muchas veces. Hace 30 años se crearon las OTRIS, que se suponía que eran para lo mismo. ¿No han funcionado como deberían?*

R: Bueno, yo creo que también uno es deudor de su tiempo, en el sentido de que era otro país, que nada tiene que ver con este. Y por lo tanto, yo creo que hemos ido aprendiendo, pero antes eran muy voluntariosas, no había personal especializado y ahora tenemos un personal espectacular, que se lo sabe todo y creo que ahora es el momento de hacerlo.

P: *¿Cómo le gustaría ser recordada por tu paso en el Consejo, lo que le gustaría dejar de legado?*

R: Pues hombre, me gustaría mejorar la gestión de la institución. Rosa Menéndez decía “Me gustaría que en mi etapa hubiera un premio Nobel español”. Yo ni siquiera. Me gustaría poner las bases para que la ciencia española pudiera tener en el futuro un premio Nobel, pero sobre todo que la ciencia española sea apreciada por la sociedad, que el CSIC sea apreciado por la sociedad española como un lugar donde atendamos los problemas científicos y sociales más importantes. ©



Escaner PET-CT.

La teragnosis utiliza una misma molécula para realizar el diagnóstico y tratamiento

La nueva medicina nuclear contra el cáncer

Aunque la teragnosis no es un concepto nuevo, los avances obtenidos en los últimos años para el tratamiento de tumores neuroendocrinos han puesto el foco en esta técnica y apuntan a un crecimiento exponencial como alternativa para pacientes con otros tipos de cáncer, especialmente para aquellos con metástasis, que no responden a otras terapias. Se trata de un claro ejemplo de medicina personalizada y dirigida, basada en la combinación entre

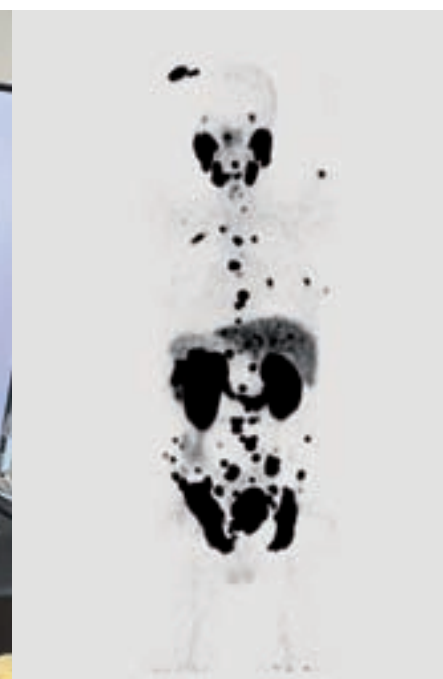
una molécula diana en las células tumorales y otra que se una a ésta de forma específica. A esta última se le añade un isótopo radiactivo que permite diagnosticar de forma precisa el estado del tumor y eliminar las células tumorales sin apenas daño en los tejidos circundantes. Un tratamiento que, además de prolongar la vida del paciente, produce escasos efectos secundarios.

■ Texto: **Noemí Trabanco** | periodista de ciencia ■

La palabra teragnosis une dos conceptos: terapia y diagnóstico, ya que lo extraordinario de esta técnica es que una misma molécula puede servir para identificar los órganos afectados

y, al mismo tiempo, para eliminar las células tumorales. La utilización de yodo radiactivo (o yodo-131) en el tratamiento del cáncer de tiroides y del hipertiroidismo se remonta ya al siglo

pasado, pero la utilización de radioligandos, moléculas marcadas con un isótopo radiactivo que se unen específicamente a una determinada molécula del tumor, ha experimentado un im-



José Luis Carreras y, a la derecha, una imagen utilizada en un caso tratado mediante teragnosis.

portante crecimiento en los últimos años. Se utiliza actualmente para el tratamiento de tumores neuroendocrinos y del cáncer de próstata, fundamentalmente en pacientes en estadios avanzados de la enfermedad. La búsqueda de nuevas dianas terapéuticas por los investigadores y los resultados de los ensayos clínicos que se llevan a cabo en la actualidad apuntan a que esta técnica podrá ser utilizada también en otros tipos de cáncer en un futuro no muy lejano.

En primer lugar, es necesario identificar una molécula diana específica del tumor. En el caso de tumores neuroendocrinos es una proteína de membrana, presente en grandes cantidades en las células tumorales, que actúa como receptor de la hormona somatostatina. Después se necesita una molécula capaz de unirse a ese blanco, como el fármaco DOTATATE, que es muy similar a la somatostatina. Y una vez identificada la molécula o ligando, se le une entonces un isótopo radiactivo que permite la visualización de las regiones donde se localizan estas moléculas y, por tanto,

las células tumorales. El galio-68 (^{68}Ga) es uno de los más utilizados, ya que de esta forma se irradia muy poco a los pacientes, pero se obtiene una buena imagen de la distribución del tumor. Esta imagen se obtiene a través de una tomografía por emisión de positrones o PET, en la que un escáner detecta la radiación emitida. “Cuando los niveles de marcadores tumorales aumentan, se realiza el PET con el radioligando de diagnóstico y generalmente se identifica una región afectada mayor de lo que se esperaba. El manejo del caso clínico del paciente cambia en más de un 60 % de los casos”, explica José Luis Carreras, catedrático emérito de la Universidad Complutense y experto en teragnosis del Hospital Clínico San Carlos. “Cuando se demuestra que el tumor es capaz de captar estas moléculas, se cambia el isótopo de diagnóstico por uno de terapia, que elimina las células tumorales alterando el núcleo celular. De esta forma se asegura que el paciente va a responder al tratamiento. De ahí que los profesionales hablemos de que tratamos lo que vemos”, declara. En este caso el

isótopo de tratamiento es Lutecio-177 (^{177}Lu) y es utilizado en tumores de grado I y II, es decir, más diferenciados y en casos muy avanzados, metastásicos e inoperables, donde los tratamientos previos ya no son efectivos.

En el hospital de Bellvitge, en la provincia de Barcelona, el médico José Luis Vercher lleva años tratando pacientes con este tipo de tumores y participa en numerosos ensayos clínicos en teragnosis. “Realizamos un seguimiento pormenorizado de la evolución de cada paciente. Se observa mucho beneficio, aunque los pacientes con muchos síntomas previos pueden tardar más en notar la mejoría”. Vercher recuerda el caso de uno de sus pacientes, ya convertido en amigo, que en su primer día de terapia no podía apenas levantar los brazos para lavarse el pelo en la ducha debido al dolor. “Tras la primera sesión volvió y me dijo: ¡mire doctor lo que estoy haciendo!, mientras levantaba los brazos hacia arriba. Además de alargar la vida del paciente, esas pequeñas mejoras en el día a día producen un aumento de su calidad de

vida”. Actualmente están implicados en un ensayo en tumores de grados I y II, en los que se dan hasta 6 ciclos de tratamiento. “Estamos viendo resultados muy similares a los del ensayo NET-TER” (ensayo pionero que demostró la eficacia del tratamiento con DOTATATE- ^{177}Lu para este tipo de tumores).

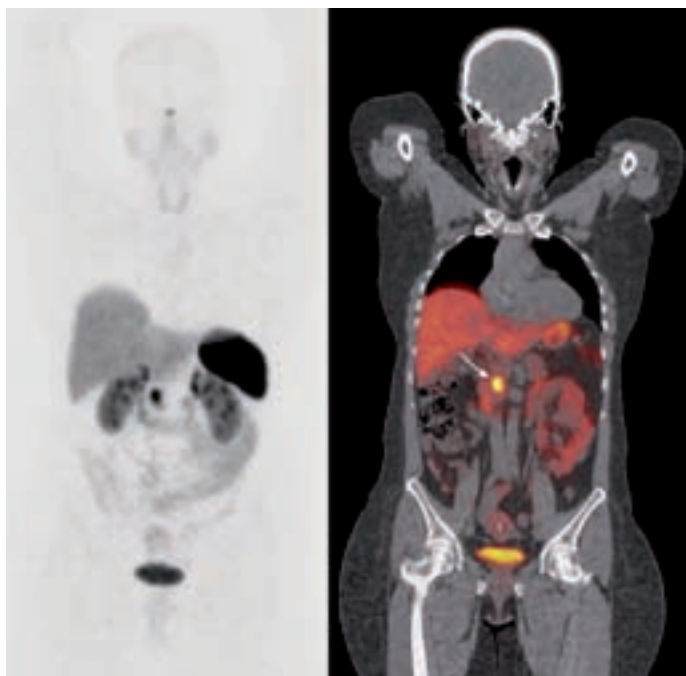
El DOTATATE- ^{177}Lu , que venía aplicándose como tratamiento de hasta quinta o sexta línea, es decir, tras probar otras alternativas, se aplica ya en segunda o tercera, incluso como primera línea. También existen ensayos clínicos en marcha para evaluar su utilización en pacientes con estadios menos avanzados de la enfermedad o pacientes jóvenes. En España, la teragnosis para tumores neuroendocrinos, que tienen una incidencia baja en la población, se aplica ya en casi todos los servicios de medicina nuclear que existen. El salto exponencial se espera próximamente, con la inminente aprobación de un tratamiento similar contra el cáncer de próstata, que hará que se consolide como tratamiento contra el cáncer, sumándose a los ya existentes.

PSMA, el próximo paso

“El cáncer de próstata es el segundo tipo de cáncer más frecuente en el mundo y la primera causa de muerte por cáncer en el varón. Además, entre un 40 y un 60% de los pacientes recaen” detalla Adolfo Gómez, médico adjunto de la Unidad de Medicina Nuclear del Hospital 12 de Octubre de Madrid. Para este tipo de cáncer se ha identificado también una molécula diana: el PSMA (siglas de Antígeno prostático de membrana). Esta proteína se encuentra en mayor cantidad de lo normal en las células tumorales, especialmente en tumores desdiferenciados, con metástasis o que son resistentes al tratamiento hormonal. El ensayo Vision, realizado a nivel internacional, demostró que el uso de PSMA marcado con ^{177}Lu aumentaba la esperanza de vida de los pacientes y que incrementaba su

calidad de vida, reduciéndose el dolor y mejorando su bienestar general. El 12 de Octubre fue precisamente el primer hospital español en tratar a un paciente con cáncer de próstata con teragnosis dentro de un ensayo clínico. Después se incorporaron otros hospitales y actualmente son varios los que participan en diferentes ensayos clínicos tanto para este tipo de tumores como probando nuevas moléculas que puedan ser utilizadas en otros tipos de cáncer.

Este tratamiento fue ya aprobado para uso terapéutico en Estados Unidos en 2022 y, tras ello, lo hizo también la Agencia Europea del Medicamento, por

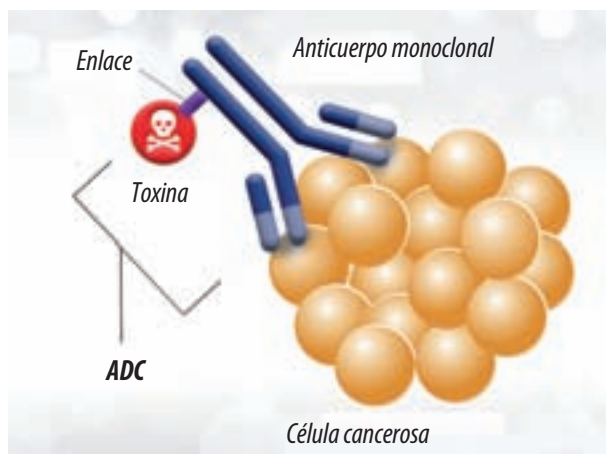


DAVID TAÏEB, AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ

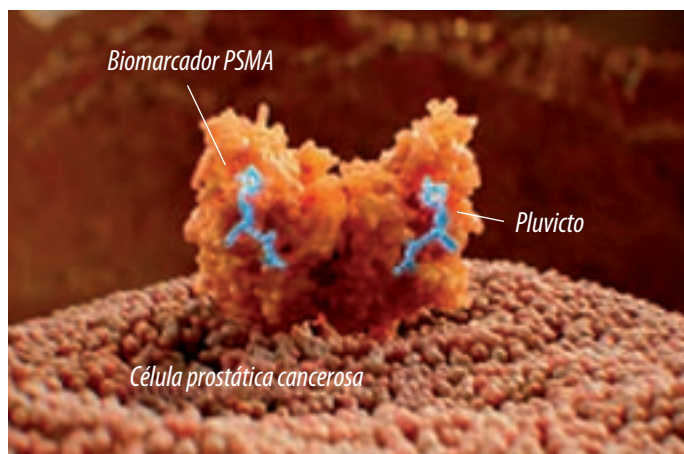
Imagen PET-CT que muestra la acción de 68-Ga-DOTATATE en el tumor.



Adolfo Gómez.



Modo de acción de los ADC.



Modo de acción de Pluvicto.

lo que se prevé que la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) lo haga en poco tiempo. Según Novartis, empresa farmacéutica que tiene actualmente la patente de este fármaco, el 80 % de pacientes con cáncer de próstata avanzado podrán beneficiarse del tratamiento con Pluvicto, su nombre comercial.

Hasta su aprobación, en algunos casos de pacientes donde otros tratamientos han fallado, el PSMA-¹⁷⁷Lu puede ser aplicado fuera de un ensayo clínico mediante lo que se conoce como vía del uso compasivo, que ha de ser autorizado por la AEMPS. Para ello el protocolo obliga a realizar antes una prueba de radiodiagnóstico denominada PET-Colina, que es la que actualmente está aprobada para cáncer de próstata recurrente. “Se ha demostrado que su eficacia de diagnóstico es muy

inferior al de PET-PSMA, por lo que estamos duplicando el gasto y perdiendo un tiempo valioso para el paciente cuando podríamos hacer directamente un PET-PSMA. Estamos buscando que se agilice este procedimiento”, declara Adolfo Gómez.

Futuro de la teragnosis

Además de las moléculas ya aprobadas, se están llevando a cabo diferentes ensayos clínicos para probar la eficacia de nuevas moléculas en el tratamiento de otros tipos de tumores. “En nuestro hospital participamos en ensayos para tratamiento de cáncer de mama, de pulmón, de esófago, de páncreas y de neuroblastoma”, explica José L. Vercher. Por su parte, Adolfo Gómez asegura que “de aquí a 5 años puede que se aprueben moléculas para otros tipos de cáncer muy prevalentes”, lo que vaticina que

la teragnosis se convierta en un tratamiento de rutina en los hospitales españoles. Novartis es ahora la empresa que lidera la producción de este tipo de radiofármacos, tras la compra de la empresa radiofarmacéutica francesa AAA, aunque existen algunas otras compañías farmacéuticas que también han apostado por esta técnica y están desarrollando nuevas moléculas. No obstante, la obtención de radiofármacos es compleja y costosa, por la necesidad de instalaciones específicas como reactores o ciclotrones y la manipulación y procesamiento de sustancias radiactivas siguiendo las garantías necesarias de seguridad.

Los investigadores trabajan también en la búsqueda de nuevas moléculas diana para otros tipos de tumores, tanto para su uso en diagnóstico como para el tratamiento. Atanasio Pandiella es inves-

Mejorando el diagnóstico

La teragnosis es un ejemplo de medicina de precisión. La especificidad de la unión diana-radioligando permite identificar de forma muy precisa la localización de las células tumorales, mejorando considerablemente la capacidad de diagnóstico de los profesionales. La teragnosis se beneficia, además, de la evolución de las técnicas de imagen por PET, que en los últimos años se combinan también con otras técnicas como

la Tomografía Axial Computarizada o TAC o con la resonancia magnética, ofreciendo aún mejores resultados.

Varios días después de la aplicación de la dosis, el ¹⁷⁷Lu emite una baja emisión gamma que puede ser utilizada para realizar una gammagrafía y ver dónde se ha localizado el tratamiento y, por tanto, un manejo mucho más personalizado de cada caso.



María José García Velloso.

investigador en el Centro de Investigación del Cáncer (CIC) en Salamanca y trabaja principalmente en cáncer de mama, concretamente en los tipos HER2 y triple negativo. Los tumores HER2 se caracterizan por sobreexpresar en gran cantidad la proteína de membrana HER2, contra la que se han desarrollado anticuerpos específicos en lo que se conoce como inmunoterapia. Esta estrategia ha evolucionado enormemente en los últimos años permitiendo, por ejemplo, reducir la mortalidad de este tipo de cáncer. No obstante, existe un porcentaje de pacientes que no responden a estos anticuerpos por lo que los investigadores tratan de encontrar otros blancos contra los que dirigir nuevos fármacos. “A estos anticuerpos se les unen también fármacos citotóxicos que acaban con la célula tumoral, los llamados *Antibody Drug Conjugates* o ADCs, que son utilizados cuando el anticuerpo solo ya no funciona”, explica el investigador. Y actualmente existen alternativas de anticuerpos a los

que se les une también un radioisótopo, en lo que se conoce como radioinmunoterapia.

