CSN

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

Consejo de Seguridad Nuclear

Número 59
Septiembre 2024



Inteligencia artificial nuclear

Ventajas prometedoras y retos pendientes

Apuntar a la diana del cáncer: la radioterapia deja hueco a nuevas técnicas de futuro esperanzador

¿De qué hablamos cuando hablamos de computación cuántica? Paradoja de lo que se viene encima

Nuevos estudios sísmicos en los emplazamientos de las centrales nucleares españolas



CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

TRABAJA CON NOSOTROS

El CSN convoca nuevas plazas para el cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica

Más información en www.csn.es

En *Radiaciones*, los diarios que Ernst Jünger escribió entre 1939 y 1948, el escritor hizo brotar, con la pulcritud de una intervención quirúrgica, el abismo insondable de la naturaleza humana. El entomólogo construyó un relato revelador, profuso en confesiones íntimas y reflexiones sobre el destino: «En la historia las ideas no se propagan en línea recta. Por sí mismas desarrollan las fuerzas que le son contrarias, de igual modo que la pesa del reloj [...]. Con esto se restablece el equilibrio; se evita que las formas correspondientes a las ideas crezcan hasta alcanzar proporciones monstruosas o permanezcan fijas en ellas».

Con este aliento se presenta una nueva edición de *Alfa*. En las páginas se aglutinan ideas expresadas por expertos, conceptos que, en algunas cuestiones, plantean la eficaz concepción de los contrapesos a los que alude Jünger. Y por este rumbo transita el artículo sobre la aplicación de la inteligencia artificial en el sector nuclear, donde tienen cabida las ventajas que puede aportar esta tecnología, pero también se advierte de los riesgos que conllevaría un uso inadecuado.

Las opiniones sobre la computación cuántica resultan fascinantes en boca de los investigadores consultados. El provocativo uso de la expresión «supremacía cuántica» ha abierto una carrera entre los dos paradigmas de computación, pero los métodos clásicos han mejorado tanto que los caminos se estrechan cada día más. Quizás el futuro pase por una computación clásica de inspiración cuántica. Veremos.

La investigación sobre el cáncer continúa siendo un reto científico que cabe abordar sin cortapisas. El artículo «Apuntar a la diana del cáncer» reúne las aportaciones de tres investigadores con metodologías innovadoras que alientan un futuro más esperanzador.

Los artículos técnicos abordan la evaluación de los riesgos en centrales nucleares asociados a fenómenos naturales extremos y el Carné Radiológico Digital, un instrumento que redunda en el plan de actuación en tecnologías de información y comunicación (TIC) del CSN y contribuye a mejorar la seguridad nuclear y la protección radiológica.

El espacio destinado a entidades está dedicado al Centro Común de Investigación de Karlsruhe cuya misión es aportar pruebas científicas y contribuir al desarrollo de las políticas comunes en seguridad nuclear de la UE.

El juego alambicado entre ciencia y cultura se abre con la entrevista al paleoantropólogo José María Bermúdez de Castro, miembro de la Real Academia Española. Sus sabias palabras: «la evolución humana me ha enseñado mucha humildad» dejan al trasluz años de investigación sobre nuestra especie y otorgan un puesto de honor a las acepciones de los términos científicos en el ámbito lingüístico. Al hilo de esta compleja simbiosis entre ciencia y literatura surge el artículo «Entre lo imaginable y lo posible», un recorrido en el que científicos y humanistas persiguen el mismo anhelo: comprender la complejidad del universo.

Las páginas se despliegan para reivindicar la figura de Lise Meitner, injustamente denostada por las circunstancias que le tocó vivir. Considerada por Einstein como la «Curie alemana», fue la primera persona en describir el proceso de fisión nuclear. Su trabajo es una fuente de inspiración ante un mundo que inquieta.

En el ensayo *La paz*, Jünger, y oficial del ejército alemán, describió los horrores de la guerra. La visión se zanja con estas palabras: «Para que haya paz no basta con no querer la guerra. La paz auténtica supone coraje, un coraje superior al que se necesita en la guerra; [...]. Y ese poder lo adquirimos cuando sabemos apagar dentro de nosotros el fuego rojo que allí arde y desprendernos, empezando por las cosas propias, del odio y de la división que el odio trae consigo». ■

ALFA

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN

Número 59
Septiembre 2024

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C125445

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
Manuel Lozano Leyva

Comité de Redacción
J. Pedro Marfil Medina
Natalia Muñoz Martínez
Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Verónica Crespo Val
Manuel Luis Lozano Leyva
Ana Martínez Fernández

Edición y distribución
Consejo de Seguridad Nuclear
C/ Pedro Justo Dorado
Dellmans, 11 · 28040 Madrid
Tel. 91 346 01 00
peticiones@csn.es
www.csn.es

Coordinación editorial
Editorial MIC · 987272727
www.editorialmic.com

Fotografías
CSN, Editorial MIC, OIEA, LSC, Fundación Starlight, Envato.

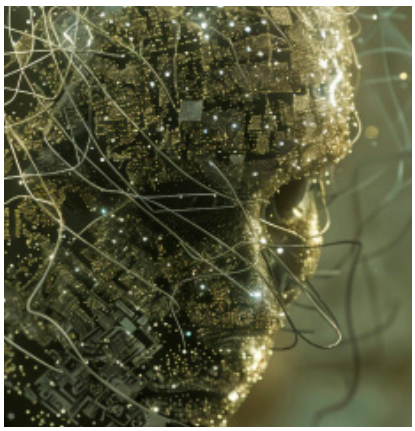
Impresión
Editorial MIC · 987272727
www.editorialmic.com
Impresión 100% ecológica

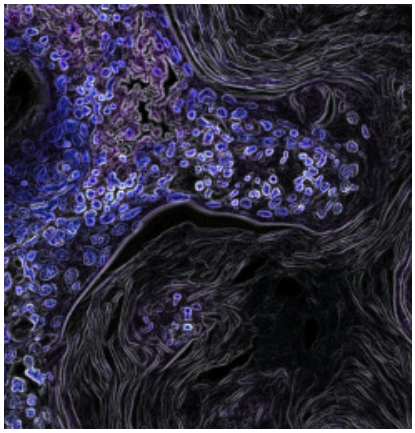
Fotografía de portada
Proyecto de computadora cuántica universal / Google

D.L.: M-24946-2012
ISSN-1888-8925

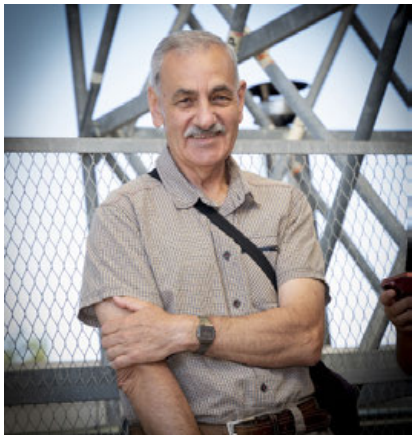
© Consejo de Seguridad Nuclear

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









EN PORTADA

6 **IA nuclear, ventajas prometedoras y retos pendientes**

La inteligencia artificial mantiene importantes sinergias con la tecnología nuclear y sus aplicaciones llegan a ámbitos como la medicina, la energía eléctrica o la protección radiológica

REPORTAJES

14 **Apuntar a la diana del cáncer**

La revolución que supuso la radioterapia deja hueco a nuevas técnicas que dibujan un futuro incierto, pero esperanzador

20 **De qué hablamos cuando hablamos de computación cuántica**

Impacto para la sociedad y paradoja de lo que se viene encima

ENTREVISTA

26 **José María Bermúdez de Castro**

«La ciencia, por mucho que avance, no puede atajar todos los problemas de la humanidad»

ARTÍCULOS TÉCNICOS

30 **Nuevos estudios sísmicos en los emplazamientos de las centrales nucleares españolas**

Enfoque regulador sobre riesgos en las instalaciones ante estos fenómenos

39 **Carné Radiológico Digital**

Digitalización del documento individual de seguimiento radiológico que se utiliza en España desde 1990 como instrumento para el registro de datos

CIENCIA Y LITERATURA

46 **Entre lo imaginable y lo posible**

La ciencia siempre ha estado ligada a la literatura tanto en obras de ficción como en ensayos y obras divulgativas

RADIOGRAFÍA

52 **Portal Educativo de Protección Radiológica**

Materiales para la enseñanza y estudio en el ámbito de la protección radiológica

CSN I+D

54 **Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible tolerante a accidentes (ATF)**

ENTIDADES

56 **Centro Común de Investigación de Karlsruhe**

Eje central de la investigación nuclear europea

CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

60 **Lise Meitner y la fisión nuclear**

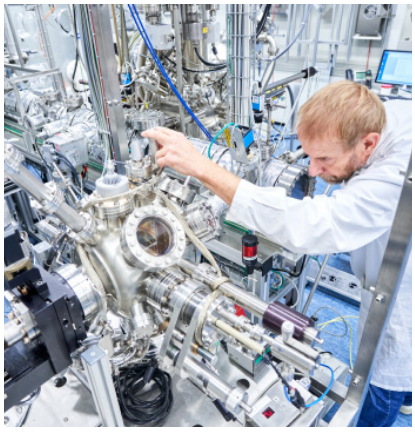
Fue la primera persona en describir el proceso de fisión nuclear y pionera en el estudio de la radiactividad. Además, junto con Otto Hahn descubrió el elemento 91: el protactinio

65 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Últimas publicaciones**









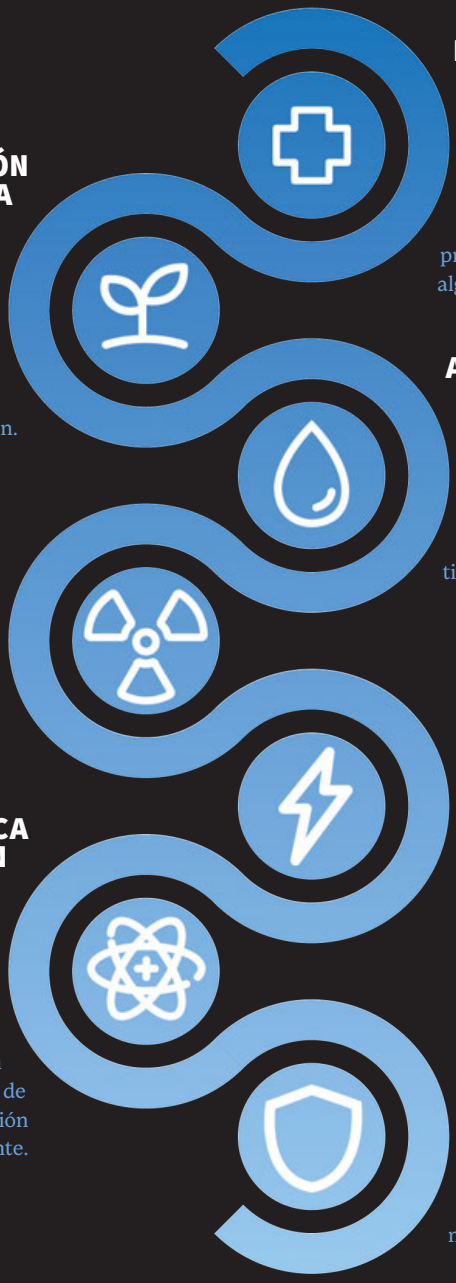
IA nuclear
ventajas prometedoras y retos pendientes



La convergencia entre ciencia nuclear e inteligencia artificial (IA) está generando una poderosa sinergia que aprovecha las capacidades de la IA para mejorar la tecnología nuclear: desde la seguridad y el diseño de los reactores, hasta la gestión de residuos y la investigación en el campo de la fusión. El futuro parece alentar ventajas prometedoras, pero también retos y riesgos importantes.

Texto: **Víctor Santiago Vélez** | Fotos: **Envato**

El profesor de la Universidad de San José (California) y experto en IA, Ahmed Banafa, se refiere a la «IA nuclear» en el *Open Mind* del BBVA para definir la convergencia entre inteligencia artificial y tecnología nuclear. En su opinión, las principales ventajas de la «IA nuclear» pasan por la mejora de la seguridad a través de sistemas de mantenimiento predictivo basados en IA que puedan predecir fallos y reducir la probabilidad de accidentes y algoritmos de aprendizaje automático pueden detectar anomalías en tiempo real; la generación eficiente de energía limpia, mejorando la eficiencia de las plantas de energía nuclear e incrementando la producción energética; la gestión de residuos, facilitando el desarrollo de métodos de eliminación más seguros e identificando posibles emplazamientos donde ubicar depósitos de residuos nucleares en función de factores geológicos y medioambientales; la aceleración de la investigación en fusión nuclear, ayudando a analizar ingentes volúmenes de datos de los



MEDICINA

Favorece al diagnóstico y tratamiento de enfermedades. En el cáncer, por ejemplo, sirve a los oncólogos para planificar una radioterapia adaptativa a cada paciente. También resulta clave en la investigación de enfermedades zoonóticas, ayudando a predecirlas y contener brotes, accidentes y algoritmos de aprendizaje automático.

AGUA Y MEDIOAMBIENTE

La hidrología isotópica estudia el ciclo hidrológico y los movimientos del agua, sirviéndose de IA para analizar ingentes cantidades de datos que ayudan en la toma de decisiones fundamentadas, en un planeta con los recursos hídricos muy comprometidos por el cambio climático.

ENERGÍA ELÉCTRICA

Permite crear simulaciones digitales de instalaciones nucleares reales para optimizar procesos industriales complejos y mejorar el rendimiento, diseño y costos de los reactores. Además, contribuye a monitorizar centrales y detectar anomalías.

SALVAGUARDIAS

Se sirven de grandes cantidades de datos, recogidas por satélites, videovigilancia o muestreo ambiental, que pueden ser analizadas mediante herramientas IA y facilitar el trabajo de los inspectores con la mejora constante de esta tecnología.

SEGURIDAD FÍSICA NUCLEAR Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Analiza datos de los sistemas de detección de radiaciones para perfeccionarlos y revela fallos para que una instalación nuclear no sea víctima de ciberataques. También se integra en programas informáticos de protección radiológica, para preservar la salud de millones de trabajadores expuestos a radiación ionizante.

ALIMENTACIÓN Y AGRICULTURA

Mejora el diseño de sistemas de alimentación más sostenibles para combatir la inseguridad alimentaria y hacer frente al cambio climático y a procesar datos con los que mejorar el rendimiento de los cultivos, optimizar el riego o rehabilitar terrenos expuestos a la radiación.

FUSIÓN NUCLEAR

Ayuda a los expertos a resolver problemas complejos y a gran escala, especialmente en simulaciones y modelos de experimentos.

Actuales aplicaciones de la IA con el uso de la tecnología nuclear. Fuente: OIEA. Elaboración propia.

experimentos de fusión nuclear, y por último, el cumplimiento normativo, con la automatización de análisis de datos y la generación de informes que ayuden a cumplir las normas en materia de seguridad y medioambiente.

Por otro lado, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) relaciona actuales aplicaciones de la IA con el uso de la tecnología nuclear que afectan a sectores diversos, tal como se muestra en la infografía superior.

Dada la innegable convergencia entre IA y tecnología nuclear, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) constituyó un grupo técnico para seguir el desarrollo de las aplicaciones de IA en seguridad nuclear y evaluar la posibilidad de introducirlas en su propia regulación. Como explica el consejero del CSN, Francisco Castejón, el «paso fundamental» es permitir que la IA opere un reactor nuclear «sin estar sometida a errores humanos y con todo el aprendizaje de la experiencia operativa como bagaje integrado en el proceso de toma de decisiones. Para dar este paso se hace imprescindible una serie de requisitos de seguridad de todos los equipos que sustentan la IA, así como de los resultados del

algoritmo que aún no están al alcance de la mano. Lo más sensato es hacer una transición gradual que abra paulatinamente nuevas áreas de aplicación de la inteligencia artificial».

Por su parte, José Antonio Rodríguez Díaz, experto del Área de Experiencia Operativa y Normativa del CSN, considera que un programa de IA sí podría operar, con la supervisión de los técnicos, un reactor nuclear. De hecho, aunque no sea exactamente esta tecnología, muchos procesos corrientes de las centrales ya están controlados por programas informáticos y los operadores vigilan que todo funcione de forma adecuada. «Sin embargo, en caso de accidente, los procedimientos no siempre se pueden aplicar en unos tiempos determinados. En estos casos, hay guías que deben ser valoradas por operadores entrenados que deciden qué medida tomar y en qué momento es adecuado realizar las maniobras», puntualiza Rodríguez Díaz.

Aliado o amenaza

Aunque quizá sea demasiado pronto para dejar que la IA opere un reactor nuclear, hay expertos que consideran que es hora de avanzar en esta línea, al entender que la IA será positiva para la seguridad nuclear y para otras disciplinas que requieran un manejo inteligente de un gran número de datos, siempre que se use con sentido común y se realicen las pruebas y comprobaciones necesarias antes de dejar que la IA opere por sí misma en un área.