Además de los avances en su desarrollo, los sistemas sanitarios de los países tienen que apostar por la teragnosis. En la mayoría de países europeos el tratamiento de tumores neuroendocrinos está ya establecido en sus hospitales y el de cáncer de próstata está en camino. Pero existen muchos países en los que esta posibilidad no está tan cercana. La fundación Oncidium, una organización sin ánimo de lucro con sede en Bélgica, trata de hacer este tipo de terapia más accesible a los pacientes. “Entre nuestros objetivos está el informar a la población sobre la existencia de esta terapia y de su funcionamiento”, explica Re-

becca Lo Bue, directora general de la fundación. “También desarrollamos proyectos para hacer llegar equipos de imagen y diagnóstico a países en vías de desarrollo”, añade. En su web se puede encontrar información actualizada sobre los ensayos clínicos en curso, las moléculas que se están probando y contra qué tipo de patologías se testan, así como de los hospitales que participan en estos ensayos. La fundación también pone en contacto a profesionales de medicina nuclear de todo el mundo y cuenta con expertos en teragnosis que actúan como embajadores en diferentes países e incluso han ayudado a algunos pacientes de cáncer avanzado a ser tratados con esta terapia.

Unidades de teragnosis

Otra de las partes positivas de esta técnica es que no necesita una infraestructura excesivamente costosa. Las cámaras PET, que sí tienen un precio muy elevado, están presentes ya en un gran nú-

Sin efectos secundarios adversos

La gran especificidad de este tratamiento, que podría denominarse radioterapia celular, tiene otra ventaja para el paciente y es la escasa aparición de efectos secundarios. “La radiación se deposita en la propia célula tumoral. Los radioisótopos utilizados tienen un alcance de pocos milímetros, por lo que la radiación no sale prácticamente de la célula tumoral”, indica José Luis Carreras. Esto hace que los tejidos circundantes no se vean afectados, en comparación con otros tratamientos radioterápicos. En el caso de tumores neuroendocrinos, a los pacientes se les tiene que administrar una dosis de aminoácidos que evitan que el isótopo permanezca en el riñón y que pueda ser eliminado a través de la orina. Estos aminoácidos son los que pueden producir algunos efectos secundarios, como vómitos. ▶



Rebecca Lo Bue.

mero de hospitales que, además, en muchos casos las han ido renovando en los últimos años. “Hemos colaborado con el Ministerio en el Plan de Inversiones de Equipos de Alta Tecnología (INVE-AT) para la renovación de equipos de imagen en los hospitales y en otros tipos de infraestructuras”, explica María José García Velloso, presidenta de la Sociedad Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular (SEMNUM), que incide en la relevancia de este plan para el avance de este tipo de terapia. “En Bellvitge contamos con dos cámaras PET-TAC y una PET-RM recientemente renovados”, argumenta el doctor Vercher.



José Luis Vercher.

Los tratamientos de teragnosis no requieren tampoco unas medidas de protección radiológica complejas, aunque sí se requiere la recogida de excretas de los pacientes tratados, ya que los restos de las radiomoléculas se expulsan a través de la orina. En Europa, los hospitales están utilizando las habitaciones que hasta ahora se venían usando para el tratamiento del cáncer de tiroides

con yodo, compartiendo espacio con estos pacientes, aunque en el caso de la teragnosis no sea necesario tanto nivel de protección. Actualmente, solo con el tratamiento de pacientes con tumores neuroendocrinos y con los que participan en ensayos clínicos, los espacios disponibles resultan insuficientes. “Nuestras salas están ocupadas al 100 % de lunes a viernes. Nos hemos ido adaptando como hemos podido porque estamos aún limitados hasta que se inauguren las nuevas instalaciones”, cuenta Adolfo Gómez.

La aprobación del PSMA-¹⁷⁷Lu supondrá un aumento considerable del número de pacientes y, por tanto, una necesidad de zonas específicas en los hospitales, así como de protocolos y guías de actuación, por lo que ya se está trabajando en una planificación estratégica de los recursos necesarios. Tanto el CSN como los servicios de protección radiológica, radiofísicos y médicos nucleares de los hospitales están intentando establecer documentos de consenso. “En marzo de 2020 la SEMNUM colaboró con profesionales sanitarios, investigadores, asociaciones de pacientes, así como gestores sanitarios en la elaboración del documento Terapias dirigidas con Radioligandos (RLT) en Oncología”, señala García Velloso. En él se dan recomendaciones sobre políticas públicas en torno a esta temática y pretende facilitar la planificación sanitaria de las necesidades en teragnosis.

Actualmente no existe aún un protocolo de actuación unificado, ya que hasta el momento cada hospital tiene unas determinadas infraestructuras que pueden limitar esa homogeneización. “En la Comunidad de Madrid se están

estudiando las necesidades para el futuro”, declara José L. Carreras, que también es emérito asistencial de la Comunidad de Madrid y asesora precisamente sobre esta técnica a la Consejería de Sanidad. Algunos hospitales, como el 12 de Octubre en Madrid o Bellvitge en Barcelona, ya han establecido planes para la creación de las llamadas Unidades de Teragnosis, basándose en la idea de hospitales de día iniciada por los hospitales australianos, pioneros en estos tratamientos. Estas unidades cuentan con salas comunes compartidas por varios pacientes, separados a través de biombo, en los que se administra la dosis por vía intravenosa en unos 20 minutos. Esta dosis es especificada por los radiofísicos y es personalizada para cada paciente. En estas salas han de permanecer unas horas para recoger las siguientes excretas que tendrán una dosis alta de radiactividad y que son procesadas para su posterior eliminación. Actualmente existen ya sistemas que permiten diluir estas dosis para poder eliminar después los residuos.

Los expertos coinciden en que, con el aumento de pacientes a tratar, existirá también una necesidad de personal formado en este tipo de manipulaciones, tanto entre los propios médicos como en otras disciplinas como la enfermería o los auxiliares. La SEMNUM ya realiza una significativa labor informativa sobre esta terapia, ofrece cursos de formación especializada para profesionales y organiza reuniones científicas para la actualización de información, con los nuevos datos sobre investigación y ensayos clínicos que van saliendo a la luz. Y como en muchas otras áreas de la medicina, es imprescindible asimismo que exista una estrecha relación entre los diferentes servicios implicados en el seguimiento del paciente, desde oncología y medicina nuclear a los radiofísicos del hospital. ©



El imperio del algoritmo

El impacto del uso de algoritmos en la vida de las personas ha aumentado en los últimos años: desde la concesión de un crédito a la selección de personal, desde las recomendaciones que nos aparecen en Internet a los procesos de producción

industrial. La inteligencia artificial también tiene mucho que ver con esto y una parte de la población se pregunta si nos estamos dirigiendo de forma inexorable hacia una dictadura de los algoritmos.

■ Texto: **Patricia Ruiz Guevara** ■

Comienza una visita guiada en el Espacio Fundación Telefónica de Madrid. Personas de todas las edades y bagajes están a punto de ver la exposición “Código y algoritmos. Sentido en un mundo calculado”, y el guía empieza formulando la pregunta: ¿qué es un algoritmo? Y hay respuestas variadas: “matemáticas”, “lógica”, “informática”, “un programa”, “una receta”. Todos tienen

parte de razón. Según la Real Academia Española, un algoritmo es “un conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema”. Efectivamente, en cierto modo es una receta, pues agrupa una serie de instrucciones y pasos para hacer algo.

“Preparar el desayuno, ir al trabajo, hacer la compra o planificar un viaje son acciones que siguen un algoritmo. Las

aplicaciones y programas del ordenador son implementaciones de algoritmos y tienen más influencia en nuestras vidas desde que muchos dispositivos de nuestra actividad diaria se convirtieron en ordenadores, desde el móvil hasta el televisor, pasando por relojes o incluso la aspiradora”, explica Coral Calero, catedrática de Lenguajes y Sistemas Informáticos en la Universidad de Castilla-La Mancha.

Algoritmos verdes

Si cada vez hay más algoritmos, más dispositivos conectados y más datos generados, se puede deducir que la demanda energética cada vez es mayor. Los centros de datos juegan ahí un papel fundamental en el uso y desarrollo de las soluciones software y los algoritmos de inteligencia artificial.

El impacto medioambiental de los sistemas algorítmicos es algo crucial a medida que avanza la tecnología. “Hoy en día las TIC (tecnologías de la información y las comunicaciones), suponen más emisiones de dióxido de carbono que la aviación, y se estima que en 2030 serán responsables del 20 % del consumo global de energía”, indica Coral Calero, de la Universidad de Castilla-La Mancha y también directora del área de Algoritmos Verdes de OdiselA (observatorio de impacto social y ético de la IA).

¿Podrían diseñarse algoritmos sostenibles para paliar

su parte del impacto? Según Calero, “para hacer sostenibles los algoritmos es necesario desarrollarlos teniendo en cuenta su eficiencia energética y estando dispuesto a sacrificar algo a cambio, por ejemplo, el nivel de precisión de un algoritmo o la velocidad de respuesta”. La experta señala que hacer un algoritmo verde no es disminuir su consumo lo máximo posible, sino reducirlo sin que los resultados esperados se vean afectados de una manera exagerada, para conseguir un equilibrio.

La sostenibilidad es un tema cada vez más presente en las empresas, organizaciones y en la sociedad. Calero cree que hay “indicios de que las cosas empiezan a cambiar, pero aún tienen que alcanzar el nivel de madurez suficiente para que las acciones sean efectivas y se incorporen de manera habitual a los procesos de desarrollo de los algoritmos”. Por ejemplo, en el caso de los centros de datos, la experta señala que cada vez más a menudo se abastecen de energías alternativas. ▀

Pero la palabra algoritmo no se escucha tanto últimamente, la que más suena es otra que lleva meses acaparando titulares: la inteligencia artificial (IA). Durante el recorrido de la exposición, los asistentes se dieron cuenta de que la IA ya permea en capas de su vida de las que no eran ni conscientes. También se darán cuenta los lectores de este reportaje. Esto genera oportunidades, pero también retos y temores.

Por el principio: ¿qué relación hay entre algoritmos e IA? Los algoritmos son las instrucciones informáticas que sigue la inteligencia artificial; es decir, detrás de toda IA, hay un sistema algorítmico. “El término inteligencia artificial se refiere técnicamente a un modelo creado para resolver un problema específico o prestar un servicio concreto. Para crear estos modelos se necesitan dos piezas fundamentales: algoritmos de aprendizaje y datos con los que entrenarlos”, resume Celeste Campo, profesora titular del Departamento de Ingeniería Telemática de la Universidad Carlos III (UC3M) y colaboradora en The Conversation, donde escribe sobre estos temas.

Ricardo Peña, catedrático de Informática en la Universidad Complutense de Madrid (UCM), explica que hay que diferenciar entre los algoritmos clásicos, “los que calculan la nómina de un trabajador o deciden la ruta óptima en el navegador de nuestro coche y que, ante unos mismos datos de entrada, producen siempre la misma salida y esta es siempre correcta” y los sistemas de inteligencia artificial, “entrenados mediante una ingente cantidad de datos y que, ante una entrada desconocida, reaccionan en base a dicho entrenamiento previo”. Estos pueden producir



Marco Gómez.

respuestas incorrectas y no siempre las mismas ante entradas muy similares.

Algoritmos cotidianos

Hay algoritmos y sistemas de IA por todas partes: en los sistemas de recomendación que nos aconsejan qué ver, qué leer, qué comprar o qué amigos seguir en las redes sociales, y también en la “detección del correo basura”, ejemplifica Celeste Campo. Los hay en las “recomendaciones de personas en aplicaciones de citas, según las preferencias que hemos mostrado en selecciones anteriores, y en chats inteligentes que atienden los casos más comunes de incidencias con clientes”, añade Marco Gómez, director de Career Support en 4Geeks Academy. Sin olvidar los algoritmos en candidaturas a ofertas laborales, despidos, concesiones de créditos bancarios, hipotecas o cualquier proceso de selección que se nos ocurra.

“Llevamos décadas conviviendo con algoritmos, solo que eran residuales”, indica Gómez. ¿Qué ha hecho que ahora los algoritmos de inteligencia artificial impacten tanto en la sociedad? Según Campo, “que ahora tenemos datos sufi-

cientes que nos permiten entrenarlos y capacidad de cómputo suficiente para realizar tanto el entrenamiento del modelo como su ejecución”. Y esto no ha hecho más que empezar, dice Gómez: “A medida que la sociedad se digitaliza, evidentemente encontraremos más y más sistemas automatizados y algoritmos a nuestro alrededor”.

Además de en nuestro día a día como ciudadanos, los algoritmos se utilizan en numerosos procesos industriales. José



Coral Calero.

Aguilar, investigador sénior en IMDEA Networks, resalta que la diferencia es que “con la IA se puede incluir la capacidad de autonomía, que permite la auto configuración, la auto reparación, la auto optimización y la auto regulación”. Esto se puede aplicar por ejemplo “para vigilar el tráfico, en la gestión de accidentes, en los sistemas de gestión energética para predecir la demanda y para monitorear centrales nucleares”, resume Aguilar. En concreto, Rafael López, responsable de Arquitectura de Soluciones EMEA/LATAM de Perception Point, señala que “en el sector nuclear pueden ser importantes para anticiparse a posibles incidentes en las centrales”.

Si hablamos de ciberseguridad, López indica que “existen varios estudios de predicción de ciberataques en sistemas industriales SCADA a través de la implementación del filtro Kalman, y esto logra procedimientos que reducen el riesgo y la exposición en los incidentes”. Campo, de la UC3M, añade que la IA permite detectar tráfico anómalo en la red que podría ser maligno y así evitar ataques.

Ricardo Peña añade que “las cadenas de montaje de una empresa de fabricación de automóviles, o de cualquier otro producto complejo, están totalmente controladas por ordenadores y la mayoría de los trabajos los realizan robots automatizados”.

También “la logística del transporte de pasajeros o de mercancías en empresas como Renfe, Iberia o Repsol se calcula mediante algoritmos deterministas de optimización de costes”.

En flujos de trabajo, “los algoritmos controlan cómo se estructuran las tareas, cómo se realizan, cuál es su orden correlativo, cómo se sincronizan y cómo fluye la información que soporta dichas tareas”, detalla Peña.

ran las tareas, cómo se realizan, cuál es su orden correlativo, cómo se sincronizan y cómo fluye la información que soporta dichas tareas”, detalla Peña.

Sesgos y desinformación

Como vemos, el uso de algoritmos y de sistemas de IA es muy útil, pero también puede tener una parte mucho menos luminosa. En los sistemas algorítmicos puede haber sesgos que discriminan y nos afectan directamente. Los ejemplos que ya se han dado son muchos: algoritmos que predicen el riesgo de que una persona vuelva a cometer un delito y que sospechan más de población negra, que también sufre discriminación con los sistemas de reconocimiento facial; o el algoritmo de

contratación de Amazon que dejaba fuera a las mujeres, igual que suelen hacer los sistemas de IA que conceden préstamos bancarios. También tiene un papel potente la desinformación y los filtros burbuja que los algoritmos nos pueden generar: si son ellos quienes deciden qué vemos en una red social o qué nos sugiere un comercio electrónico o una plataforma, nos quedamos restringidos a esa parte de la realidad.

Por eso, Marco Gómez, de 4Geeks Academy, cree que “hay un deber ético en quienes los desarrollan y un deber moral de la sociedad en garantizar que esos algoritmos no vayan en detrimento de nuestra humanidad ni atenten en contra de la propia sociedad”. Los algoritmos deberían contener “la más amplia diversidad de casos, para que eviten sesgos por infrarrepresentación o sobrerrepresentación y no condicionen unas respuestas sobre otras”.

Al final, un sistema de IA no deja de ser un algoritmo entrenado con datos. Si los datos tienen sesgos, habrá que tener cuidado con que el sistema no los adquiera. Además, detrás de todo desarrollo de un algoritmo hay una persona y, como Gómez

recuerda, “la propia sociedad tiene sus sesgos implícitos y eso también hay que evitarlo si queremos algoritmos justos y balanceados”.

El escenario es complejo y quedan frentes abiertos, pero ante tal despliegue algorítmico hay muchas personas preocupadas: ¿governamos nosotros a los algoritmos, o es al revés? ¿Se dirige nuestra sociedad hacia una 'dictadura de los algoritmos'? Para responder a esta pregunta,



Celeste Campo.

España acoge el Centro Europeo para la Transparencia Algorítmica

Para paliar los posibles efectos negativos de los algoritmos, e incluso adelantarse a ellos, es necesario, entre otras cosas, que estos algoritmos sean transparentes. Es decir, que los factores según los cuales toman unas decisiones y otras, el peso que tienen las variables, sean visibles o transparentes. De esta manera, se pueden analizar, revisar y regular.