Aunque el principio de prudencia sea generalizado, el número de ataques no ha aumentado y la eficacia de las medidas defensivas «está perfectamente demostrada». En todo caso, el uso de IA basada en grandes dispositivos de cálculo y repositorios de datos requerirá de nuevas medidas de protección.

Para Francisco Castejón, los problemas «vienen de la falta de regulación y de control de estas actividades por parte de las autoridades». Por ello, el papel de los supervisores y los reguladores resulta clave para graduar el ritmo de penetración de esta tecnología tanto en la seguridad nuclear como en otras áreas críticas. El uso de la IA en los diferentes procesos relacionados con la seguridad nuclear debe ser regulado basándose en los datos existentes y en las experiencias que se vayan desarrollando. Su despliegue, y esto puede valer también para otras actividades humanas críticas, debería permitirse en la medida que se tiene certeza de que el funcionamiento de los algoritmos y del *hardware* que los sustenta tiene un funcionamiento



La IA será positiva para la seguridad nuclear, como para otras disciplinas que requieran un manejo inteligente de un gran número de datos, siempre que se use con sentido común y se realicen las pruebas y comprobaciones necesarias antes de dejar que la IA opere por sí misma en un área



El uso inadecuado de la «IA nuclear» puede tener graves consecuencias e incluso provocar situaciones catastróficas

Permanecer alerta

La integración de la IA en el ámbito nuclear presenta ciertos riesgos que hacen imprescindible el principio de prudencia. Los expertos apuntan a una inserción gradual que minimice las probabilidades de usos inadecuados y a permanecer alerta ante los riesgos y retos que se derivan de su aplicación. Según el profesor de la Universidad de San José (California), Ahmed Banafa, pueden concretarse en los siguientes:

- **Privacidad y seguridad de los datos:** los algoritmos de IA requieren enormes volúmenes de datos para aprender y realizar predicciones precisas; pero, en el sector nuclear, la información sensible sobre el diseño de reactores, operaciones y medidas de seguridad debe estar protegida frente a agentes maliciosos que se aprovechan de las vulnerabilidades.
- **Sesgos e incertidumbre:** los sistemas de IA pueden aprender involuntariamente sesgos presentes en los datos utilizados para entrenarlos. En las operaciones nucleares, las decisiones sesgadas pueden acarrear graves consecuencias de seguridad y medioambientales.
- **Interacción personas-IA:** a medida que esta tecnología se integra en las operaciones nucleares, es necesario garantizar el entendimiento entre las personas y la IA para evitar malentendidos y errores.
- **Consideraciones éticas:** la aplicación de IA plantea dudas éticas en torno a la responsabilidad, la transparencia y la toma de decisiones. Por ejemplo, ante un error fatal u operaciones nucleares de alto riesgo.
- **Obstáculos reglamentarios:** demostrar la seguridad y fiabilidad de los sistemas basados en IA ante los organismos reguladores puede ser un proceso largo y difícil.

seguro garantizado. Para ello, son necesarias experiencias limitadas e impulsar la investigación para conocer a este nuevo aliado.

El uso inadecuado de la «IA nuclear» puede tener graves consecuencias e incluso provocar situaciones catastróficas: sistemas de IA mal diseñados o implementados podrían desencadenar, por ejemplo, reacciones nucleares, fusiones o fugas radiactivas; la IA podría utilizarse para acelerar el desarrollo de armas nucleares y aumentar la proliferación nuclear o el riesgo de conflicto; los sistemas de IA que controlan los activos nucleares podrían ser vulnerables a ciberataques si no están debidamente protegidos; la excesiva dependencia de sistemas de IA autónomos podrían reducir la participación y la supervisión humanas, circunstancia que dificultaría el mantenimiento del control sobre las operaciones nucleares, etc.

Estos inconvenientes, a su vez, podrían socavar la cooperación internacional en iniciativas de desarme nuclear y provocar mayor inestabilidad mundial o posibles carreras nucleares. Por no hablar de posibles dilemas éticos sobre la responsabilidad en caso de catástrofes provocadas por las decisiones de la IA o problemas legales relativos a las obligaciones y la culpabilidad.

Para atenuar estos riesgos es fundamental garantizar la aplicación de una regulación rigurosa, una labor de vigilancia y un uso responsable de la IA en operaciones nucleares. La cooperación internacional y el cumplimiento de principios éticos son esenciales para protegerse frente al uso inadecuado de la IA nuclear, así como para promover la seguridad y la estabilidad mundiales.

En este sentido, el OIEA organiza foros interdisciplinares en los que expertos y profesionales intercambian posturas y colaboran para promover el buen uso de la IA nuclear. En su plataforma *AI for Atoms*, divulga información y promueve alianzas para la adecuada convivencia entre la IA y la tecnología nuclear. Entre ellas, destaca la cooperación con la Unión Internacional de Telecomunicaciones, el Grupo de Trabajo Interinstitucional de Naciones Unidas sobre Inteligencia Artificial y decenas de organismos de las Naciones Unidas.



El Proyecto CERO «contribuirá a mejorar el conocimiento de la experiencia operacional compartida, ayudando a prevenir futuros incidentes»

Aprendiendo del pasado

El CSN participa en diversas iniciativas relacionados con IA. Cabe destacar el proyecto para utilizar bases de datos heterogéneas, que precisa el uso de IA en materia de seguridad nuclear y está enfocado en la experiencia operativa, que consiste en acumular conocimiento de incidentes ocurridos en centrales nucleares de todo el mundo y cómo se han solucionado.

El proyecto, denominado Inteligencia Artificial para la extracción de Conocimiento de la Experiencia Operativa (Proyecto CERO), está subvencionado por el CSN y persigue dos objetivos principales: el primero consiste en el desarrollo de un buscador que, mediante la descripción narrativa de un incidente en un momento dado, permita encontrar sucesos similares en bases de datos históricas, con efectos preventivos –aprendiendo del histórico– y reactivos –comprobando en tiempo real si han ocurrido fallos que puedan ser equivalentes–; el segundo pretende la puesta en marcha de una herramienta de agrupamiento que calcule y muestre de forma amigable grupos de sucesos similares. Esta funcionalidad tendría un carácter fundamentalmente preventivo y prestaría apoyo técnico para entender mejor los incidentes pasados y, así, definir mejor las respuestas y estrategias de protección en el futuro.

Según el CSN, el Proyecto CERO «contribuirá a mejorar el conocimiento de la experiencia operacional compartida, ayudando a prevenir futuros incidentes». Para Rodríguez Díaz, el objetivo es aprender de los errores propios y ajenos, y hacer análisis más allá de la razón directa de un suceso –como podría ser el fallo de un equipo– y encontrar las causas raíz –problemas de organización, formación o garan-



tía de calidad– para corregirlas y minimizar riesgos en las plantas. «Disponiendo de una herramienta de IA bien diseñada, se puede obtener mucha más información para hacer estos análisis de causa raíz más completos, reduciendo los tiempos de búsqueda y cribado de sucesos similares, por lo que supondrá un gran avance en este sentido», asegura.

El propósito del CSN pasa por probar estas funcionalidades «de forma pausada» para verificar su utilidad. De este modo, el Consejo tendrá a su disposición una serie de herramientas digitales que faciliten la búsqueda de incidencias y la asociación de las mismas mediante la combinación de IA y lenguaje natural. Los resultados de Proyecto CERO posibilitarán la búsqueda sencilla y efectiva de sucesos, siempre con la posibilidad de filtrar resultados según variables como el tipo de central nuclear, su potencia o la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos.