Pero los algoritmos no siempre son transparentes; de hecho, casi nunca lo son. A menudo son privados y las empresas no los hacen públicos. Incluso en esos casos, se puede llevar a cabo un proceso conocido como auditoría algorítmica, una forma de evaluar cómo funcionan los algoritmos, de qué datos se nutren y qué impacto y riesgos generan.

En este sentido, en abril de 2023 se ha inaugurado en España el nuevo Centro Europeo para la Transparencia Algorítmica (ECAT, por sus siglas en inglés), que tiene el objetivo de “crear un entorno en línea más seguro, previsible y fiable para las personas y las empresas” para cumplir con la Ley de Servicios Digitales (DSA, por sus siglas en inglés). Como explicaron durante la presentación del centro en Sevilla, la idea detrás del ECAT es “abrir las cajas negras de los algoritmos”, analizar sus riesgos y supervisar a las plataformas digitales. Para lograrlo, el ECAT proporcionará asistencia técnica, orientación práctica y acompañamiento para intentar garantizar que los sistemas algorítmicos son transparentes, fiables y seguros.



Sara Degli-Esposti, investigadora científica en Ética e Inteligencia Artificial del Instituto de Filosofía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), menciona al transhumanismo: “Esta teoría que proclama que la IA representa un riesgo existencial para la humanidad es, como toda narrativa de ciencia ficción, tan bonita como totalmente infundada”. Pero subraya que esto “no significa que estos desarrollos tecnológicos no sean problemáticos, sino que sus riesgos no se pueden entender sin pensar en las personas detrás de ese desarrollo”.

Degli-Esposti indica que se está trabajando en cómo la inteligencia artificial puede desarrollarse respetando los valores y las normas sociales: “Intentamos entender cómo cambiar el diseño de las aplicaciones para que se adapten y respeten nuestras posturas morales”.

Mientras esto se consigue, José Luis

Serrano, profesor titular de Tecnología Educativa de la Universidad de Murcia (UMU), cree que “sería importante parar un poquito la avalancha que tenemos actualmente de información, o al menos dejar de pensar que estamos en una película de Hollywood; los avances impresionan, pero el mundo no va a cambiar



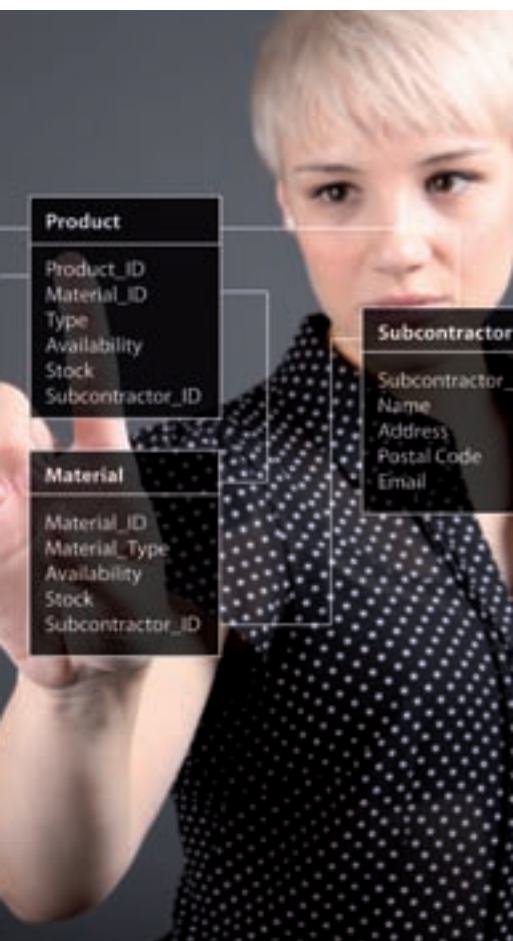
Sara Degli-Esposti.

tan rápido como parece”. Degli-Esposti también llama al sentido común: “Cuando hablamos de los riesgos y de los beneficios de la IA tenemos que desconfiar tanto de los que intentan asustarnos como de los que intentan entusiasmarnos”.

Desde un punto de vista más práctico, también hay cosas que podemos hacer para evitar que los algoritmos gobiernen nuestras vidas. Una es básica: ser conscientes de que existen. “El peligro no es navegar por internet y recibir recomendaciones, el peligro es que una persona no sea consciente de que el algoritmo está decidiendo por ella. Ojo, las recomendaciones no tienen por qué ser malas, pero la persona debe poder decidir”, afirma Serrano.

Una actitud crítica

Entonces, ¿qué actitud podemos tener ahora que somos conscientes de que los



humanos y cuál por una inteligencia artificial o robótica. Igual que los artículos en prensa van firmados, tendrá que firmar una IA para saber quién se responsabiliza de esa información”, indica De Querol. Sin embargo, el periodista recuerda que, aunque puede que se deleguen ciertas labores rutinarias en los algoritmos, el periodista humano no se puede reemplazar: “Una IA no podrá abordar información un poquito compleja o que requiera de análisis, que es la información verdaderamente relevante”.

Precisamente, la mayor preocupación que solemos tener respecto a la IA es que nos quite el empleo, pero Serrano considera que esto no tiene mucho fundamento “porque igual que se destruyen empleos, se crean nuevos trabajos”. En este sentido, subraya que lo que sí es muy probable es que los trabajos vayan cambiando: “Es muy complicado saber por dónde van a ir las profesiones del futuro.

algoritmos y la IA impactan en nuestra vida? ¿Hay razones para tenerles miedo? Para empezar, Degli-Esposti incide en “la necesidad de fomentar el pensamiento crítico a la hora de usar cualquier tipo de sistema de IA”. Ricardo de Querol, subdirector de El País y autor del libro *La gran fragmentación*, coincide en que hay que “animar un debate social en profundidad sin catastrofismos ni tecnoutopías, sino con escepticismo y espíritu crítico”. Algo muy presente en el periodismo, donde nos enfrentamos al riesgo de la desinformación y de los contenidos generados por inteligencia artificial.

“El lector debería ser capaz de distinguir qué información ha sido hecha por



Ricardo de Querol.

Yo tendría miedo como trabajador si no me gusta cambiar, si no me gusta aprender, si me preocupa mucho la incertidumbre y no veo esto como una oportunidad”.

En cualquier caso, hay cosas que la inteligencia artificial de momento no puede imitar, como nuestra creatividad. Como señala Ricardo de Querol en su libro, “es la naturaleza caótica de nuestra mente, que se despista, se



José Aguilar.



Rafael López.

equivoca y olvida, la que produce alguna genialidad”. Por esto y por otras muchas limitaciones, la IA está muy lejos de ser perfecta, señala De Querol, que atisba como problema que le demos demasiada “credibilidad” a lo que nos diga un algoritmo o una IA, y que los consideremos “superiores”. Como concluye Celeste Campo, “en nuestra mano está hacer que se empleen para mejorar nuestro futuro”.





Pruebas nucleares atmosféricas (1945-1980) y diseminación de radiactividad artificial en el medioambiente

La Segunda Guerra Mundial finalizó prácticamente con el lanzamiento de dos bombas nucleares a las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki. Inmediatamente después comenzó una enorme escalada en la realización de pruebas nucleares atmosféricas por las grandes potencias, cada vez de mayor energía, con la consecuente liberación de radiactividad al medio ambiente, con el fin de liderar la denominada carrera armamentística nuclear. El número de pruebas y la energía liberada en ellas llegó a ser tan elevado que las principales potencias mundiales acordaron

en 1962 una moratoria que impidiera este tipo de pruebas. Estados Unidos, la antigua Unión Soviética y Gran Bretaña cumplieron esa moratoria mientras que países como Francia y China siguieron realizando pruebas nucleares atmosféricas hasta los 80, aunque con una liberación de energía muy inferior a las alcanzadas a en los 50 y principios de los 60 por EE.UU. y la U.R.S.S.

■ Texto: **Rafael García-Tenorio** | Centro Nacional de Aceleradores (U. Sevilla, Junta de Andalucía, CSIC) y Departamento de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla ■

Desde 1945 hasta 1980 más de 500 pruebas nucleares atmosféricas fueron realizadas en un número limitado de localizaciones repartidas en el

planeta, cubriendo estas pruebas un rango de energía tan elevado como el que va desde decenas de kt hasta liberaciones de varias decenas de Mt.*

Cinco países realizaron estas pruebas en un total de 16 localizaciones principales. El número de pruebas en cada localización fue muy variable, así como la energía total

liberada de sus explosiones. En la Figura 1 se muestran las mencionadas localizaciones, asignando a cada una de ellas un círculo cuya superficie es proporcional a la energía liberada en las pruebas realizadas en ese punto. Atendiendo a la energía total liberada en el conjunto de pruebas nucleares atmosféricas, más del 90 % corresponde a pruebas nucleares realizadas por la Unión Soviética en Novaya Zemlya y por los Estados Unidos en las islas Marshall. En Novaya Zemlya en particular, se realizó a principios de los 60, la prueba nuclear con mayor liberación de energía de todas las realizadas, la denominada prueba Zar, con una liberación de energía de más de 50 Mt.

Cada explosión nuclear se caracteriza por producir una diseminación de radiactividad a nivel local (< 300 km), regional y/o global dependiendo su distribución entre estos tres compartimentos de factores como la altura a la que se realiza la explosión y la energía liberada en cada explosión. Se han realizado pruebas superficiales, pruebas a decenas de metros en torres, y a mucha más altura con la ayuda de globos o/y otros sistemas de vuelo.

Los Estados Unidos y la Unión Soviética realizaron numerosas pruebas nucleares con baja liberación de energía y numerosos *safety tests* (pruebas para comprobar el comportamiento de estas bombas en accidentes como incendios, caídas desde una elevada altura, etc.) con nula o pequeña liberación de energía. Estas

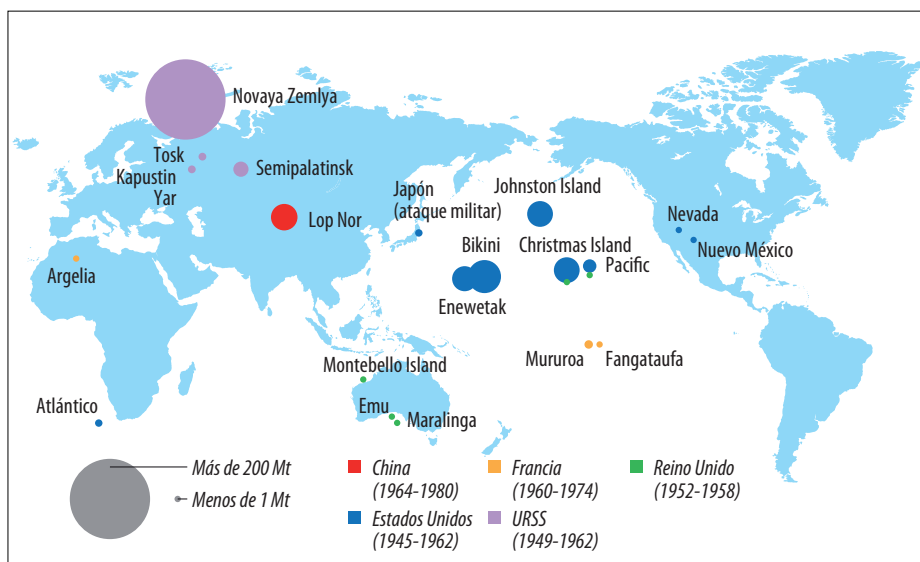


Figura 1.- Localización de las áreas donde se realizaron pruebas nucleares atmosféricas. Fuente: UNSCEAR.

pruebas las realizaron fundamentalmente en dos áreas del planeta; en Nevada (EE.UU.) y en Semipalatinsk (U.R.S.S.). En Nevada se realizaron un total de 88 pruebas nucleares atmosféricas, con una energía total liberada de un megatón. Ello produjo una contaminación radiactiva local y también, en menor medida, regional, atendiendo a las direcciones predominantes del viento. Estas pruebas fueron realizadas a poca altura y la liberación de energía en cada prueba fue tan limitada que debido a esas pruebas sólo una fracción ínfima de la contaminación radiactiva penetró en la estratosfera.

En Semipalatinsk (Kazajistán) se realizaron desde 1949 hasta 1962 un total de 116 explosiones nucleares atmosféricas, con una energía liberada total de 6.6 Mt, realizadas a baja altura o incluso sobre la superficie. De forma análoga a Nevada, en Semipalatinsk dominó la diseminación local y regional de la contaminación radiactiva generada por las explosiones, con una contaminación mínima a una contribución global, al no alcanzar la contaminación generada una altura suficiente para entrar en la estratosfera.

Estados Unidos realizó las pruebas nucleares con una mayor liberación de energía en los atolones de Bikini y Ene-

wetak (islas Marshall) en el Pacífico (hemisferio norte). Estas pruebas se realizaron desde 1946 hasta 1958 con una energía total liberada de 109 Mt, con 77 Mt en la isla de Bikini y 32 Mt en la isla Enewetak. Obviamente, la población de estas islas fue trasladada, durante los años de las pruebas, a otras islas del Pacífico. Las pruebas realizadas en estas islas produjeron una elevada contaminación local y regional (afectando al Pacífico) y contribuyeron considerablemente a la entrada de cantidades apreciables de radiactividad en la estratosfera, pues las pruebas fueron realizadas bien a suficiente altura (utilizándose torres o globos) o con una energía liberada tan elevada que los hongos radiactivos creados entraron en contacto con las capas bajas de la estratosfera.

El lugar en que los soviéticos realizaron sus pruebas nucleares con una mayor liberación de energía se corresponde con Novaya Zemlya, situada en la esquina noreste de Europa, en una zona ártica prácticamente despoblada. En esta región se realizaron pruebas nucleares atmosféricas desde 1955 hasta 1962. A ellas corresponde más de la mitad de la energía liberada en todo el planeta por pruebas nucleares. Estas explosiones se realizaron a gran altura (varios miles de metros),

* Nota: La liberación de energía en estas pruebas se mide mediante una unidad algo atípica. El método de cuantificación de la energía liberada en explosiones nucleares, se basa en la equivalente cantidad de energía liberada en la detonación de trinitrotolueno (TNT): Un ton (t) corresponde a la energía liberada en la explosión de una tonelada de TNT, utilizándose generalmente los múltiplos kilotón (kt) y megatón (Mt).

lo que implicó que la mayor parte de la contaminación radiactiva generada se acumulara en la estratosfera, mientras que la contaminación local y regional fue mínima. De hecho, en las principales ciudades del norte de Europa no se detectaron eventos de contaminación asociados a estas pruebas. A que la gran mayoría de la contaminación se acumulase en las capas bajas de la estratosfera contribuyó notablemente el hecho bien conocido de que la estratosfera se encuentra a alturas claramente inferiores en las zonas polares del planeta a las zonas ecuatoriales.

Podemos concluir pues indicando que mientras las pruebas nucleares de EE. UU. en las Islas Marshall han producido contaminación local, regional y global, las pruebas nucleares soviéticas en Novaya Zemlya han producido fundamentalmente contaminación global. Esta conclusión es muy relevante para poder explicar la distribución de la contaminación remanente en el planeta por la realización de estas pruebas nucleares atmosféricas.

La contaminación a nivel local o regional experimenta una deposición rápida (fundamentalmente gravitacional) en tiempos máximos de días o semanas, observándose claramente como esa contaminación se distribuye en la dirección de los vientos predominantes, con un gradiente descendiente con la distancia al punto de la explosión.

La deposición de la contaminación contenida en la estratosfera sigue un proceso mucho más complejo. En primer lugar, esta contaminación se homogeneiza a lo largo de todo el hemisferio, para, posteriormente, mediante intercambios parciales estratosfera-troposfera, ir incorporándose a esta última a lo largo del tiempo a un ritmo de intercambio de aire constante a una determinada latitud, pero con un intercambio máximo a latitudes medias y mínimo en el ecuador y en el polo. Es de destacar, por otra

parte, que el intercambio entre masas de aire estratosférico entre hemisferios es mínimo, por lo que si se tiene en cuenta que la mayoría de las pruebas nucleares se realizaron en el hemisferio norte (ver Figura 1), podemos concluir que:

a) La deposición global en el hemisferio norte ha sido claramente superior a la deposición total en el hemisferio sur.

b) En cada hemisferio la deposición será mayor en las latitudes medias, disminuyendo hacia latitudes extremas.

Debido a la deposición global, a una latitud determinada se obtendrán unos perfiles de contaminación en función del tiempo muy similares en diversos puntos, pues el intercambio estratosfera-troposfera serán muy

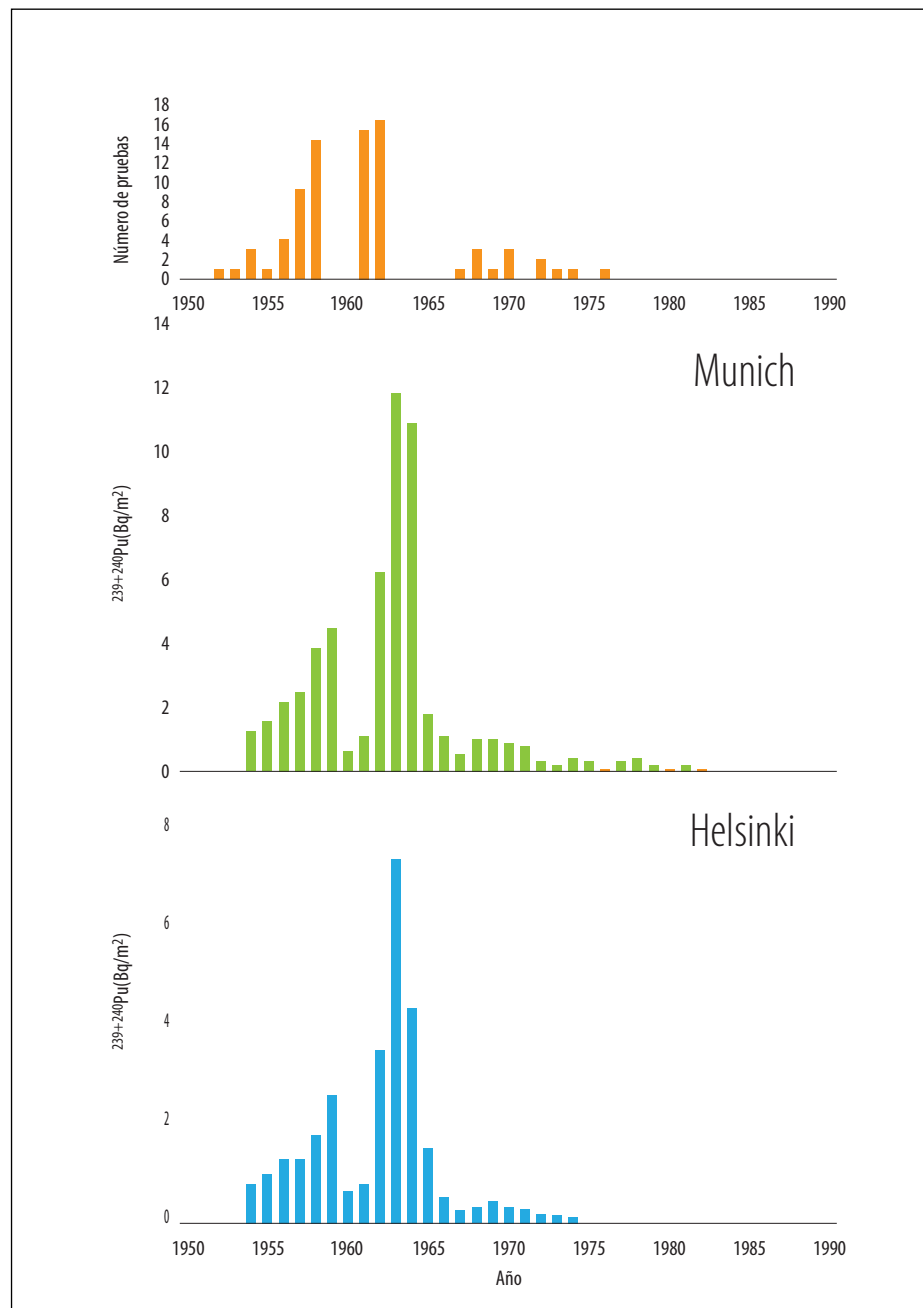


Figura 2. Perfiles temporales de concentraciones de actividad detectados en la atmósfera de Múnich y Helsinki, debido a las pruebas nucleares atmosféricas.

similares y la contaminación en la estratosfera está homogeneizada. Estos perfiles mostrarán indirectamente la evolución temporal que la contaminación radiactiva acumulada en la estratosfera ha ido experimentando desde el comienzo de las pruebas nucleares. En la Figura 2 se muestran los perfiles temporales de concentraciones de $^{239+240}\text{Pu}$ en dos ciudades del hemisferio norte situadas en latitudes no extremas y no sometidas a contaminaciones locales o regionales por pruebas nucleares en su entorno. Se observa la similitud de los perfiles al tener una fuente prácticamente idéntica (fracción que pasa anualmente desde la estratosfera a la troposfera) y como esos perfiles reflejan de una forma clara la evolución de las pruebas nucleares en el hemisferio norte, con cierto retraso por la incorporación retardada a la troposfera de la contaminación que se va acumulando en la estratosfera.

Perfiles similares a los anteriores pueden encontrarse en las zonas árticas y ecuatoriales del hemisferio norte, pero con una deposición integral inferior, y también se observan perfiles similares en el hemisferio sur, con deposiciones integradas claramente inferiores a las observadas a la misma latitud en el hemisferio norte, pues el número de pruebas nucleares y la actividad liberada total en el hemisferio sur es inferior a las del hemisferio norte y los intercambios de masas de aire entre hemisferios se encuentran muy limitados.

En la península ibérica, los perfiles de contaminación radiactiva serán similares a los obtenidos en Munich, obteniéndose perfiles de ese tipo no sólo para $^{239+240}\text{Pu}$ sino también para productos de fisión con alta producción y suficiente periodo de semidesintegración para no haber desaparecido por decaimiento desde la explosión, como el ^{137}Cs ($T_{1/2} = 32$ años) y el ^{90}Sr ($T_{1/2} = 30$ años). De hecho,

los cocientes $^{239+240}\text{Pu} / ^{137}\text{Cs}$, $^{239+240}\text{Pu} / ^{90}\text{Sr}$ y $^{90}\text{Sr} / ^{137}\text{Cs}$ poseen unos valores bien definidos, asociados a la deposición global, con independencia de la latitud, siempre que consideremos para el estudio compartimentos ambientales en los que los radionucleidos no hayan experimentado posibles movimientos post-depositacionales, como migración, volatilización, etc.

Un cociente típico que caracteriza perfectamente el origen de la contaminación global integrada en un determinado compartimento es el cociente $^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$, que solo puede medirse con precisión con técnicas no radiométricas como la espectrometría de masas con acelerador (AMS). El valor de ese cociente en número de átomos es de 0.18 debido simplemente a la deposición global de contaminación radiactiva procedente de la estratosfera, mientras que en zonas afectadas además por contaminación local

ese cociente será en general inferior a 0.18, pues esas contaminaciones aportan una cantidad de contaminación con un cociente $^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ claramente inferior.

La explicación de este último hecho es muy sencilla: el plutonio utilizado en las bombas nucleares originalmente presenta unos cocientes $^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ muy bajos, denominándose de hecho ese plutonio como plutonio bomba, en el que se debe minimizar la presencia de ^{240}Pu , pues éste tiene la tendencia a captar neutrones durante la explosión nuclear y disminuir la efectividad de la reacción en cadena.

Una vez producida la explosión nuclear, la contaminación que forma parte de la deposición local o regional habrá experimentado generalmente una participación muy limitada en la reacción en cadena y estará caracterizada por un cociente $^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ que experimenta muy pocas variaciones con respecto al



Figura 3: Partículas calientes formadas en Nuevo México (experimento Trinity, arriba) y en Semipalatinsk por la interacción de la explosión con los suelos de la zona.

Bombas Nucleares

Existen tres tipos fundamentales de bombas nucleares que a lo largo de la historia han sido utilizadas en pruebas nucleares atmosféricas:

Bombas de uranio. En este caso, en el interior de la bomba a una masa de uranio denominada sub-crítica se añade una cantidad adicional de dicho elemento con el fin de alcanzar una masa crítica que genere el comienzo de la fisión. Al mismo tiempo se le añaden otros elementos a la bomba con el objetivo de incrementar la generación de neutrones libres que puedan acelerar la reacción en cadena.

Bombas de plutonio. En este caso, la masa de plutonio, que es fisiónable, se rodea de explosivos plásticos que en su explosión comprimen el plutonio aumentando grandemente la densidad del material, lo que provoca instantáneamente la reacción en cadena.

Bombas termonucleares. Se fundamenta en la energía desprendida por la fusión de núcleos de deuterio ($2H$) y núcleos de tritio ($3H$) para dar núcleos de helio y neutrones de alta energía. Para generar la fusión es necesario un gran aporte de energía, que se genera mediante una bomba atómica de fisión acoplada.

Las bombas llamadas termonucleares o bombas de hidrógeno no son bombas de fusión puras, sino bombas de

fisión/fusión/fisión. La detonación del artefacto primario de fisión produce la reacción de fusión, que a su vez genera neutrones de alta velocidad que producen la fisión (^{238}U , ^{239}Pu) del secundario.

Las bombas de uranio y plutonio producen una liberación de energía claramente inferior a las bombas termonucleares. La bomba simplemente de fisión más poderosa, denominada Ivy King, fue probada a 170 m de altura el año 1952 por EE.UU. en el atolón Enewetak (Islas Marshall), y liberó un total de 500 kt. La bomba termonuclear más potente, denominada Zar, fue lanzada a 4000 m de altura el 30 de octubre de 1961 en Novaya Zemlya, con una liberación total de energía de 50 Mt.

En la Tabla 1 se recopilan algunos de los eventos más significativos relativos a las pruebas nucleares realizadas por las grandes potencias: EE.UU., Rusia (U.R.S.S.), Gran Bretaña, China y Francia.

Es de destacar finalmente que India y Pakistán realizaron su primera prueba nuclear subterránea en 1974, que Corea del Norte ha realizado pruebas nucleares a lo largo del siglo XXI (2006 y 2017) y que existen evidencias, aunque no certezas, de que Israel y Sudáfrica conjuntamente realizaron su primer test nuclear acuático en el Océano Índico al sur de Sudáfrica.

plutonio bomba, mientras que en la contaminación radiactiva global, parte del ^{239}Pu experimenta su activación neutrónica a ^{240}Pu hasta incrementar los valores del cociente $^{240}Pu/^{239}Pu$ a 0.18.

Medidas realizadas en suelos de la provincia de Sevilla muestran unos cocientes atómicos $^{240}Pu/^{239}Pu = 0.18$, reflejando que la única fuente de contaminación de Pu en esos suelos es la deposición global estratosférica, mientras que en suelos colectados en zonas donde se realizaron un gran número de pruebas nucleares como Nevada y Semipalatinsk, el valor de ese cociente en suelos es claramente inferior a 0.05.

En las zonas afectadas por contaminación radiactiva local, en las zonas donde se realizaron numerosas pruebas atmosféricas a baja altura o superficiales, y generalmente con una liberación mo-

derada o baja de energía, se observa otro fenómeno. Gran parte de la contaminación radiactiva local se encuentra en forma de agregados o partículas formadas por la fusión del suelo en su contacto con la onda expansiva de la bomba nuclear, y su posterior solidificación. En la Figura 3 mostramos típicos conglomerados colectados en Nuevo México (EE. UU.) y en Semipalatinsk (U.R.S.S.), que contienen en la actualidad productos de fisión de alto periodo de semidesintegración como ^{137}Cs y ^{90}Sr e isótopos de Pu (cocientes atómicos $^{240}Pu/^{239}Pu < 0.04$). Estas partículas, conocidas coloquialmente como partículas calientes, forman parte de los archivos del grupo de Física Nuclear Aplicada de la Universidad de Sevilla, al que pertenece el firmante de este artículo.

Es interesante también destacar que

las partículas calientes formadas en zonas donde se realizaron pruebas nucleares presentan la particularidad de ser unas partículas muy refractarias, con una capacidad mínima de los radionucleidos contenidos en ellas a migrar o transportarse entre diversos compartimentos del medio ambiente. En esas zonas, donde la contaminación local domina y ésta se encuentra en forma de partículas o agregados, los modelos radioecológicos convencionales de transferencia de radionucleidos entre diversos compartimentos de un sistema no serán aplicables, al estar basados en coeficientes de transferencia determinados con precisión en zonas afectadas por deposición global, donde esos radionucleidos se han incorporado generalmente en forma de aerosoles. Las zonas del planeta afectadas fundamentalmente por contaminación local gene-

Tabla 1.

	Nombre del test	Año del test	Energía liberada	Lugar del test
Estados Unidos				
Primera bomba atómica	Trinity	1945	17 kt	Nuevo México
Primera bomba termonuclear	Ivy Mike	1952	10 Mt	Islas Marshall
Union Soviética				
Primera bomba atómica	RDS - 1	1949	22 kt	Semipalatinsk
Primera bomba termonuclear	RDS-6s	1953	400 kt	Semipalatinsk
Bomba termonuclear más potente	Zar	1961	50 Mt	Novaya Zelmya
Gran Bretaña				
Primera bomba atómica	Hurricane	1952	22 kt	Montebello (Australia)
Primera bomba termonuclear	Grapple	1967	1.8 Mt	Islas Christmas
Francia				
Primera bomba atómica	Gerboise Blue	1960	65 kt	Argelia
Primera bomba termonuclear	Canopus	1968	2.6 Mt	Fangataufa (Polinesia Francesa)
China				
Primera bomba atómica	—	1964	22 kt	Lop Nor
Primera bomba termonuclear	—	1967	3.3 Mt	Lop Nor

rada por pruebas nucleares atmosféricas se caracterizan por un coeficiente de transferencia suelo-agua y suelo-planta prácticamente nulos.

En las zonas de contaminación local, la distribución de radiactividad puede ser adicionalmente bastante inhomogénea de un punto a otro, al depender fundamentalmente del número discreto de partículas depositadas o acumuladas en cada punto. Ello, al contrario de lo que ocurre en zonas afectadas exclusivamente por contaminación global, dificulta enormemente hacer un inventario de la contaminación remanente en la zona bajo estudio.

Con la mentalidad actual, es difícilmente entendible por la opinión pública, expertos e incluso gobernantes, las condiciones de baja seguridad en que se realizaron muchas de estas pruebas nucleares, o incluso los motivos sociales y de progreso que ampararon algunas de esas pruebas. En este sentido:

- a) Se realizaron pruebas como en Torsk (U.R.S.S.) con soldados situados en trincheras muy cercanas al epicentro de una bomba nuclear de baja potencia, con protecciones limitadas

ante la radiación y forzando a los soldados posteriormente a avanzar hacia el epicentro como un ensayo de posible rápida invasión del ejército de un territorio tras el lanzamiento sobre éste de una bomba nuclear.

- b) Se realizaron pruebas con poco control, en las que la energía liberada fue mucho mayor que la esperada con el consecuente avance de una nube radiactiva mucho mayor de la prevista hacia zonas pobladas que implicaron dosis no triviales, como en el caso de

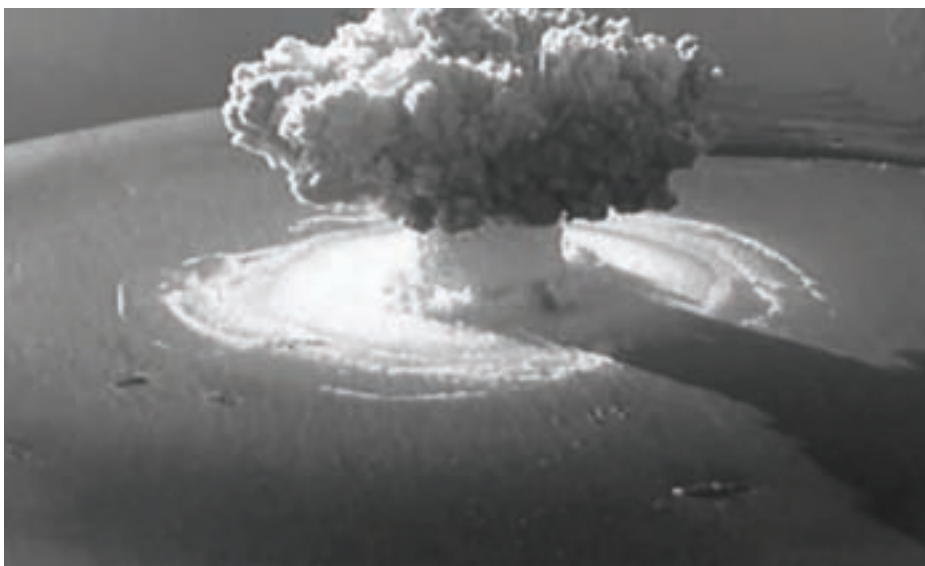
alguna prueba nuclear realizada en las Islas Marshall, donde los habitantes del atolón Rongerik recibieron inesperadas dosis por la explosión de una prueba nuclear en las islas Bikini.