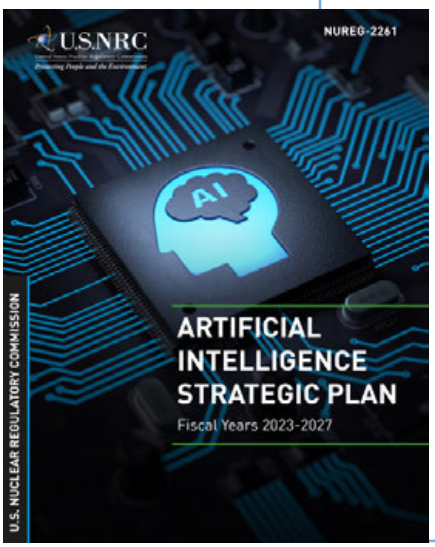
El CSN lleva tiempo apostando por iniciativas de I+D+i relacionadas con IA. En la convocatoria de 2022 ya aparecía un proyecto de la Universidad Complutense de Madrid dirigido al análisis de datos de realidad virtual para la formación en emergencias radiológicas y otros dos de la Universitat Politècnica de València: uno para introducir mejoras en las nuevas técnicas de inteligencia artificial para la detección de anomalías en reactores nucleares y otro para el diseño optimizado del patrón de carga del núcleo de reactores de agua ligera (LWR) asistido por IA. En relación al Proyecto CERO, el CSN también ha impulsado una propuesta para gestionar el envejecimiento de los componentes. ■

Programas a escala internacional

La Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC) ha elaborado un plan estratégico para 2023-2027 que se concreta en cinco puntos: garantizar la preparación para la toma de decisiones regulatorias, establecer un marco organizativo para revisar las aplicaciones de IA, fortalecer y ampliar las asociaciones entre esta tecnología y la seguridad nuclear, cultivar una fuerza laboral competente en estos ámbitos y buscar casos de uso para construir bases de inteligencia artificial en toda la NRC.

El plan, de implantación progresiva, persigue la preparación continua del personal para revisar y evaluar las aplicaciones de IA de manera eficiente y segura. En este sentido, el organismo norteamericano aboga por «garantizar que el uso de nuevas tecnologías sea seguro y protegido», dando por hecho que la IA «tiene el potencial de mejorar la seguridad de las instalaciones nucleares».

La NRC también está poniendo en marcha una experiencia piloto para planificar sus inspecciones mediante *machine learning*, una rama de la IA que refleja la capacidad de la máquina de aprender por sí sola a partir de los datos que va adquiriendo y analizando. Se trata de un estudio de viabilidad sobre al empleo de este aprendizaje automático para identificar patrones ocultos en cuestiones relativas a la seguridad nuclear. El programa persigue, por un lado, la evaluación de plataformas de IA y *machine learning* de multinacionales como Amazon, Google o Microsoft y, por otro, maximizar el uso de algoritmos previamente entrenados. Las primeras conclusiones apuntan que estos algoritmos son de utilidad para generar resúmenes de interés en operaciones nucleares, pero que se necesitan esfuerzos adicionales para seguir optimizando estos procesos.



Plan estratégico para 2023-2027 de la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos

PALABRAS CLAVE PARA UNA RESPUESTA RÁPIDA A SUCESOS NUCLEARES

Kampal colabora con el CSN en Proyecto CERO, una iniciativa que se sirve de IA para el desarrollo de una herramienta que rastrea bases de datos históricas con el fin de optimizar la reacción ante posibles contratiempos en las centrales

El Proyecto Inteligencia Artificial para la extracción de Conocimiento de la Experiencia Operativa (Proyecto CERO) ha sido subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) en su convocatoria para la realización de actividades de investigación y desarrollo. Kampal Data Solutions es la empresa que está detrás de este programa y ha establecido un plan de trabajo en cuatro fases para el desarrollo de un buscador que, dada la descripción narrativa de un incidente en una central nuclear, permita encontrar sucesos similares en bases de datos históricas y una herramienta de agrupamiento que calcule y muestre de forma amigable grupos de incidentes parecidos.

David Íñiguez, doctor en Ciencias Físicas, es el investigador principal y coordinador del Proyecto CERO, en el que también participan doctores y expertos como Juan Luis Durán, César Queral, Alfonso Tarancón o Kevin Fernández-Cosials. El equipo considera que los sucesos en centrales nucleares recogen una ingente cantidad de datos —referentes a incidencias, causas o soluciones— que es difícil de ser integrada para que los técnicos extraigan conclusiones con las que mejorar las decisiones en potenciales incidentes. «Es precisamente la capacidad de integración de todos estos datos y la extracción de correlaciones y conclusiones lo que caracteriza a las actuales herramientas de inteligencia artificial. Se puede entrenar a la IA para que sea capaz de aprender todos los datos, almacenarlos, correlacionarlos e incluso indicar posibles riesgos a partir de datos actuales», explican.

El primero de los paquetes de trabajo engloba la identificación de requisitos, el análisis de las potenciales fuentes de datos y la importación y procesamiento de datos. Después de asentar estos cimientos, se pasará al desarrollo de un buscador que permita encontrar sucesos similares en bases de datos históricas. Así, se diseñarán algoritmos de IA que ofrezcan una medida de similitud entre sucesos. El profesor Tarancón, catedrático de Física Teórica en la Universidad de Zaragoza, colaborará en esta fase dada su experiencia en el diseño y optimización de algoritmos.

En función del volumen y calidad de los datos, se estudiarán diversos tipos de algoritmos para determinar la similitud entre dos sucesos o respecto a un texto insertado libremente en el buscador. En la segunda fase del proyecto se evaluarán algoritmos de aprendizaje supervisado basados en redes neuronales, localizando características que posibiliten su clasificación y, en el caso de texto libre, aprendiendo a extraerlas del propio documento. Una vez determinadas las técnicas y algoritmos de IA que se van a emplear, deben integrarse y programarse para conformar los modelos propiamente dichos e implementarlos en códigos que permitan su posterior ejecución. Para la validación de los resultados y el ajuste de los modelos se recurrirá a expertos en seguridad nuclear del CSN y a los profesores Queral, doctor en Física, y Fernández-Cosials, doctor en Ingeniería Nuclear.

El tercer paquete de trabajo consistirá en el desarrollo de la herramienta de agrupamiento, basada en algoritmos de IA para encontrar equivalencias entre sucesos. De esta manera se creará una red cuyos nodos sean cada uno de los sucesos históricos y que se representará en forma de grafo, apareciendo más próximos los pares de eventos similares. Del mismo modo, para una visión complementaria, se construirá una red de similitudes de centrales nucleares con base en la experiencia operativa.

Por último, en la última fase, se integrarán los modelos del segundo y el tercero de los paquetes de trabajo en una aplicación web que permita su uso temporal por parte del CSN para analizar de forma pausada y concienzuda su funcionamiento y la utilidad de los algoritmos de IA que han sido implementados. Este cuarto paquete incluye la difusión del proyecto y la formación del personal del CSN.

Buscador con «visión global»

El Proyecto CERO incorpora los últimos avances en IA para ayudar al grupo humano responsable de estos procesos en las centrales nucleares y que cuente con «una visión global del conjunto de incidentes». Para el desarrollo del buscador de incidentes nucleares en las bases de datos históricas y la herramienta de clusterización se analiza todo el texto de los informes correspondientes, elaborados por personal de la planta, de la ingeniería de apoyo y del organismo regulador, para extraer un conjunto de palabras clave que permitan asociar «incidente-clave». «Esto hará posible un buscador donde, al introducir unas palabras clave o un texto libre, el sistema informe de incidentes relacionados, estadísticas del conjunto, correlaciones o sucesos comunes», subraya el equipo.

Una vez que las herramientas estén desarrolladas, se pondrá en marcha una prueba de concepto para demostrar su utilidad y que el personal acceda a la información de sucesos históricos de forma rápida y precisa. El proyecto dio sus primeros pasos a finales de 2023 y tiene una duración de dos años.

Según los responsables del programa, se está finalizando el desarrollo del ETL (extracción, transformación y carga), en el que se toman los datos de diversas fuentes, se normalizan en un único formato y se cargan en una base de datos propia. Antes, tuvieron que descargar y procesar



Equipo investigador del Proyecto Cero

miles de informes de las últimas décadas, en inglés y en español, relativos a incidentes en centrales nucleares. Algunos estaban disponibles en «formatos algo inconsistentes» o eran documentos escaneados, por lo que fue necesario tratarlos con herramientas de lexicalización y corrección gramatical para corregir errores de lectura. A continuación, se emplearon técnicas estadísticas para identificar y ordenar palabras clave en cada informe. El proceso utilizó la medida numérica TF-IDF, que valora la importancia de una palabra dentro de un documento con base en la frecuencia con que aparece.

Kampal cuenta ya con una base de datos propia con miles de incidentes, clasificados según criterios como el tipo de reactor y con una serie de palabras clave asociadas que identifican los componentes y sistemas involucrados, así como los sucesos más relevantes dentro de la narrativa del incidente o las medidas que se aplicaron. «Como parte de este proceso, se han realizado unas primeras evaluaciones de los datos y aplicado técnicas estadísticas que serán parte integral del sistema final. Los resultados en estos aspectos han sido completamente satisfactorios», asegura David Íñiguez.