- c) En varias islas del pacífico las poblaciones de algunas islas y atolones fueron desplazadas hacia otras islas para poder realizar esas pruebas nucleares (en algunos casos ese exilio forzado ha durado varios años o incluso persiste, por la contaminación radiactiva provocada).



U.S. ARMY / WIKIPEDIA

Prueba nuclear, parte de la Operación Crossroads en el atolón de Bikini el 25 de julio de 1946.



Primera bomba nuclear detonada en Novaya Zemlya, en 1955.

d) Se realizaron pruebas nucleares con finalidades puramente ingenieriles, sin tener en consideración la energía liberada y la contaminación radiactiva asociada, como ocurrió en algunas pruebas nucleares realizadas en Semipalatinsk, que tuvieron como objetivo desviar el curso de ríos o la creación de lagos artificiales.

Era tal la frivolidad y falta de conciencia dominante que pruebas nucleares atmosféricas de baja potencia, como las realizadas en Nevada (EE. UU.), fueron consideradas como un atractivo turístico en la cercana ciudad de las Vegas. Se realizaron además numerosas pruebas cuya necesidad desde el punto de vista científico era más que dudoso, utilizándose fundamentalmente como una prueba de poder en plena guerra fría entre las grandes potencias.

Se realizaron pruebas desde cosmódromos o sitios análogos, donde la bomba nuclear se encontraba en el interior de un cohete que se hacía explotar a gran altura y a grandes distancias del punto del lanzamiento. Esas pruebas las realizaron los soviéticos desde el cosmódromo Kasputin Yar, situado en los Urales, realizándose la mayoría de las explosiones en la altura de Kazajistán, mientras que

ejército de EE. UU. realizó varias pruebas de este tipo en el Atlántico Sur en la denominada operación Argus.

Las dos grandes potencias no fueron los únicos países que realizaron pruebas nucleares atmosféricas a lo largo del siglo XX. Simultáneamente, Gran Bretaña realizó todas sus pruebas nucleares con anterioridad a la moratoria firmada en 1962, mientras que Francia y China no fueron signatarios de la moratoria y realizaron sus pruebas nucleares entre los años 1960 y 1980.

Gran Bretaña realizó la mayoría de sus pruebas nucleares en tres localizaciones sitas en Australia: la isla Montebello y los desiertos de Emu y Maralinga. Estas explosiones causaron en todos los casos una liberación de energía muy pequeña (varios kt) por prueba, aunque las emisiones radiactivas generadas afectaron a sistemas coralíferos únicos en las costas de Montebello. Adicionalmente, en el desierto de Maralinga se realizaron pruebas de seguridad que no implicaron la liberación de energía, pero si la liberación del contenido de las bombas fundamentalmente en forma de partículas calientes. También se realizaron pruebas nucleares atmosféricas en la isla Christmas, donde Gran

Bretaña explosionó su primera bomba termonuclear.

La república francesa realizó la gran mayoría de sus pruebas nucleares en el Pacífico, en las islas de Mururoa y Fangataufa, aunque también realizó un par de pruebas con una muy pequeña liberación de energía en Argelia. Por su parte, China realizó sus pruebas nucleares en el desierto de Lop Nor, con liberación baja o intermedia de energía.

Cabe resaltar que la moratoria de 1962 no significó que las grandes potencias abandonaran el programa nuclear, Solo afectó a las pruebas nucleares atmosféricas por la preocupación creciente sobre la diseminación de elementos radiactivos en el medio ambiente. Se siguieron realizando gran cantidad de pruebas nucleares, pero subterráneas, lo que solo ocasionalmente provocó la liberación a la atmósfera de cantidades mínimas de gases radiactivos.

En este siglo XXI la realización de pruebas nucleares de cualquier tipo prácticamente ha cesado, salvo casos puntuales, a la vez que el arsenal nuclear bélico disminuyó en EE. UU. y en Rusia, en una época de cierto relajamiento tras la caída del muro de Berlín y el fin de la guerra fría. Únicamente en los tiempos que corren, con la invasión de Ucrania por Rusia se vuelve a mencionar el posible uso de armamento nuclear y la escalada destructora que podría generar. Es de esperar que la cordura impere y el uso bélico de la energía nuclear se cña en la historia a las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki. ©

Vídeo de la prueba Zar realizada en 1961 por la Unión Soviética en Novaya Zelmya





Un nuevo Real Decreto actualiza las medidas de control sobre la presencia de radionucleidos en el agua potable destinada a consumo humano

Agua que has de beber

La depuración de aguas permite garantizar que el suministro que llega a los hogares está en perfectas condiciones de salubridad. Tradicionalmente el principal objetivo ha sido la eliminación de microorganismos y de contaminantes químicos, pero desde hace algunos años la preocupación se ha extendido a la posible presencia de sustancias radiactivas. En España, en general, suelen aparecer en cantidades ínfimas, y la radiación que generan se encuentra por debajo de los límites es-

tablecidos. El problema se circunscribe al suministro de pequeñas poblaciones que se surten de acuíferos subterráneos. La legislación exige una vigilancia rigurosa por parte de las empresas suministradoras y, en su caso, la aplicación de diferentes medios de descontaminación. El Real Decreto 03/2023, aprobado el pasado mes de enero, establece las condiciones exigibles de calidad del agua sobre la presencia de isótopos radiactivos.

■ Texto: **Juan Quinto** | Periodista de ciencia ■

El agua es probablemente la sustancia más necesaria para la vida. Resulta indispensable para satisfacer las demandas de hidratación de nuestro cuerpo, mantenernos saludables y para numerosas funciones cotidianas, especialmente la cocción de alimentos y la higiene personal. Pero también para la propia producción de alimentos y de todo tipo de productos. El progreso ha hecho que actualmente las sociedades desarrolladas podamos dis-

poner de ella al instante, de forma suficiente y sin riesgos para la salud. Para ello, los humanos hemos transformado en profundidad el ciclo del agua: retenemos ríos, desalamos agua del mar y sobreexplotamos los acuíferos. Y, además, la sometemos a procesos físicos y químicos para garantizar su salubridad.

Esta situación de plena disponibilidad está en peligro por los efectos del cambio climático, que auguran tiempos

de insuficientes recursos disponibles, especialmente en España y el área mediterránea en general, donde se sufren prolongadas y drásticas sequías. A este problema se añade el de la contaminación que producen las aguas residuales de poblaciones, industrias y actividades agrícolas y ganaderas, pese a la implantación de estaciones depuradoras.

Pese a todo, el agua que llega a nuestros grifos ha sufrido un proceso más o menos

Tabla 1. Valores de las concentraciones derivadas de radionucleidos.

Parámetro	Concentración derivada	Unidad
Natural		
U 238	3,0	Bq/L
U 234	2,8	Bq/L
Ra 226	0,5	Bq/L
Ra 228	0,2	Bq/L
Pb 210	0,2	Bq/L
Po 210	0,1	Bq/L
Artificial		
C 14	240	Bq/L
Sr 90	4,9	Bq/L
Pu 239	0,6	Bq/L
Pu 240	0,6	Bq/L
Am 241	0,7	Bq/L
C 60	40	Bq/L
Cs 134	7,2	Bq/L
C2 137	11	Bq/L
I 131	6,2	Bq/L

Valores calculados para una dosis de 0,1 mSv y una ingesta anual de 730 litros. Fuente: RD 03/2023.

Tabla 2. Valores paramétricos de las sustancias radiactivas.

Parámetro	Valor paramétrico	Unidad
59 Actividad alfa total	0,1	Bq/L
60 Actividad beta resto	1,0	Bq/L
61 Radón	500	Bq/L
62 Tritio	100	Bq/L
63 Dosis indicativa / Σ radionucleidos) DI	0,10	mSv

Fuente: RD 03/2023.

complejo para que ofrezca las máximas garantías de seguridad para nuestra salud. Tratamientos físico-químicos eliminan gérmenes y sustancias tóxicas del agua para potabilizarla. Entre esas sustancias a veces se encuentran radionucleidos de origen natural que ocasionalmente pueden superar los límites establecidos para considerar esas aguas como potables. La presencia de radioisótopos en el agua puede tener su origen en alguna actividad humana, pero con frecuencia es de origen natural, en función de la geología de las zonas que recorre o de donde procede, especialmente el agua extraída de los acuí-

feros subterráneos. Pero es fácil discriminar su procedencia porque los de origen natural son isótopos diferentes, generalmente, a los que se producen por los usos médicos, industriales o de generación eléctrica.

La preocupación por los efectos de los radionucleidos en el agua destinada a consumo se inició a finales del pasado siglo. En parte, no se había producido antes porque en comparación con otras sustancias químicas, los elementos radiactivos se encontraban en cantidades muy reducidas. Según Alejandro Salas, investigador del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de



Alejandro Salas.

Extremadura (LARUEX), “en Europa había preocupación, sobre todo en los países nórdicos, donde a pesar de que llueve mucho no acumulan el agua porque no tienen infraestructuras y por eso utilizan sobre todo muchas aguas subterráneas, que son las que tienen alto contenido de radionucleidos”.

Poco a poco, la preocupación se fue extendiendo por Europa. El OIEA impulsó en 1995 la creación de una red de laboratorios de medio centenar de países de todo el mundo que realizan controles de radiactividad ambiental. Con el nombre de ALMERA (Laboratorios Analíticos para la Medida de la Radiactividad Ambiental), su objetivo es proporcionar análisis confiables y disponer de una base de datos que sirvan de referencia si se produce una contaminación radiactiva por algún accidente o incidente. “Se trataba de normalizar y homogenizar nuestros métodos, tener medidas comparables y disponer de información fiable. Al principio era solo para radionucleidos artificiales, pero luego se extendió a los naturales”, dice Catalina Gascó Leonarte, que participaba en la red por parte del Ciemat.

El agua fue una de las preocupaciones emergentes de la red y el OIEA publicó diversos informes sobre los resultados aportados por los miembros durante diferentes ejercicios realizados para la homologación de criterios, en-



Instalaciones de tratamiento de agua en la Comunidad Valenciana.

sayos de aptitud, definición de capacidades técnicas e identificación de aspectos deficientes en las mediciones, como el TECDOC 1788, de 2016, sobre “Criterios sobre concentraciones de actividad de radionucleidos en alimentos y agua potable”, fruto de la colaboración del OIEA con la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y con la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La UE, por su parte, emitió la Directiva 2013/51/Euratom, sobre requisitos para la protección sanitaria de la población con respecto a las sustancias radiactivas en las aguas destinadas al consumo humano, y la Directiva (UE) 2020/2184, sobre calidad

de las aguas destinadas al consumo humano, que tiene por objeto proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de las aguas de consumo garantizando su salubridad y limpieza, y mejorar el acceso a las aguas de consumo.

Legislación

En España, la responsabilidad del control de las aguas destinadas a consumo humano es del Ministerio de Sanidad. La legislación sobre el tema es amplia y tiene como principal referencia el Decreto Ley 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecieron los criterios sanitarios de la calidad del agua de con-

GLOBAL OMNIUM

sumo humano, y que ya contemplaba el problema de la presencia de radionucleidos. La principal actualización de dicho decreto es el RD 03/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. La norma dedica un amplio espacio, incluido todo el anexo VI, a la presencia de sustancias radiactivas y las actuaciones relativas a su detección y tratamiento. Dado que las competencias en salud están transferidas, cada comunidad autónoma, además, ha asumido sus propios planes de vigilancia y control.

Con sus propios estudios y los proporcionados por las comunidades, el Ministerio de Sanidad publica anualmente el informe “Control de las aguas de consumo en España”. El más reciente disponible, el decimoséptimo, corresponde a 2021 y refleja una buena situación en los resultados de las mediciones de radiactividad. Para determinar la dosis indicativa se realizaron 4 539 controles, en los que el 99,99 % mostraban valores iguales o por debajo del de referencia, con una dosis media de 0,014 mSv/año. También se llevaron a cabo mediciones de tritio (8 866 controles), radón (5 801), actividad alfa total (13 127), actividad beta resto (9 581) y actividad beta total (6 844). Todas ellas mostraban resultados por encima del 99,7 % con valores ajustados a los límites de referencia, excepto la actividad alfa total, con un 78,24 %.

Según Alejandro Salas, “podemos decir que desde el punto de vista de la radiactividad la mayoría de las aguas de consumo en España están bien. Pero hay algunas que se deben controlar, sobre todo las procedentes de acuíferos, que normalmente abastecen a poblaciones pequeñas, porque las grandes poblaciones se abastecen de embalses y disponen de tratamientos adecuados de potabilización. El problema está en algunos de esas pequeñas poblaciones”.



El principal problema de contaminación radiactiva del agua se produce en los acuíferos subterráneos.

La red de vigilancia española

La Red de Vigilancia Radiológica Ambiental (REVIRA) es de carácter nacional y tiene la misión de medir los niveles de radiactividad en el aire, los suelos, las aguas y los alimentos básicos. Está formada por dos sistemas de recogida de datos, la Red de Estaciones Automáticas (REA) y la Red de Estaciones de Muestreo (REM). La primera está formada, como su nombre indica, por estaciones automáticas que envían de forma continua y en tiempo real diversos parámetros tomados del aire, como la tasa de dosis de radiación gamma, concentración de radón, emisores alfa y beta y las variables meteorológicas, como temperatura, presión, humedad relativa, precipitaciones y dirección y velocidad del viento. Los datos, junto con los que recogen las redes propias de las comunidades autónomas de Extremadura, Comunidad Valenciana, Cataluña y País Vasco, se reciben y analizan en la Sala de emergencias (Salem) del CSN. Con la media de los valores de tasa de dosis gamma diarios se elabora el mapa de valores radiológicos ambientales.

La vigilancia que se realiza desde la REM se basa en la recogida de muestras y su posterior análisis, y la lleva a cabo el CSN en colaboración con universidades, laboratorios e instituciones de toda España. Se compone de dos tipos

de redes complementarias, la densa, con numerosos puntos distribuidos por toda España, y la de alta sensibilidad, o espaciada, que se realiza en muchos menos lugares. Las medidas que se realizan incluyen suelo, aire, agua potable, leche y alimentos. Dentro de REM se incluye un programa de vigilancia del medio acuático continental y costero, que analiza la calidad radiológica de las aguas fluviales de las diferentes cuencas hidrográficas y del agua del mar en diversos puntos del litoral. Este programa se realiza en colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex).

Además, el CSN requiere que las instalaciones relacionadas con el ciclo del combustible nuclear (minas, fábricas de combustible, centrales nucleares en operación o en desmantelamiento y almacenes de residuos radiactivos), dispongan de estaciones de muestreo en su entorno, en lo que se denomina red PVRA. Los datos de cada una de estas

estaciones, tanto de PVRA como de REM, se pueden consultar de forma interactiva en el Mapa de valores radiológicos ambientales PVRA-REM, de la web del CSN.