En la siguiente fase, buscarán encontrar correlaciones entre distintos incidentes, patrones repetidos que sirvan para identificar puntos críticos para que se produzca un problema determinado. Un proceso en el que Kampal ya tiene experiencia, al desarrollar aplicaciones similares para bases de datos científicas.

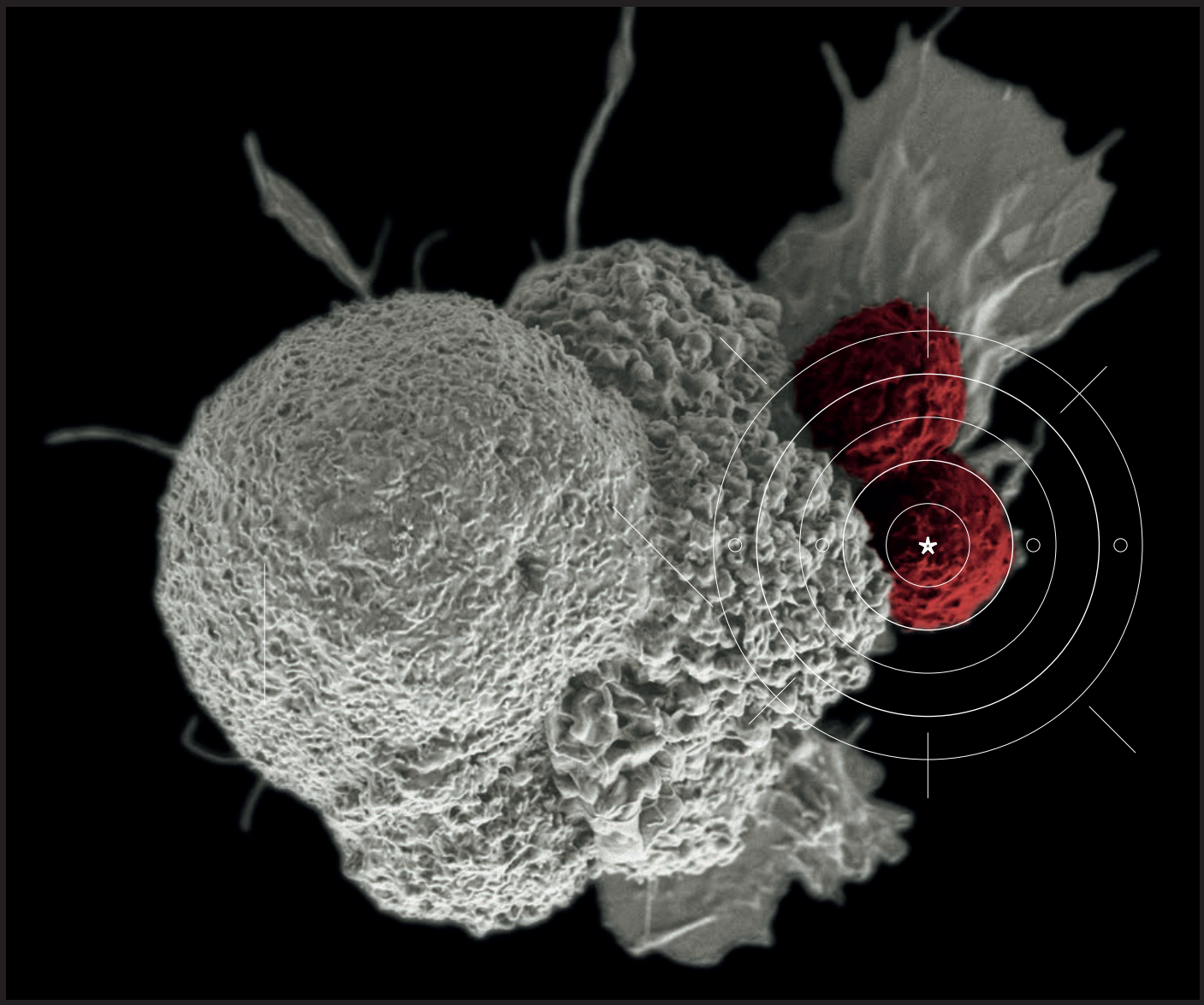
Asistente humano

El principal rol de la IA en el Proyecto CERO «no es que tome decisiones autónomas, sino que ayude a los humanos a tomarlas». «Tampoco se pretende reemplazar las metodologías ya existentes, sino complementarlas y optimizarlas», añaden.

Una labor de asistente en la que resulta fundamental categorizar los incidentes con las palabras clave, para que el operario de carne y hueso localice información relevante al introducir búsquedas de problemas concretos. Por ejemplo, que al buscar «sistema de ventilación» encuentre incidentes relacionados, causas y soluciones. Esto es algo que, evidentemente, tiene aplicaciones tanto preventivas como correctivas.

Según Íñiguez, los procesos basados en IA deben entenderse «como una ayuda para la toma de decisiones por parte de los grupos humanos». De hecho, el equipo advierte que la inteligencia artificial «no viene sin una probabilidad de error y hay que tener en cuenta el impacto potencial de cada sistema antes de decidir si utilizarlo de manera autónoma o no». En este sentido, aseguran que «serán las personas las responsables absolutas de todas las decisiones significativas. Complementan el trabajo humano, pero no lo sustituyen. La inteligencia artificial puede ser una gran herramienta, y no una amenaza, cuando se utiliza conociendo sus puntos débiles».

Para los integrantes del Proyecto CERO, es innegable que la IA vaya ganando peso en el apoyo de la gestión de instalaciones nucleares, pero consideran que la presencia humana «siempre será imprescindible» en la toma de decisiones relevantes.



Apuntar a la diana del cáncer

Saber por qué se producen metástasis y cómo evitarlas, desarrollar diagnósticos más precisos y probar nuevas herramientas para tratar el cáncer de forma personalizada son los principales ámbitos de la investigación actual, unas veces con descubrimientos reveladores y otras, con la sensación de caminar en bucle. Se trata de una carrera de fondo, donde la revolución que supuso la radioterapia deja hueco a nuevas técnicas que persiguen apuntar mejor a la diana. El futuro es incierto, pero esperanzador.

Texto: **Cecilia Ordás** | Fotos: **LSC**

SUMARIO

Angelita Rebollo García es doctora en Biología, colaboradora del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y directora de investigación del Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale de Francia (Inserm). Lleva lustros investigando sobre el cáncer. En concreto, el carcinoma de mama triple negativo, muy agresivo y con pocas probabilidades de curación. Su centro de operaciones está ubicado en la Unidad de Tecnologías Químicas y Biológicas para la Salud de la Universidad de París. Junto con su equipo, ha desarrollado la molécula PEP-010, un péptido penetrante que actúa de base en un nuevo y esperanzador tratamiento. Su singularidad es que ataca las células cancerígenas respetando las sanas. Así es la «magia» de la biotecnología.

«Este péptido terapéutico bloquea la interacción entre dos proteínas que están desreguladas en cáncer. A este péptido le hemos añadido una secuencia de penetración que permite dirigirlo exclusivamente a células tumorales, con lo que aumentamos la eficacia, disminuimos la toxicidad y la cantidad de péptido que debemos administrar para un efecto terapéutico óptimo», expone la investigadora leonesa establecida en Francia.

De momento, la carrera sigue a buen ritmo: «estamos terminando la primera fase del ensayo clínico. El péptido terapéutico PEP-010 se va a proponer en el cáncer de ovario y páncreas, donde se ha observado una remisión tumoral muy importante en los pacientes tratados», afirma.

Cuando se habla de investigación, una puerta abre otra. Siempre hay habitaciones en las que penetrar para encontrar algo que se precisa en la siguiente expedición. «Siguiendo la misma estrategia que en el caso anterior, hemos patentado otro péptido terapéutico para la enfermedad de Parkinson. En estos momentos, lo estamos probando en monos en los que se inducen los síntomas de la enfermedad», precisa Rebollo.

La senda de la investigación

Que la investigación cura es una frase muy presente para Enrique de Álava, jefe del Servicio de Anatomía Patológica en el Hospital Universitario Virgen del Rocío y profesor de la Universidad de Sevilla. «Actualmente hay líneas de investigación muy interesantes. Una es saber por qué se producen las metástasis y qué podríamos hacer para evitarlas. Son investigaciones básicas que nos ayudan a conocer el porqué. Otro gran grupo de investigaciones se centra en cómo hacer un diagnóstico más preciso. El cáncer no es una sola enfermedad, sino un grupo. Por eso el diagnóstico trata de ponerle nombre y apellidos. Otra línea de investigación es la clínica, sobre todo en los hospitales y centros de salud, donde están probando nuevas herramientas para tratar el cáncer de manera diferente; pero ese tratamiento preciso no funcionaría si no hubiera un diagnóstico de precisión, que es el paso anterior. Y todo eso tampoco funcionaría si no existiera un conocimiento básico o fundamental que intentara responder a las grandes preguntas del porqué. En definitiva, hay tres grandes tipos de investigación: la básica, la del diagnóstico de precisión y la de las terapias de precisión en el cáncer», explica.