<https://www.csn.es/kprgisweb2/>



El problema de los acuíferos

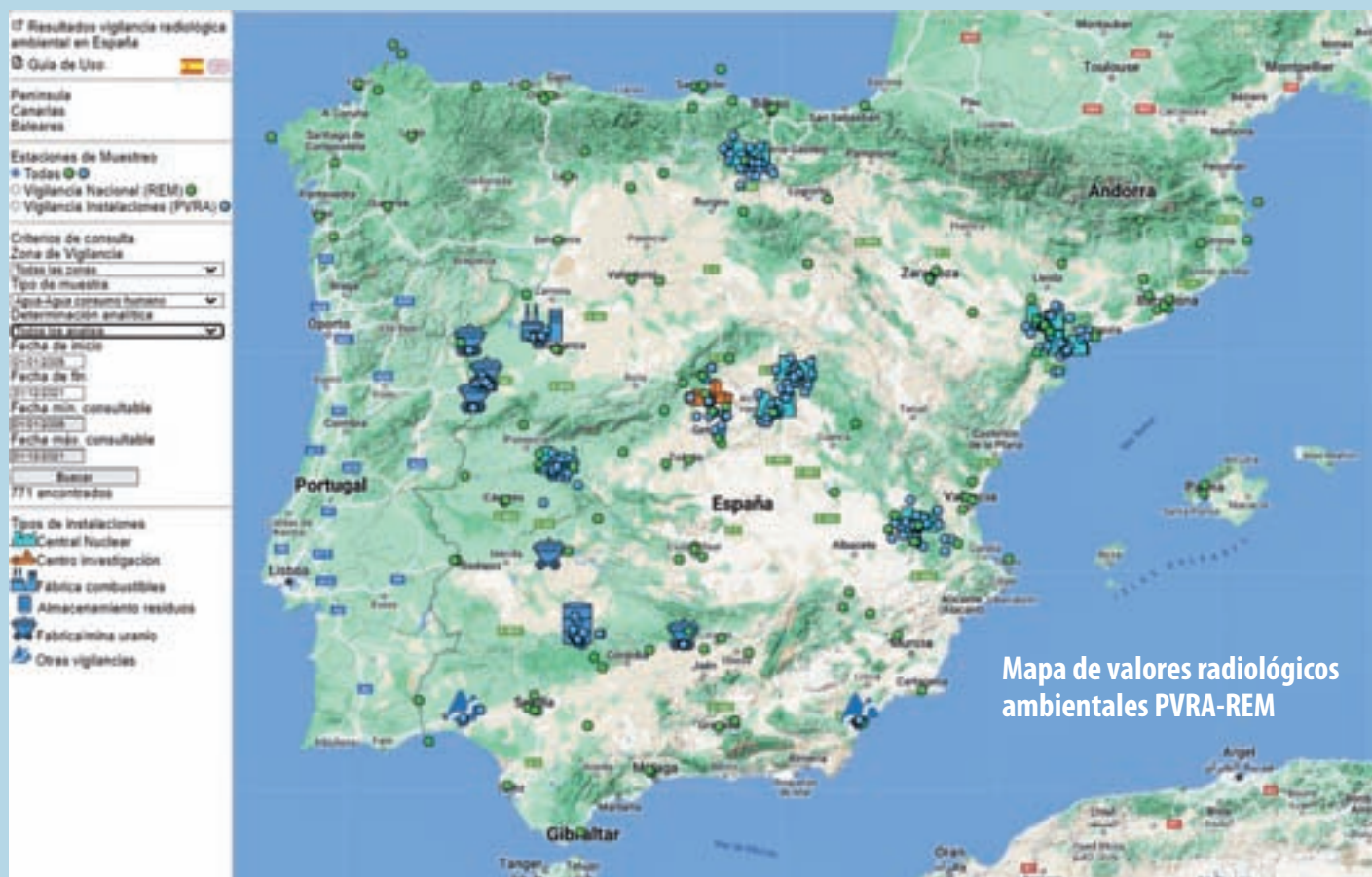
Y es que, en lo que se refiere a radionucleidos naturales, la principal fuente de preocupación está en las aguas subterráneas, tema que fue objeto de la tesis doctoral de Salas. Desde Larux se han estudiado pozos de una amplia zona del oeste peninsular, incluyendo Sierra de Gredos, Extremadura, Salamanca, Ávila y Galicia. “Tuvimos un proyecto financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear, que realizamos junto con la Universidad del País Vasco, que se encargó de la zona norte y Galicia y nosotros más del centro”. Según dice, “es curioso que en algunos sitios había pueblos cuyos pozos sí tenían y otros pueblos cercanos no. Incluso en un mismo pueblo, de cinco pozos uno tenía mayor concentración que los otros. Depende a veces de dónde pinches en el acuífero. Normalmente, cada uno tiene una ca-

racterización de radionucleidos diferente, aunque suelen ser principalmente de uranio y en algunos casos también radio, y mucho menos los más radiotóxicos, el plomo y el polonio. Esa caracterización de cada acuífero no varía mucho con el tiempo, según estudios que hemos hecho en Larux”.



Emilio Bonet, de Global Omnium.

En una explotación normal de un acuífero, el agua que se extrae suele ser la que ha entrado más recientemente, por la recarga que produce el agua de lluvia. Pero buena parte de los acuíferos españoles está sometida a una sobreexplotación, donde ya se extrae agua más antigua, la que se acumula en el fondo, denominada agua fósil, que suele estar más mineralizada y probablemente con mayor cantidad de radionucleidos. Aunque Salas señala que en sus estudios esa variación no se detecta, quizás porque “pueden precipitar con otros elementos, como el hierro”, José Luis Casas, del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Almería, considera que “por la baja pluviometría que tenemos, esos pozos son cada vez más profundos y se están extrayendo aguas fósiles, que llevan muchísimos años atrapadas y en contacto con minerales que contienen uranio y radio”.



Mapa de valores radiológicos ambientales PVRA-REM

En cuanto a los ríos, Salas indica una fuente que aun siendo generada por actividades humanas no siempre se contempla entre la contaminación artificial. Además de los escapes y vertidos que puedan producirse en instalaciones nucleares o radiactivas, también contribuye el uso excesivo de fertilizantes en la agricultura, ya que “los fosfatos suelen contener uranio, e incluso radio, porque están asociados de forma natural”.

Potabilización del agua

Las empresas de suministro de agua han incorporado ya en sus procedimientos habituales la vigilancia radiológica. Según Emilio Bonet, responsable de calidad del agua del grupo Global Omnium, que incluye numerosas empresas de suministro, entre ellas Aguas de Valencia, “todos los laboratorios de las empresas suministradoras hacemos screening y contajes de la

concentración de actividad alfa y beta. Si esos contajes son inferiores a los valores que indica el RD 03/2023, calculamos la dosis indicativa como inferior a 0,1 mSv/año y ya no realizamos investigaciones radiológicas adicionales”.

En el caso de que haya un valor de concentración de actividad alfa superior a 0,1 becquerelios por litro o beta superior a uno, de acuerdo con la legislación, se deberá realizar un análisis de radionucleidos específicos, considerando primero los naturales y, en caso de que éstos no justifiquen por sí solos los valores de actividad alfa total y beta resto, después los artificiales. En estos casos para realizar el análisis se necesita una instrumentación que en los laboratorios de las empresas no disponemos porque son aparatos muy costosos y necesitan condiciones de manipulación de muestras especiales. Para hacerlo se cuenta con centros de investi-

gación o universidades, que sí disponen de ellos”. En todos los casos, las muestras analizadas se tienen que informar al Sistema de Información Nacional de Aguas de Consumo (SINAC).

En su caso, recurren al Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad Politécnica de Valencia. Bonet señala que “por la geología de la zona, que son rocas modernas, no antiguas, no se nos producen casos. Nuestras cuatro plantas de potabilización captan agua superficial del Júcar y del Turia y del canal que los une, de 47 kilómetros. En cualquier caso, si se produjera un evento, la empresa notificaría a la autoridad sanitaria, que evaluaría el riesgo y decidiría las acciones correctoras a realizar para la eliminación de los radionucleidos”, explica Bonet.

La lista de opciones para descontaminar es amplia, cada una más o menos adecuada a los isótopos y las circuns-

tancias de cada caso. Entre ellas se encuentran el filtrado mediante arenas, zeolitas, carbón activado granular u otros elementos; la precipitación química por floculación; la desgasificación, sobre todo en el caso del radón; la ósmosis inversa, adecuada en el caso del radio; y tratamientos físicos y químicos, como el intercambio iónico. También se puede usar la evaporación y destilación, e incluso, en el caso de aguas muy ligeramente contaminadas, se puede proceder a su dilución mezclándolas con otras aguas no contaminadas para garantizar que las resultantes cumplen con los límites legales. En la mayor parte de estos procedimientos, los radionucleidos salen del agua, pero se acumulan como residuo en el material empleado para la descontaminación y será necesario tratarlos en función del grado de actividad que tengan.

Pero también en este apartado se desarrollan sistemas nuevos, como el llevado a cabo por el Centro de Investigación de la Energía Solar (CIESOL) de la Universidad de Almería, dirigido por José Luis Casas. Todo empezó en 2007, cuando un estudio hidrogeológico que realizó un grupo de investigadores de la Academia de Ciencias de Rusia detectó en determinadas poblaciones de la Sierra de los Filabres de Almería, cuyo suministro procede de acuíferos, la presencia de altas tasas de radiactividad natural. Por ello, la Diputación empezó a analizar el agua de todos los pueblos de la zona y montó 15 plantas de ósmosis inversa para tratar las aguas de consumo. Pero, según Casas, “se trata de sistemas de alto coste, poco asequibles para ayuntamientos pequeños, que generan residuos contaminados por los radionucleidos eliminados del agua, que aumentan la huella hídrica (ya que por cada litro de agua potable necesitas 1,6 litros) y también la energía necesaria para extraerla”.

Para buscar una alternativa solicitaron

un proyecto europeo, junto con las universidades de Tallín y Tartus, CARTIF (un centro tecnológico de Valladolid que coordinó el proyecto) y otras entidades. Así nació Life/Alchemia, con el objetivo de encontrar tratamientos alternativos de bajo coste. “Lo que se planteó fue una tecnología basada en lechos filtrantes catalíticos, con zeolitas recubiertas de óxido de manganeso, que provocan la oxidación del uranio y el radio, y también del hierro, que actúa como aglutinante. La idea es provocar la precipitación por floculación de estas moléculas, que quedan retenidas en los lechos”. El sistema se puso en práctica en tres plantas piloto en los municipios Alboloduy, Táhal y Benizalón, con una capacidad de tratamiento de unos 260 metros cúbicos diarios.



José Luis Casas.

Los resultados han sido variables, porque cada una de estas zonas tiene diferentes características, pero prometedores. “Hemos conseguido eliminaciones de radio superiores al 80 %, y en algún caso hasta el 95 %; y en uranio el resultado fue más limitado, de entre el 40 y el 45 %. Pero conseguíamos bajar la dosis indicativa para cumplir con la legislación y poder considerar el agua como potable”, explica Casas. Y añade que el éxito principal es que “conseguimos un ahorro del 77 % de agua y del 80 % en energía, porque el sistema no exige presión, como la

ósmosis inversa”. El proyecto finalizó en diciembre de 2021, pero las instalaciones han quedado en activo.

Otra vía novedosa es la propuesta de Gemma Reguera, microbióloga de la Universidad Estatal de Michigan, que publicó un estudio en la revista científica *PNAS*, sobre la capacidad de algunas bacterias, especialmente la denominada *Geobacter sulfurreducens*, de absorber uranio. Según explica en su página web, esta bacteria coloniza las superficies formando películas denominadas “pili” y obtiene energía mediante procesos de reducción química, transfiriendo electrones, que genera metabólicamente en su interior, a sustancias que aceptan electrones externos, como los metales. Este proceso podría usarse en restauración ambiental de metales radiactivos y tóxicos, así como en la generación de electricidad a partir de fuentes renovables.

Desde Larux desarrollaron su propio sistema. “Se trata de un método químico para eliminar el uranio del agua, que consiste en la optimización del pH del agua. Hicimos muchas pruebas y ensayos en laboratorio y luego en plantas piloto de forma real en varios pueblos y comprobamos que se podía eliminar el uranio sin problema. El radio era más complicado y lo que hicimos, en otro proyecto, fue patentar un material y un método que eliminaba el radio también mediante unas arenas naturales”, dice Alejandro Salas.

Los expertos lanzan un mensaje tranquilizador y aseguran que el agua que consumimos en España, al menos desde el punto de vista radiológico, es segura. El principal problema que afronta nuestro país es más bien de disponibilidad. Las sequías, como la que atraviesa España este año, van a ser en el futuro, probablemente, mucho más frecuentes y extremas que en el pasado, propiciadas por el cambio climático. Sin dejar de vigilar su calidad, el problema del agua potable será su carestía. ©

El genio inglés que murió a los 42 años y cambió para siempre la lógica, la informática, la criptografía, la inteligencia artificial y la biología matemática

Las cuatro revoluciones de Alan Turing

Pocas veces la genialidad se ha mostrado de forma tan evidente y ha sido reconocida de manera tan amplia como en el caso de Alan Turing. A su muerte, poco antes de cumplir los 42 años y probablemente por suicidio, ya había revolucionado la ciencia de la computación, resuelto una de las cuestiones clave de las matemáticas, descifrado el código criptográfico de la sofisticada máquina Enigma (el sistema de comunicaciones del ejército de la Alemania nazi), puestos los pilares de la inteligencia artificial y pro-

puesto un modelo matemático que explica el desarrollo de los seres vivos en su medio. Condenado por su homosexualidad, considerada como un delito en el Reino Unido por aquel entonces, sufrió un proceso de castración química que condicionó sus últimos dos años y probablemente fue la causa de su muerte. Quién sabe qué otras grandes aportaciones podría haber realizado sin ese fatal desenlace.

■ Texto: **Ágata Timón G. Longoria** | Matemática y periodista de ciencia ■

En 1935, el matemático inglés Max Newman impartió un curso avanzado sobre los fundamentos de las matemáticas en la Universidad de Cambridge (Reino Unido). Tres fueron las grandes preguntas que lanzó al nutrido grupo de estudiantes que atendían las lecciones, siguiendo el ambicioso programa propuesto por el matemático alemán David Hilbert para formalizar las matemáticas: ¿son completas las matemáticas? (Es decir, ¿es posible demostrar que cualquier afirmación matemática es cierta o falsa?). ¿Son consistentes? (Lo que equivale a preguntarse ¿existen proposiciones que sean, simultáneamente, verdaderas y falsas?). Y, por último, ¿son decidibles? (¿Existe un algoritmo capaz de demostrar que cualquier afirmación es cierta o falsa?). Seguramente, Newman no se imaginaba que una de las personas que tenía delante sería la que resolviera la tercera de estas cuestiones.

Desde que salió de aquel curso, Alan Turing (1912-1954), entonces estudiante de la Universidad de Cambridge, estuvo dándole vueltas a estos temas. La primera pregunta había sido resuelta, en 1931, por el matemático austriaco Kurt Gödel. Para decepción de los seguidores



Alan Turing.

de Hilbert, creedores de que una formalización sólida de las matemáticas permitiría evitar incómodas paradojas que habían ido emergiendo a lo largo del siglo, la respuesta que dio fue negativa: un sistema consistente, capaz de describir los números naturales, no puede ser completo. Pero, ahora bien, se preguntaba Turing, ¿podría haber un algoritmo, es decir, una serie de instrucciones, que permitiera determinar si una afirmación cualquiera es verdadera o falsa?

Un año más tarde, Turing se presentó en el despacho de Newman y le entregó el primer borrador de un artículo que cambió el rumbo de nuestra sociedad: “On computable numbers”. No solo respondía a la cuestión fundamental planteada por Hilbert, de nuevo de forma negativa, sino que, además, sentaba las bases de nuestros modernos ordenadores. Fue su primera revolución.

Hasta este momento, los computadores eran, simplemente, calculadoras de operaciones aritméticas, diseñadas para resolver un problema concreto. Turing ideó un dispositivo –teórico– capaz de resolver cualquier tarea que se pudiera traducir a un listado de acciones e instrucciones. Es la llamada, por razones evidentes, máquina de Turing. Al introducir un dato de partida en la máquina, esta efectúa las operaciones correspondientes hasta dar con un resultado. Entonces, la máquina para y ofrece el cómputo obtenido. También puede suceder que el dispositivo no llegue a ningún resultado y continúe con sus operaciones para siempre, como cuando nuestros programas informáticos entran en bucle. Saber cuándo la máquina para o no, a partir de un cierto dato de entrada, es el problema de la Parada.

Pues bien, Turing probó que es equivalente la expresión “siempre sea



Turing era un consumado atleta y corrió maratones.

posible resolver el problema de la parada” a esta otra: “las matemáticas sean computables”. A continuación, demostró que “no existe ningún procedimiento que permita determinar si un determinado programa, entendido como una secuencia finita de instrucciones, parará o no, con lo que resuelve el problema de la completitud”, explica Irene Díaz, catedrática del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo y experta en ciencia de la computación e inteligencia artificial.

Simultáneamente, un investigador de la Universidad de Princeton (EE UU), Alonzo Church, llegó a la misma con-

clusión de Turing en relación con el problema de la decibilidad. Su manera de alcanzar el resultado era totalmente diferente a la del inglés, pero, sin duda, sus investigaciones se solapaban. Por ello, Church invitó a Turing a Princeton. El intercambio de ideas podía ser muy interesante para ambos. En septiembre de 1936 Turing viajó hacia el nuevo continente. Después de algo menos de dos años, en los que desarrolló y amplió sus ideas sobre computación, Turing regresó a Europa –con la amenaza de la guerra cada vez más presente– con el título de doctor por la Universidad de Princeton.

En Inglaterra, tras unos meses de tensa calma como profesor en Cambridge, Turing prestó sus servicios al ejército aliado dentro de los equipos de criptoanalistas que trataban de descifrar las comunicaciones nazis. Los alemanes empleaban un dispositivo mecánico para codificar sus mensajes: la máquina Enigma. Según Maribel González Vasco, catedrática del Departamento de Matemáticas de la Universidad Carlos III de Madrid, “Enigma cifraba sustituyendo unas letras del alfabeto por otras, usando una regla extremadamente compleja que



Maribel González Vasco.



Reconocimientos tardíos al genio: en un billete de 50 libras, una estatua en Cambridge y una placa en su casa natal en Warrington Crescent, Londres.



dependía de la configuración inicial de los componentes de la máquina”.