Precisamente, Rebollo hace hincapié en las investigaciones dirigidas a la identificación de moléculas que funcionan contra la mutación de los oncogenes: «hoy en día hay tratamientos contra el cáncer dirigidos a mutaciones específicas presentes en los cánceres y esos tratamientos se pueden usar en cualquier paciente con esa mutación específica. Este tipo de terapias dirigidas usan pequeñas moléculas o anticuerpos monoclonales».

Y respecto a la mejora en la precisión de diagnósticos que apuntaba Enrique de Álava, la jefa de la Unidad de Imagen Molecular del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), Francisca Mulero, destaca que la inteligencia artificial y el *machine learning* «están revolucionando la interpretación de imágenes médicas». De este modo, estos avances tecnológicos están mejorando la detección temprana de signos de cáncer y permitiendo prever la evolución de los tumores con mayor precisión.



ANGELITA REBOLLO

El péptido terapéutico PEP-010 se va a proponer en el cáncer de ovario y páncreas, donde se ha observado una remisión tumoral muy importante en los pacientes tratados

En todo caso, se trata de una carrera a largo plazo. «Muchos tumores se pueden curar con herramientas sencillas. Las herramientas más modernas ayudan a curar más tipos, pero algunos cánceres son particularmente agresivos. Lo que se busca es parar la enfermedad o hacerla crónica, con un tratamiento que dure toda la vida, como ha sucedido en enfermedades como el SIDA, que era mortal hace treinta años y hoy se controla con terapias relativamente complejas, pero que la han convertido en una enfermedad crónica. Y luego están los pacientes en los que no podemos ni siquiera cronificar la enfermedad porque es demasiado agresiva. En este caso, tenemos dos misiones:

una, hacer el final de la vida lo más tranquilo, sereno y libre de dolor posible; la otra es investigar», señala Enrique de Álava.

Disparar la flecha

La formación de un tumor se debe a una enrevesada acumulación de mutaciones genéticas que provocan que la célula prolifere indebidamente. La combinación de esas mutaciones y la interacción con las variantes genéticas ya existentes en el paciente determinan el comportamiento del tumor. Saber si va a crecer despacio o deprisa, permanecer en su lugar de origen o desplazarse a otros órganos, si responderá con radioterapia o fármaco o si convendría una cirugía radical es crucial para que el paciente reciba el tratamiento adecuado.

«El cáncer es en realidad un grupo complejo de enfermedades en el que intervienen muchos factores que pueden desencadenarlo: tabaco, alcohol, mutaciones, exposición a agentes químicos y radiaciones, envejecimiento celular, herencia, infecciones, etc. Entre un grupo de personas que padecen el mismo tipo de tumor, la respuesta al mismo tratamiento es muy diferente. Aun siendo optimista, no creo que en los próximos años podamos decir que hemos encontrado una cura definitiva a los más de cien tipos diferentes de carcinomas que existen. Pero, a pesar de esto, hay que ser positivos, ya que desde el año 2000 la Agencia Europea de Medicamentos (EMA) ha aprobado 140 principios activos contra tumores sólidos. Los ensayos clínicos en oncología en España representan alrededor del 36 % del total. Cabe también recordar que en algunos tipos de cáncer la supervivencia está por encima del 90 %. Es importante destacar que la prevención y la detección precoz son dos factores que ayudan a aumentar el porcentaje de supervivencia», argumenta la investigadora de la Universidad de París.

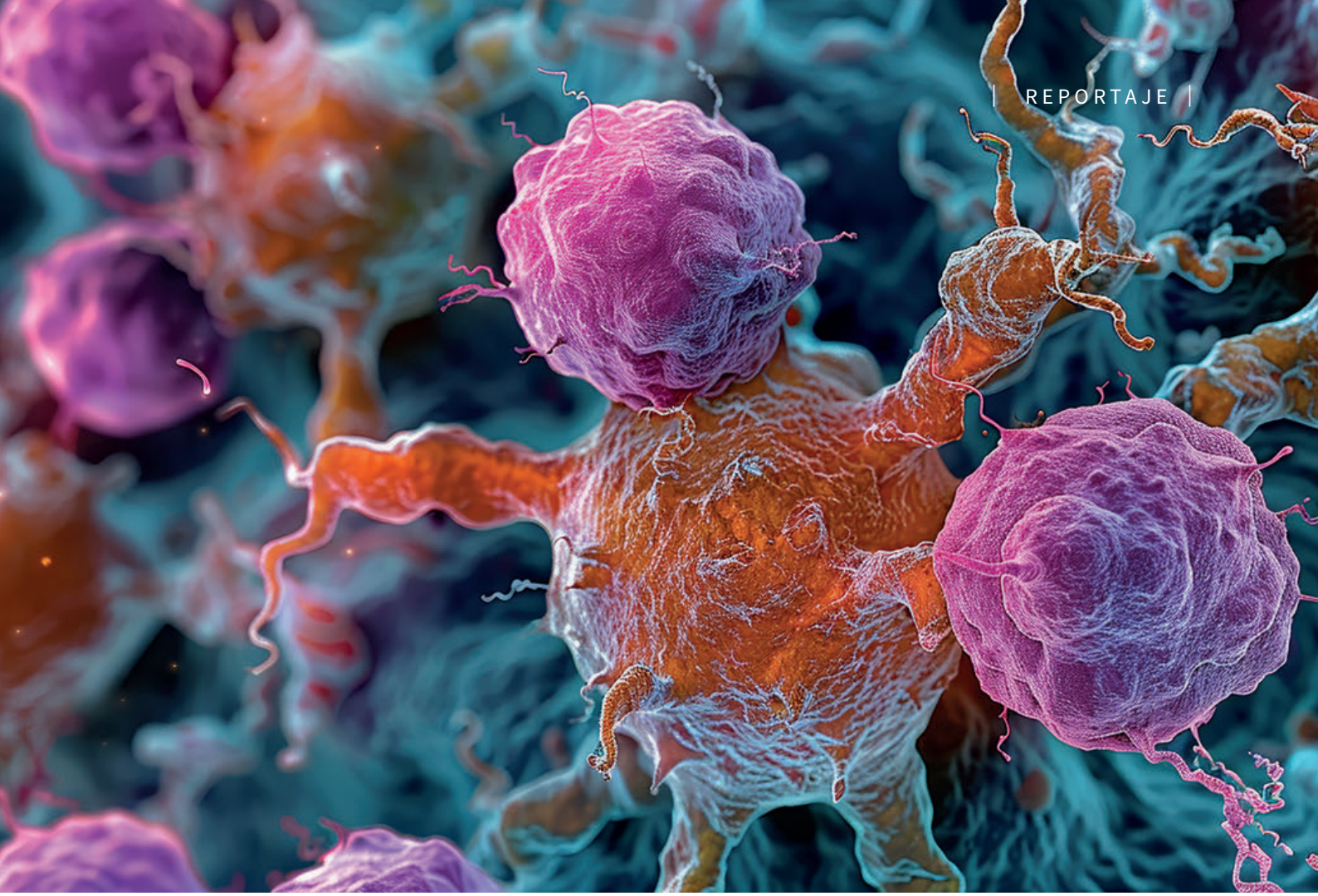
Francisca Mulero coincide con Angelita Rebollo en la complejidad del cáncer y en que tampoco habrá «una sola cura que funcione para todos los tipos de cáncer». Según apunta esta experta, se están abriendo muchos campos

Radioterapia, quimioterapia y cirugía: el efecto sinérgico

En 1901 la radiación revolucionó la medicina cuando se utilizó por primera vez en el tratamiento contra el cáncer. La búsqueda de la piedra filosofal sería dar con la cura revolucionaria que cambie la perspectiva de la enfermedad. «Sin duda, en el tratamiento del cáncer se han hecho avances remarcables: radioterapia, quimioterapia, inmunoterapia, inhibidores de quinasas, radiofármacos, hormonoterapia, terapia génica, CAR-T cells, etc., pero continúa siendo mortal en algunos casos, con tratamientos poco adaptados o resistencia a los mismos. Mi grupo está trabajando en la creación de avatares usando embriones de pez cebra para generar tratamientos personalizados y adaptados a cada cáncer específico», admite la doctora en Biología e investigadora del CSIC, Angelita Rebollo.