Una regla de sustitución establece una correspondencia entre símbolos que solo conocen los dueños de la máquina. Uno de los primeros cifrados conocidos de este tipo es el “cifrado del César”, que hace corresponder a cada letra la letra que ocupa un determinado número de espacios más allá en el alfabeto. Por ejemplo, un cifrado del César con un despla-

zamiento de 2, asocia la A a la C, la B a la D y así sucesivamente. “En el caso de Enigma el conjunto de reglas posibles era mucho más complicado y tenía un tamaño colosal; de modo que fuese imposible de deducirlas probando”, afirma González Vasco.

“Las reglas quedaban fijadas por la configuración de varios rotores y cables en la máquina, descrita por la ‘clave del día’, que cambiaba cada 24 horas”, detalla. El Ejército Aliado y en concreto,

el grupo de Alan Turing, buscaba averiguar la configuración inicial de la máquina Enigma, disponiendo de mensajes cifrados. Era un trabajo a contrarreloj, ya que cada amanecer, volvían a la casilla de salida. Para ello emplearon ideas relacionadas con la teoría de grupos, una rama del álgebra que nació para entender los tipos de simetrías. “Se trataba de entender el grupo de permutaciones asociado a cada configuración de cada máquina; por ejemplo, el orden de sus

Una máquina para gobernarlo todo

La máquina propuesta por Turing contaba con unas pocas piezas: una cinta infinita, dividida en celdas, en cada una de las cuales se puede escribir un símbolo (habitualmente, cero o uno); un cabezal, que lee la información contenida en una celda y puede reescribirla, y que se mueve adelante y atrás; una serie de instrucciones, que indican la siguiente acción del cabezal, según lo que leyera en la celda; y una serie de estados de la máquina. Una vez introducido el dato de entrada, la máquina comienza a funcionar: parte de un estado inicial, lee el dato en la celda y sigue sus instrucciones, que son del tipo “Si estás en el estado a y

lees un 1, escribe un 0, desplaza el cabezal a la izquierda y cambia al estado b”.

Luego continúa ejecutando las acciones marcadas por lo que lee en la cinta y sus instrucciones, hasta que llega a la instrucción de parada. Por ejemplo, podemos imaginar una máquina de *vending*. Una vez introducido el código del producto deseado, la máquina, cuyo estado inicial es la disponibilidad de los diferentes productos, lee sus instrucciones: “Si lees 25 y el estado incluye disponibilidad del producto 25, deja caer el producto 25 y devuelve el cambio indicado” o bien, “Si lees 25 y el estado indica no disponibilidad del producto 25, escribe el mensaje: “producto no disponible”

elementos o sus subgrupos cíclicos más pequeños. Así, era posible reducir la búsqueda de las claves involucradas en cada transformación”, relata González Vasco.

Esta búsqueda se simplificaba gracias a las *bombas*, gigantescas máquinas que buscaban patrones en las comunicaciones nazis cifradas. Fueron ideadas por el equipo del matemático polaco Marian Rejewski, que se centraba en el análisis de la secuencia introductoria de los muchos mensajes interceptados. “Turing depuró la estrategia de Rejewski, centrándose en el análisis de patrones que no dependiesen de la configuración completa de Enigma, sino solo de los rotores. Coordinó de manera muy eficiente la mecanización del proceso a través de máquinas bomba cada vez más eficientes, diversificando sus tareas para adaptarse a las distintas versiones de Enigma utilizadas simultáneamente en distintas secciones del ejército por los alemanes”, detalla González Vasco.

Su arduo trabajo dio sus frutos: consiguieron un método para obtener diariamente la configuración de las máquinas y descifrar sus mensajes. Los Aliados podían adelantarse a los movimientos nazis, con la ventaja bélica que eso suponía. Sin embargo, todo aquello, que suponía su segunda revo-

lución, quedó clasificado por razones de seguridad nacional, hasta muchos años más tarde, lo que le privó del reconocimiento público.

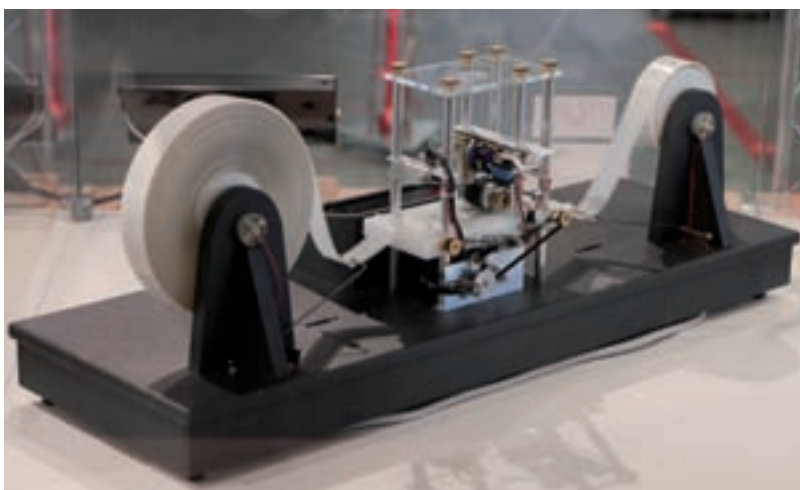
El siguiente gran problema que abordó el matemático fue una de las preocupaciones germinales en los inicios del desarrollo de los computadores, que nos ha acompañado hasta el día de hoy e incluso se encuentra de plena actualidad: ¿pueden las máquinas ser inteligentes? Turing se dio cuenta de que, para afrontar esta cuestión, la gran complicación era definir lo que era la inteligencia, por lo que decidió saltarse ese paso. Directamente, propuso un método para determinar si la inteligencia de una máquina era indistinguible de la de un ser humano cualquiera. Como suponemos que los seres humanos son inteligentes, también podríamos afirmar que la máquina lo es.

“Turing formuló lo que hoy se conoce como test de Turing, una prueba para determinar si una máquina es inteligente o no”, dice Irene Díaz. En este examen, se sitúa a un humano en una habitación y, en otra, una máquina o una persona. El humano hace una serie de preguntas y recibe, de forma telemática, las respuestas. Si no es capaz de distinguir si su interlocutor es una persona o una máquina, entonces la

máquina habrá pasado el test de Turing. Hoy en día, tras años de vertiginoso desarrollo de la IA y grandes hitos, como ChatGPT, este enfoque puede sonar algo ingenuo, pero, “en su época el término de inteligencia artificial no estaba acuñado, ni tampoco existían ordenadores tal y como los conocemos hoy, de ahí que su aportación sea indiscutible”, señala Díaz.

Estas ideas son la base de los códigos *captcha* de verificación que se incluyen al enviar algunos formularios *online*. “También muchos programas anti-spam están basados en su famoso test”, añade la investigadora. Su trabajo fue publicado en 1950 en la revista *Mind*, bajo el título de *Computing Machinery and Intelligence*. Turing llevaba años, desde que estaba en Bletchley Park, pensando en estas cuestiones. De hecho, en febrero de 1947 impartió la que se considera la primera conferencia sobre inteligencia informática. Fue en la sede de la Royal Astronomical Society, en Londres, y habló de máquinas que no solo actúan de forma inteligente, sino que aprenden. Esta fue su tercera revolución.

En 1952, Turing fue arrestado y condenado por mantener relaciones homosexuales, lo que constituía un delito en la Inglaterra de la época. Turing había acudido a la comisaría a denun-



A la izquierda, diagrama de morfogénesis, sobre el crecimiento de los seres vivos. A la derecha, una máquina de Turing construida por Mike Davey en 2012.



Una máquina Enigma, utilizada por el ejército alemán durante la II Guerra Mundial para enviar mensajes mediante un complejo sistema criptográfico.

ciar un robo en su casa, pero, como parte de su relato, afirmó haber mantenido relaciones sexuales con un joven, Arnold Murray, en tres ocasiones. Cada una de ellas suponía dos delitos criminales. En el juicio, Max Newman testificó a su favor: “Es una de las mentes matemáticas más profundas y originales de su generación”, afirmó.

Entre los castigos disponibles, Turing escogió someterse a un tratamiento de hormonación femenina, que se creía que reducía el deseo sexual y modificaba la orientación sexual, y cumplir un año de libertad provisional. “No hay duda de que saldré de todo esto como una persona muy distinta; eso sí, todavía no he descubierto quién”, dijo Turing. Pese a todo, en aquel periodo continuó trabajando, dando los primeros pasos en el campo

de la biología matemática. Publicó, en la revista de la Royal Society, un trabajo sobre el crecimiento de los seres vivos, su teoría de su teoría reacción-difusión. Aquella fue su última revolución.



Irene Díaz.

Dos años después, el 7 de junio de 1954, murió, poco antes de cumplir los 42 años. La muerte se consideró un suicidio, cometido ingiriendo una manzana contaminada con cianuro. Efectivamente, se encontró una manzana mordida cerca del cuerpo de Turing, pero nunca se hicieron pruebas para detectar cianuro en la fruta. En el cuerpo de Turing sí se halló, pero persisten diferentes voces, entre ellas la del escritor Jack Copeland, autor del libro *Alan Turing. El pionero de la era de la información*, que ponen en duda cómo llegó el veneno al organismo del matemático. Tampoco su madre, Sara Turing, creyó que se hubiera suicidado. En su biografía *Alan M. Turing* (Cambridge, Heffer, 1959), relata: “Estaba en la cúspide de sus capacidades mentales, con una fama creciente [...]”. De acuerdo con los parámetros ordinarios, tenía todos los motivos para vivir”.

Es imposible saber qué es lo que sucedió aquel día, pero aquel incidente no impidió que el trabajo de Turing siguiera revolucionando el mundo. Y poco a poco se fue conociendo su importancia y magnitud. En 2012 se celebró el año de Turing, con motivo del centenario de su nacimiento. En ese contexto, y gracias al trabajo de activistas por los derechos de la comunidad LGTBIQ+, Turing recibió el indulto real en agosto de 2014, con el propósito de que “a Turing se le recuerde por sus contribuciones durante la guerra y no por su posterior condena criminal”. También Gordon Brown, entonces primer ministro de Reino Unido, hizo pública una disculpa en nombre del Gobierno a Alan Turing. En su discurso afirmó: “Aunque Turing fue juzgado según la ley del momento y no podemos dar marcha atrás al reloj, su tratamiento fue, desde luego, absolutamente injusto, y me agrada tener la oportunidad de decir cuánto siento, cuánto sentimos todos nosotros, lo que le ocurrió”. ©

Reacción en cadena

NOTICIAS

El humo fosilizado de la cueva de Nerja

La malagueña cueva de Nerja ha estado siendo cobijo de los humanos desde hace 41 000 años, 10 000 más de lo estimado hasta ahora, según han descubierto las investigadoras Marian Medina y Eva Rodríguez, de la Universidad de Córdoba, y José Luis Sanchidrián, director científico de la cueva, según han publicado en *Scientific Report de Nature*. Su trabajo documenta 35 000 años de visitas humanas en 73 fases diferentes, lo que la

convierte en la cueva con arte paleolítico con mayor número de visitas constatadas y recurrentes a su interior durante la prehistoria de toda Europa. El enorme nivel de detalle de su trabajo ha sido posible gra-

cias a la utilización de la microscopía electrónica de transmisión y las técnicas de datación del carbono-14, utilizadas para estudiar los restos de carbón y el humo fosilizado en las estalagmitas de la cueva.



Marian Medina obteniendo muestras.

Es lo que denominan “arqueología del humo”, una novedosa técnica que ha desarrollado Marian Medina y que ha aplicado ya en otras cuevas de España y Francia a lo largo de diez años. Según explica la investigadora, el estudio de estos rastros de humo y carbón “permiten arrojar luz sobre los rituales y los modos de vida de los habitantes de la cueva de manera impresionante”. Subraya también el uso funerario de la cueva de Nerja en la última parte de la prehistoria, durante miles de años, e insiste en que aún queda mucho trabajo que realizar en ese escenario.

Nueve españolas en Marte

El pasado abril nueve mujeres de Cataluña llevaron a cabo la misión Hypatia I por la que siete de ellas (las otras dos eran suplentes) pasaron 14 días recluidas en la Mars Desert Research

Station, un emplazamiento de experimentación que simula las condiciones del planeta Marte, situado en una zona desértica de Utah, en Estados Unidos. Se trata de una iniciativa puesta en marcha por la Mars Society, una institución privada dedicada a promo-

ver el estudio del planeta rojo y facilitar el desarrollo de tecnologías que permitan, algún día, enviar tripulaciones humanas allí y sobrevivir en un ambiente extremadamente hostil, donde tendrán que generar sus propios alimentos, el agua y el oxígeno necesarios para su supervivencia y construir con materiales locales los hábitáculos donde deberán pasar una larga estancia. Las mujeres del proyecto Hypatia I, lideradas por la astrofísica Mariona Badenas-Agustí, llevaron a cabo investigaciones como ensayar una batería a base de orina humana y compuestos de hierro, muy abundantes en Marte, o explorar las posibilidades de la acuicultura para proporcionar proteína animal a un futuro asentamiento humano.



La Mars Desert Research Station.

El parpadeo lo inventaron los peces que invadieron la tierra firme

Cuando parpadeamos estamos reproduciendo un gesto con 375 millones de años de antigüedad; el mismo que hacían los peces que protagonizaron la conquista de la tierra firme, intermediarios entre peces y anfibios, según una investigación realizada por un grupo estadounidense que ha estudiado las especies *Periophthalmus barbarus* y *Periophthalmus septemradiatus*, que tienen la capacidad de pasar largos ratos fuera del agua, como se supone que hacían aquellos antepasados aventureros. Parpadear nos ayuda a mantener los ojos húmedos y limpios y a protegerlos de lesiones dice Thomas Stewart,



de la Universidad de Pensilvania, y los resultados del estudio indican que estos peces de vida anfibia han desarrollado el parpadeo con ese mismo propósito, mantener la humedad y limpiar sus ojos de polvo o residuos. Estudiar cómo la evo-

lución introdujo este comportamiento ha sido un reto porque los cambios anatómicos que permiten el parpadeo se encuentran en los tejidos blandos, que no se conservan bien en el registro fósil. Los investigadores analizaron el com-

portamiento de estos animales mediante vídeos grabados a alta velocidad y reproducidos a cámara lenta, y compararon la anatomía de esos peces con la de un pez acuático con un estrecho parentesco evolutivo que no parpadea. ▶

EFEMÉRIDES ▶ HACE 50 AÑOS...

Nace la teoría de gran unificación

Tras conseguir unificar las interacciones electromagnética y nuclear débil, en 1968, un grupo de físicos, encabezados por Sheldon Glashow, Abdus Salam y John Iliopoulos, propuso, en 1973, la teoría de gran unificación (GUT), que integra la interacción electrodébil y la nuclear fuerte, como

un paso esencial hacía una teoría del todo, que integrase también la gravitación. Aunque tiene un amplio reconocimiento, la GUT sigue siendo objeto de controversia científica. Según Salam, una implicación de la teoría es que el protón debería ser inestable y desintegrarse espontáneamente, dando lugar a un positrón y un pion neutro, aunque su vida

media se calcula en 10^{33} , 100 000 trillones de veces la edad de nuestro universo. Aun así, dado el inmenso número de protones existente en toda la materia que nos rodea continuamente debería haber algunos de ellos desintegrándose. Hasta la fecha no se ha registrado ningún evento de este tipo. ▶



Sheldon Glashow, Abdus Salam y John Iliopoulos.

LIBRO

España no es país para ríos

Ramón J. Soria Breña
Alianza Editorial, 2023.

Asegura el autor que 35 000 ríos dibujan sus trazados sinuosos sobre la superficie de España. Unos van desca- balgando en otros y acumu- lando los efectos de la desi- dia humana hasta llevarlos al mar. En conjunto suponen un tesoro hoy desvalido, ol- vido y mancillado por los

despojos de nuestra socie- dad. Ramón Soria nos aden- tra en cuarenta de ellos para contarnos lo que fueron, lo que nos dieron, lo que son ahora y el oscuro futuro que les aguarda. Una selección hecha con el corazón y apli- cando el criterio de la diver- sidad. Están los grandes, al- gunos otros medianos pero emblemáticos y algunos apenas conocidos más que por los lugareños de las zo- nas que cruzan. No es una obra académica, ni mera- mente descriptiva, ni reivin-

dicativa, aunque también es todo eso, sino una mirada eminentemente emocional. Es un conjunto de vivencias personales del escritor, tam- bién pescador, con cada uno de esos cursos de agua y una excusa para hablar de su flora y fauna, los pueblos y aldeas que visitan, sus ha- bitantes, sus labores y su gastronomía. Es también una llamada de atención para que nuestros ríos reci- ban la atención que mere- cen; de las Administraciones Públicas, desde luego, pero



también de las propias gen- tes que viven junto a ellos, y se abra así la esperanza de que empiecen a remontar su trágica decadencia. ▶

AGENDA

Museo Subacuático Atlántico

Calle Lanzarote 1. Playa Blanca. Lanzarote

+34 928 518 668

info@underwatermuseumlanzarote.com

+34 606 853 109

<https://underwatermuseumlanzarote.com/es/>

El primer museo subacuático de Europa se encuentra en Playa Blanca, en la isla de Lanzarote, fue inaugurado en 2016 y permite visitar junto con la fauna que atraviesa la zona un conjunto de escul- turas sumergidas de Jason deCaires Tay- lor, artista especializado en este tipo de centros inmersivos. Consta de diez con- juntos escultóricos inspirados en las cir- cunstancias (como la pateras utilizadas por los inmigrantes) y las gentes de la zona. Para realizar la visita conviene dis- poner de experiencia en buceo y de la correspondiente licencia, pero también está disponible para principiantes sanos y con una forma física normal, a quienes se ofrece una experiencia especial de

cinco horas de duración (de 10 a 15), que les permitirá adquirir las habilidades básicas del buceo y que incluye un adies- tramiento teórico y varias prácticas tanto en la playa como en piscina para terminar yendo hasta el museo propiamente dicho, situado en medio del mar, a unos 10-15 minutos de viaje en barco, donde se su- mergen hasta 12 metros, aunque las es- culturas se encuentran a 14 metros de

profundidad. Las visitas se hacen con instructor y medidas de seguridad. Para los experimentados que dispongan de certificación de apnea la visita es más sencilla y corta. Se inicia a las 12:30 con una explicación general de la visita y las condiciones que deben respetar los visi- tantes tras lo cual son trasladados en bar- co a la zona y se les permite descender hasta los 14 metros. ▶



EN RED

Todos en guerra contra los mosquitos



Los mosquitos son, además de molestos, vectores de muchas enfermedades infecciosas. En concreto, el mosquito tigre y el de la fiebre amarilla se están expandiendo por Europa. Para disponer de una información más amplia sobre su difusión, en 2014 se creó un proyecto de ciencia ciudadana abierto a la participación pública, denominado Mosquito

Alert, coordinado por diferentes centros de investigación. El objetivo es estudiar, vigilar y luchar contra la expansión de mosquitos invasores capaces de transmitir enfermedades globales como el dengue, el Zika o la fiebre del Nilo Occidental y la fiebre amarilla. Para participar hay que descargarse la App Mosquito Alert desde la web del proyecto y notificar, mediante una foto, el posible hallazgo de uno de los mosquitos estudiados. Un equipo de entomólogos se encarga de validar las fotos recibidas y notificar el resultado al participante. Finalmente, el resultado se publica en un mapa público, donde se pueden consultar y descargar las observaciones registradas. La información obtenida permite a los gestores de salud pública el seguimiento y control de estos mosquitos.

<http://www.mosquitoalert.com/>



Estimular el talento científico de las niñas

Si se pretende que España sea pionera en innovación y desarrollo se necesitan nuevas generaciones dispuestas a implicarse. Por ello, el proyecto STEM Talent Girl, creado por la Fundación ASTI, tiene como finalidad fomentar las vocaciones científico-tecnológicas (STEM, del inglés Science, Technology, Engineering and Mathematics) en las niñas y jóvenes de nuestro país a través de mentorías con mujeres dedicadas a estas disciplinas, tanto en instituciones públicas como en empresas privadas. Hay tres niveles de mentoría: 3º y 4º de la ESO, bachillerato y universidad. Las alumnas tienen encuentros con sus mentoras para que conozcan la realidad de las mujeres que desarrollan su actividad profesional en áreas STEM y que las mentoras las apoyen en el conocimiento y las salidas profesionales de estas áreas, incluida la investigación. Dentro las actividades que se organizan se incluyen talleres, conferencias y encuentros presenciales. También organizan los premios STEM Talent Girl Awards, con la Junta de Castilla y León, que en 2022 llegó a su tercera convocatoria.

<https://talent-girl.com/>



REDES



Big Van Ciencia

En los vídeos del canal de Big Van Ciencia podemos conocer conceptos y experimentos científicos de la mano de este veterano grupo de investigadores, apasionados de la divulgación.



FECYT

La Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología informa aquí sobre sus convocatorias, el sistema español de I+D+i, exposiciones, eventos de divulgación científica, publicaciones y su encuesta sobre Percepción Social de la Ciencia en España.



@_ICMAT

El Instituto de Ciencias Matemáticas es un referente en la divulgación en el mundo de la ciencia de los números, desde las últimas investigaciones hasta su parte más lúdica y entretenida.



@ESA_Earth

Este perfil de la Agencia Espacial Europea muestra detalladas imágenes de diferentes regiones de la superficie terrestre vistas desde el espacio.



LadyScience

La bioquímica Teresa Arnandis decidió crear este perfil para "democratizar la ciencia" y luchar contra la desinformación. Y parece lo ha conseguido: cuenta ya con más de 721 000 seguidores.

Panorama

La Convención sobre Seguridad Nuclear reconoce las buenas prácticas del CSN

El 24 de marzo, España presentó en Viena, durante la reunión de revisión de la Convención sobre Seguridad Nuclear, los resultados de los informes nacionales 8º y 9º, con el análisis del cumplimiento con dicha convención durante los trienios 2016-2018 y 2019-2021. La delegación española estuvo formada por representantes del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, el Comité de Energía Nuclear y el Consejo de Seguridad Nuclear, representado por su presidente, Juan Carlos Lentijo, los consejeros Javier Dies y Elvira Romera y la directora técnica de Seguridad Nuclear, Teresa Vázquez.

La delegación española recibió 61 preguntas relativas al 8º informe y 59 sobre el 9º. Las delegaciones internacionales se interesaron principalmente por el artículo octavo de la Convención, referente al organismo regulador, su establecimiento, funciones y estructura, entre otros aspectos, y por la experiencia de la misión combinada IRRS-ARTEMIS, de 2018, por ser la primera vez que el OIEA llevaba



a cabo dos revisiones diferentes en una misma misión. Esta acción y el intenso trabajo de evaluación llevado a cabo por el CSN en torno a la cultura de seguridad nuclear fueron reconocidas como buenas prácticas. También se elogió, entre otras cosas, la labor del regulador durante la pandemia. ▸

Enresa y el Consejo trataron el desmantelamiento de Santa María de Garoña

El Consejo de Seguridad Nuclear celebró el 27 de abril la reunión anual del comité de enlace entre el regulador y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa). Durante el encuentro se revisó el estado de las actividades en curso y las previstas por Enresa relativas a la gestión de los residuos y del combustible gastado, así como las previsiones de desmantelamiento y el estado actual de la tramitación del borrador del 7º Plan General de Residuos Radiactivos. También se abordaron las actividades previstas para el próximo desmantelamiento de Santa María de Garoña, con los objetivos de

licenciamiento más destacados, como la autorización de desmantelamiento y la transferencia de la titularidad de la instalación para la fase 1. Además, se trató la situación de la Celda 29 de El Cabril, de almacenamiento de residuos radiactivos sólidos de muy baja actividad, y las medidas adicionales contenidas en la apreciación favorable que el Pleno emitió en su momento. ▸

El CSN participa en el comité de dirección de la NEA

Los días 20 y 21 de abril tuvo lugar en París una reunión del Comité de Dirección de la Agencia de la Energía Nuclear (NEA, por sus siglas en inglés), en la que participó

una delegación del CSN encabezada por su secretario general, Pablo Martín González. El director general de la NEA, William Magwood, informó de las medidas emprendidas por la institución para apoyar el intercambio de información y la puesta en común de las prácticas adoptadas por los diferentes organismos reguladores para mantener los niveles de seguridad en el contexto actual. Uno de los proyectos destacados es la creación de una base de datos para que los países miembros compartan información y sea posible el aprendizaje colectivo. Por parte del CSN se destacó el compromiso del regulador con la actualización del marco y prácticas reguladoras para adaptarse a los retos a los que hace frente el sector. ▸



Canadá acogió la 51ª reunión de INRA

La Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA, por sus siglas en inglés) celebró durante la primera semana de mayo su 51ª reunión en Toronto (Canadá). El Consejo de Seguridad Nuclear participó en el encuentro con una delegación encabezada por su presidente, Juan Carlos Lentijo, quien detalló los complejos procesos de evaluación e inspección que se están llevando a cabo para emitir los informes preceptivos para la renovación de la autorización de la central nuclear Trillo como del plan de desmantelamiento de Santa María de Garoña. Los países participantes compartieron, entre otras cosas, las mejores prácticas identificadas durante la reciente reunión de revisión de la Convención sobre Seguridad Nuclear. También por parte del CSN, su responsable de Relaciones Internacionales, Alfredo de los

Reyes, presentó el Foro iberoamericano de organismos reguladores nucleares y radiológicos (FORO) y el trabajo que desarrolla.

El encuentro se completó con visitas técnicas a instalaciones nucleares canadienses, que incluyeron las minas situadas en el norte de la provincia de Saskatchewan, lugar en el que se encuentra el segundo mayor yacimiento de uranio del mundo, así como la central nuclear de Darlington. Las jornadas finalizaron con el traspaso de la presidencia de la asociación de la anfitriona, Rumina Velschi, presidenta del organismo regulador canadiense y de INRA durante el último año, a Gerrit Niehaus, director general de seguridad nuclear y protección radiológica de Alemania.

INRA es conocida también como el G-9 de la regulación nuclear, ya que

está constituida por los nueve países con más experiencia del mundo en este ámbito: Alemania, Canadá, Corea del Sur, España, Estados Unidos, Francia, Japón, Reino Unido y Suecia. La asociación celebra dos reuniones al año, donde se debaten temas de común interés, se comparten experiencias y se fomenta la colaboración..

Celebrados los comités locales de Vandellós II, Ascó, Cofrentes y Garoña

Los comités locales son jornadas informativas dirigidas a las poblaciones del entorno de las principales instalaciones nucleares y radiactivas, en las que se presenta y analiza la situación de la instalación, los incidentes producidos, las actividades reguladoras que puedan ser de interés y otras cuestiones que planteen los asistentes. Los organiza y preside la Subdirección General de Energía Nuclear del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) y en ella participan habitualmente el responsable de dicha subdirección, en la actualidad José Manuel Redondo; el alcalde de la localidad y representantes del titular de la instalación, de Protección Civil y del Consejo de Seguridad Nuclear. Durante el último trimestre se han celebrado las de Vandellós II, el 15 de marzo; Ascó, el 16 de marzo; Cofrentes, el 29 de marzo; y Santa María de Garoña, el 13 de abril.

Acuerdos del Pleno del CSN destacados

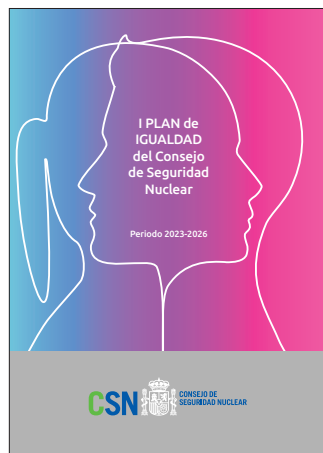
- Informe favorable de la primera fase del desmantelamiento de la central nuclear Santa María de Garoña. Pleno 1 668, 17 de mayo de 2023.
- Firma de un convenio con la compañía sueca Studsvik para el estudio del comportamiento del gadolinio en reactores. Pleno 1 667, 10 de mayo de 2023.
- Modificación de siete instalaciones de radioterapia incluidas en el Plan INVEAT. Pleno 1 666, 26 de abril de 2023.

- Proyecto de mejora de la cultura de seguridad en el organismo y licitación de la contratación de apoyo para su plan de acción. Pleno 1 664, 12 de abril de 2023.



[Acceso a todas las actas](#)

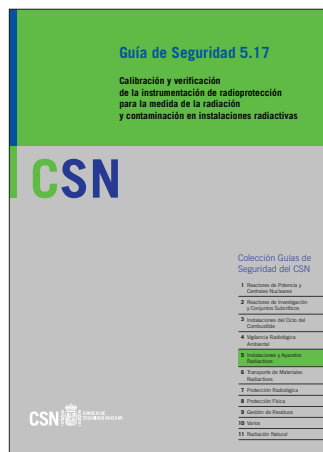
Publicaciones



**I Plan de igualdad
del Consejo de Seguridad
Nacional**
Periodo 2023-2026



**XI Jornadas sobre calidad
en el control de la radiactividad
ambiental**
Málaga, 7-10 de junio de 2022



Guía de Seguridad 5.17
Calibración y verificación
de la instrumentación
de radioprotección para
la medida de la radiación
y contaminación en
instalaciones radiactivas



**Intercomparación analítica
entre laboratorios de
radiactividad ambiental 2020
(Suelo)**
Colección Informes Técnicos
57.2022

alFa Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

Boletín de suscripción

Institución/Empresa		
Nombre		
Dirección		
CP	Localidad	Provincia
Tel.	Fax	Correo electrónico
Fecha	Firma	

Enviar a **Consejo de Seguridad Nuclear — Servicio de Publicaciones**. Pedro Justo Dorado Delmans, 11. 28040 Madrid / Fax: 91 346 05 58 / peticiones@csn.es

También puedes suscribirte a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario online: <http://run.gob.es/xdjxkd>

La información facilitada por usted formará parte de un fichero informático con el objeto de constituir automáticamente el *Fichero de destinatarios de publicaciones institucionales del Consejo de Seguridad Nuclear*. Usted tiene derecho a acceder a sus datos personales, así como a su rectificación, corrección y/o cancelación. La cesión de datos, en su caso, se ajustará a los supuestos previstos en las disposiciones legales y reglamentarias en vigor.

Abstracts

REPORTS

6 Returning to the Moon

More than 50 years since the last manned journey to the Moon, the Apollo 17 mission, NASA, along with ESA and other public and private entities, has launched the Artemis programme, the aim of which is to send human beings back to our satellite in 2025. The objective in this case is to stay and build a permanent station on the Moon's surface.

13 Attracting female talent to the nuclear world

The presence of women in the nuclear sphere is far from even minimum levels of parity. It is very much a male-dominated field. For this reason, in 2020 the IAEA launched the Marie Skłodowska-Curie Scholarship Programme with a view to stimulating the presence of women in the profession, facilitating their training and the performance of practical sessions.

35 The new nuclear medicine against cancer

Theragnosis is a personalised medical technology that allows accurate diagnosis and treatment to be combined using one same molecule and a radioactive isotope, allowing for the improvement in terms of time and effectiveness of therapy against cancer. Initially used for neuroendocrine tumours, its use is rapidly spreading to include other oncology patients.

41 The empire of the algorithm

From the granting of credit to the selection of personnel, from the recommendations we see on the Internet to industrial production processes, from company telephone support services to logistical tasks. Algorithms and artificial intelligence are increasingly governing our lives, sometimes in unsuspected ways.

53 Water for you to drink

The purification of water for human consumption requires the possible presence of natural radionuclides to be controlled, especially when the supply comes from underground aquifers. Royal Decree RD 03/2023 has updated the standards in force to control the presence of such radionuclides, establishing limits and regulating the measures to be applied if radioactivity is detected in the water.

59 The four revolutions of Alan Turing

Dying shortly before reaching the age of 42, this British genius had already revolutionised computer science, solved one of the key questions in mathematics, deciphered the cryptographic code of the sophisticated Enigma machine, put in place the pillars of artificial intelligence and proposed a mathematical model explaining the development of living creatures in their medium.

RADIOGRAPHY

24 Guideline on radiological protection in the handling of the deceased following treatment with radionuclides

The Forum on Radiological Protection in Healthcare set up a working group to draw up a guideline with instructions and recommendations on the handling of deceased persons and human remains following treatment with radioactive material.

INTERVIEW

26 Eloísa del Pino, president of the High Council on Scientific Research (CSIC)

"For both the CSIC and for Spanish science in general, the decade 2011 to 2019 has been time wasted".

TECHNICAL ARTICLES

17 An overall view of deep geological disposal and the situation in Spain

The wide agreement existing between scientists has led deep geological disposal (DGD) to be the option chosen as the safest and most effective method for the final treatment of spent nuclear fuel and high level radioactive waste. Described here is the concept of DGD, the current status of the most advanced projects in the European countries and the progress being made in Spain in this field.

44 Atmospheric nuclear tests (1945-1980) and the spread of man-made radioactivity in the environment

Following the nuclear bombs dropped on Hiroshima and Nagasaki, there was a ramp-up in increasingly powerful tests in the atmosphere, carried out especially by the United States and the Soviet Union, which released large quantities of radioactivity in the affected areas and across the entire planet, until they were finally suspended in 1962.

I PLAN de IGUALDAD del Consejo de Seguridad Nuclear 2023-2026



*Juntos hacia
la excelencia*