A partir de la década de los treinta, la radioterapia resultó clave porque fue la primera gran infraestructura que entró en los hospitales para tratar a los pacientes. «Se ha desarrollado extraordinariamente. En primer lugar, porque puede administrarse de manera muy precisa. Hay herramientas de inteligencia artificial que permiten planificar la radioterapia a la perfección para evitar el daño en los tejidos sanos y concentrar toda la energía en los tejidos tumorales que son los que van a responder fácilmente. Los métodos de planificación, la potencia y la inteligencia artificial han entrado en el tratamiento contra el cáncer de una manera muy clara. En segundo lugar, la radioterapia casi nunca se da sola, sino que se combina con otros tratamientos dentro de pautas de tratamiento complejas, es decir, se combina con quimioterapia que se usa para realizar un control a distancia de la enfermedad para que no avance desde donde está localizada a los tejidos que la rodean, y con la cirugía, con la que se controla también a nivel local. Estas tres herramientas combinadas tienen no tanto un efecto sumativo, sino un efecto sinérgico, es decir, con un poco de cada cosa se consigue un efecto muy grande», señala el jefe del Servicio de Anatomía Patológica en el Hospital Universitario Virgen del Rocío y profesor de la Universidad de Sevilla, Enrique de Álava.

Las líneas de investigación en este ámbito se centran en qué tumores van a responder mejor a la radioterapia y cuáles no. El efecto de la radioterapia sobre el tumor es fundamentalmente a través de la rotura del ADN tumoral, los ácidos nucleicos que gobiernan las células tumorales. «La radioterapia fue revolucionaria hace años; hoy ese hueco de cosas revolucionarias lo ocupa otro tipo de terapias. Por ejemplo, la inmune y la que intenta aprovechar la respuesta inmune, es decir, que trata de reconocer a las células y tejidos extraños para combatirlos. El cáncer suele despertar la inmunidad, pero no siempre es así. Hay terapias que desenmascaran a las células cancerígenas camufladas dentro del tumor, motivo por el que las células inmunes no las reconocen. Para algunos tumores concretos, por ejemplo, los melanomas metastásicos, hay un antes y un después con la inmunoterapia. Es como el papel revolucionario que tuvo la radioterapia hace unas décadas. Por supuesto, sigue siendo tremendamente importante, pero se van sumando otras armas contra las células neoplásicas», matiza el profesor de la Universidad de Sevilla.



de investigación, como terapias CAR-T o inmunoterapias. «Como especialista en imagen molecular, una de las áreas más relevantes en la actualidad es la teragnosis. Esta metodología combina diagnóstico y tratamiento con una sola molécula marcada con diferentes isótopos radiactivos», añade la jefa de la Unidad Molecular del CNIO.

Enrique de Álava apunta también que «en primer lugar, cada tipo de tumor, y son cientos, debe tener un tratamiento concreto. En segundo lugar, se debería concentrar mucho más esfuerzo en la prevención que en el tratamiento. Aplicando bien la prevención tendríamos una prevalencia un 60 % menor. La importancia de conocer las alteraciones moleculares varía según el contexto y está estrechamente relacionada con las características específicas del cáncer, como su tipo y subtipo (su nombre y apellidos). Es como una diana frente a la cual se pueden lanzar fármacos nuevos. Si somos capaces de descubrir la diana en esa célula tumoral y se dispara la flecha adecuada, es posible que se pueda originar una buena respuesta a la terapia. El diagnóstico tiene que ver con identificar las dianas».

Predisposición al cáncer

Algunas alteraciones relacionadas con el desarrollo futuro del cáncer pueden ser útiles para la prevención o para saber si la persona tiene cierta predisposición a tener cáncer. «Hay alteraciones moleculares que no son hereditarias, sino que tienen que ver el con el medioambiente o el estilo de vida. Y ahí son muy importantes los programas de cribado, es decir, buscar a los pacientes antes de que desarrollen el cáncer, como se hace con las mamografías o las revisiones ginecológicas, para descubrir no tanto quién tiene ya una neoplasia, sino quién tiene cierta probabilidad de tenerla para seguirla con más previsión, de manera más continuada y poder ponerle remedio», matiza Enrique de Álava.



ENRIQUE DE ÁLAVA

Lo que se busca es parar la enfermedad o hacerla crónica, con un tratamiento que dure toda la vida, como ha sucedido en enfermedades como el SIDA



PET, imagen de medicina nuclear

La tomografía por emisión de positrones (PET) utiliza pequeñas cantidades de materiales radiactivos denominados radiosondas o radiofármacos, una cámara especial y una computadora para evaluar las funciones de tejidos y órganos. Mediante la identificación de cambios a nivel celular, la PET puede detectar las manifestaciones tempranas de enfermedades antes que otros exámenes por imágenes.

En algunos casos, el cáncer tiene un fuerte componente hereditario. «Conocer esas moléculas, esos oncogenes, es muy importante, porque nos permite dar nombre y apellidos al cáncer, ver si hay alguna predisposición compartida con el resto de la familia y detectar el cáncer pronto, antes de que se haya extendido, se haya hecho maligno y sea grande. Y quitarlo resulta más sencillo, es menos problemático y redunda en una mejor calidad y cantidad de vida para los pacientes», puntualiza el jefe del servicio de Anatomía Patológica del Hospital Virgen del Rocío.

«Saber si existe una predisposición a un determinado tipo de cáncer es muy importante para el paciente. Por ejemplo, en los cánceres de mama y ovario causados por mutaciones en los genes BRCA1 y BRCA2, entre otros, se pueden hacer pruebas para detectarlas. Esto va a permitir que la persona afectada se haga más chequeos o se someta a una cirugía preventiva. No hay que olvidar que además de las mutaciones que afectan al ADN, las células tumorales también suelen presentar alteraciones epigenéticas que contribuyen a la biología del cáncer. Se está haciendo un gran esfuerzo para identificar estas alteraciones, porque pueden servir para desarrollar nuevos tratamientos. En resumen, la genética y la genómica tienen un papel muy importante en el cáncer», puntualiza Angelita Rebollo.

En este sentido, Francisca Mulero incide también en el envejecimiento como «factor de riesgo importante» para el desarrollo de la enfermedad, ya que con la edad se acumulan mutaciones genéticas y se debilitan los mecanismos de reparación celular.

Mulero advierte que el cáncer continuará mientras no se pueda revertir o, al menos, retener ese envejecimiento. «Sin embargo, la investigación no se centra únicamente en buscar una cura en el sentido tradicional, sino en desarrollar tratamientos que controlen y gestionen la enfermedad de manera efectiva, convirtiéndola en una condición crónica manejable», matiza la especialista del CNIO.



FRANCISCA MULERO

Una de las áreas más relevantes en la actualidad es la teragnosis. Esta metodología combina diagnóstico y tratamiento con una sola molécula marcada con diferentes isótopos radiactivos

PET, inteligencia artificial e inmuno-PET

Conseguir diagnósticos más rápidos y precisos continúa siendo uno de los principales caballos de batalla en la lucha contra el cáncer. Francisca Mulero, jefa de la Unidad de Imagen Molecular del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), apunta a la teragnosis como una de las áreas de acción más interesantes en lo que se refiere a conocimiento y detección de la enfermedad.

Por ejemplo, en el caso del cáncer de próstata, se puede emplear la imagen PET con antígeno prostático específico (PSA) para localizar el tumor y sus metástasis, así como para determinar su extensión por el organismo. Más tarde, se podrá tratar al paciente utilizando el mismo PSA, pero marcado con un isótopo emisor alfa o beta. En lugar de «hacer imagen», se emplea como tratamiento dirigido, pues se trata de una emisión con mucha energía y capacidad potencial de destruir al tumor. «Esta estrategia aumenta la eficacia terapéutica, ya que se interviene directamente sobre las áreas patológicas previamente identificadas», explica Mulero.

La imagen molecular, ámbito de actuación de esta investigadora del CNIO, se utiliza para ver lo que ocurre en el interior del organismo. Además, permite caracterizar y medir los procesos biológicos, moleculares y celulares, combinando disciplinas como la física, la química o la tecnología de imagen. Las técnicas de imagen molecular no son invasivas, puesto que no es necesario recoger ni procesar muestras, y sus resultados tienen un carácter inmediato. «Con el desarrollo de sondas de imagen específicas, conseguimos hacer una especie de biopsia virtual del tumor sin tener que abrir al paciente y sacar una muestra. Podemos ver, por medio de una imagen, la variabilidad biológica del tumor y, con ello, elegir mejor el tratamiento y cambiarlo si existe o no una respuesta apropiada», analiza la experta del CNIO.

El desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial o de sondas específicas y anticuerpos péptidos permitirán, de este modo, predecir la respuesta a las terapias. Para lograrlo, en el caso de la inteligencia artificial, esos algoritmos analizarán las imágenes médicas como datos, «extrayendo información adicional al cuantificar parámetros que podrían no ser visibles a simple vista».

En este sentido, la imagen PET permite visualizar los procesos tumorales de un modo no invasivo y con alta sensibilidad. En particular, técnicas como la inmuno-PET marcan un anticuerpo con un isotopo radiactivo y lo siguen por todo el organismo para comprobar dónde, tanto en el tumor primario como en las metástasis, el antígeno muestra una mayor incidencia.

Estas técnicas, según la jefa de la Unidad de Imagen Molecular del CNIO, han mejorado de forma significativa la precisión en el diagnóstico del cáncer, con una alta especificidad. Además, paralelamente, facilitan una monitorización más detallada de la respuesta del tumor al tratamiento. Por ejemplo, la inmuno-PET puede mostrar si las terapias están alcanzando las células tumorales específicas y si estas responden de la forma esperada o no: «permite ajustar los tratamientos de manera más rápida y efectiva, evitando dar terapias a pacientes que, por imagen, se ha visto que no expresan ese antígeno y, por tanto, no van a responder», concluye Mulero. ■



¿De qué hablamos cuando hablamos de computación cuántica?

El estallido mediático se produjo cuando el procesador cuántico Sycamore resolvió un enigma de lo más retorcido: «muestrea un ejemplo de un circuito cuántico de un cierto tamaño un millón de veces». Tardó apenas doscientos segundos.

Computadora cuantica Sycamore

Texto: **MJ Prieto** | Fotos: **Envato**

Con los conocimientos de ese momento, un ordenador convencional, incluso el más rápido del mundo, hubiera tardado diez mil años en resolver la incógnita, aunque la cifra solo sirvió para acaparar titulares. A pesar de que con algoritmos posteriores los ordenadores clásicos tratan de igualar a Sycamore, hay consenso en que la solución cuántica es imbatible cuando se escala el problema a mayor tamaño.

La primera prueba de la «supremacía cuántica» protagonizada por el Sycamore de Google y publicada en *Nature*[1] ponía a la computación cuántica en el ojo del huracán. Los ordenadores convencionales se basan en bits, que pueden adoptar dos valores: 1 o 0. Los cuánticos se basan en cúbits, que están en un estado nuevo llamado superposición de 0 y 1. Es una propiedad de la física cuántica, que se manifiesta en el mundo subatómico, en el que una partícula puede estar en un estado cuántico en el que los valores de las propiedades no están definidos hasta que se miden.

La computación cuántica puede acelerar las soluciones para algunos de los problemas más acuciantes del mundo, desde el cambio climático hasta las enfermedades. Dado que la naturaleza a escala atómica se comporta mecánicamente de forma cuántica, esta forma de computación brinda la mejor oportunidad de comprender y simular el mundo natural a nivel molecular.

«En la actualidad, cuando hablamos de tecnología cuántica nos referimos a aplicar los fenómenos cuánticos más sutiles a la computación, la sensórica o las comunicaciones. Es lo que se denomina la segunda revolución cuántica, ya que la primera se desarrolló a mediados del siglo pasado con la invención de los transistores de estado sólido y otras

tecnologías como el láser, que son la base de nuestra economía actual», puntualiza Andrés Gómez Tato, administrador de Aplicaciones y Proyectos en el Centro de Supercomputación de Galicia, CESGA.

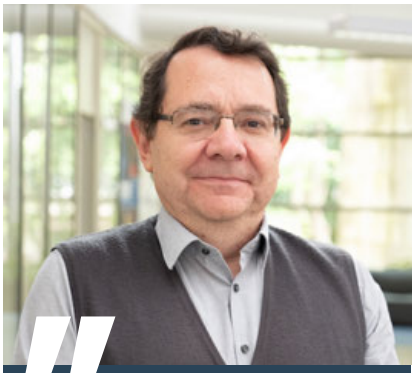
La clave está en saber para qué va a servir, qué nos va a traer y qué no desearíamos tener que ver. «En este momento, no podemos asegurar que esta tecnología sirva para encontrar la solución a todos los enigmas, pero sí que la computación cuántica acelerará los cálculos que pueda exigir», afirma. De hecho, este concepto aparece a principios de los años ochenta como la única forma probable de poder comprender computacionalmente sistemas cuánticos. Pero «tampoco es una tecnología mágica que solucione todos los problemas. En la actualidad se investigan las capacidades que aportará este nuevo paradigma de computación en muchos ámbitos. Algunas cuestiones parecen claras, como que la computación será híbrida, requiriendo tanto capacidades clásicas como cuánticas para computar», refiere. Todavía queda mucho por hacer y mejorar antes de que se consigan resultados contundentes que demuestren la ventaja. «Otros campos, como la sensórica, donde se pueden obtener medidas extremadamente sensibles, permitirán explorar e investigar temas hasta ahora imposibles, lo que podría ayudar también a encontrar soluciones a muchos enigmas actuales, pero sería presuntuoso asegurar que se podrán solucionar todas las incógnitas que tenemos», admite Gómez Tato.

No es una caja mágica

La investigación en computación cuántica estudia los límites físicos del procesamiento de la información y está abriendo nuevos caminos en la física fundamental. Para Elías F. Combarro, catedrático del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo y representante de España en la junta asesora de la Quantum Technology Initiative del CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear), «se ha comprobado que, en ciertas tareas, la computación cuántica no puede acelerar los cálculos en comparación con los ordenadores convencionales. Por lo tanto, un ordenador cuántico no es esa máquina mágica capaz de resolver cualquier problema instantáneamente, como a veces se sugiere en los medios de comunicación; tampoco es una versión más rápida de un ordenador tradicional. Lo que distingue a un ordenador cuántico es su capacidad para ejecutar algoritmos que son completamente diferentes de los que utilizan los ordenadores clásicos. Esto significa que la ventaja de la computación cuántica aumenta con el tamaño del problema que se quiere resolver».

Aunque estamos inmersos en la segunda revolución cuántica aún queda tiempo para lanzar cohetes. Mikel Sanz, investigador del centro NQUIRE (https://nquirephysics.com) y del EHU Quantum Center de la Universidad del País Vasco, UPV/EHU, considera que «de esta segunda revolución hay que reconocer tres grandes líneas: las comunicaciones cuánticas, la sensórica y metrología cuántica y la computación y simulaciones cuánticas. Las primeras emplean los recursos cuánticos para aumentar la cantidad de información que podemos transmitir y asegurar la comunicación de tal manera que un espía no pueda acceder a la información» sin destruirla antes de descifrarla y a la vez delatarse. «En la sensórica y la metrología cuánticas se emplean dispositivos cuánticos para medir campos magnéticos o el tiempo, como los relojes atómicos, con una precisión extrema, o recursos cuánticos como el entrelazamiento para medir parámetros de un sistema, como distancias, velocidades o temperatura, con mayor precisión que cualquier método clásico que emplee la misma energía», afirma Sanz, involucrado en el computador cuántico que IBM instalará en el Donostia International Physics Center (DIPC).

Sobre las posibilidades de la tecnología cuántica para resolver interrogantes, hoy en día indescifrables, Javier Mas Solé, profesor del Departamento de Física de Partículas de la Universidad de Santiago de Compostela y el Instituto Galego de Fisica de Altas Enerxias (IGFAE) advierte que «por sí sola, la tecnología no suele ser la respuesta a los enigmas. Una tecnología mejor es una herramienta que ayuda a resolver problemas que pueden ser tanto teóricos como prácticos. Sin embargo, es necesario capacitar a científicos y tecnólogos en su uso. Ellos son quienes conocen las preguntas y los enigmas y buscarán las respuestas».



ANDRÉS GÓMEZ

Si la computación cuántica avanza como se prevé, el mayor impacto para la sociedad y la economía vendrá por el lado de la criptografía

La paradoja de lo que se viene encima

Se sabe que la computación cuántica cambiará el mundo. La pregunta es cómo. El cuándo más o menos se intuye: unos diez años. Para Gómez Tato «se esperan avances en varios ámbitos, aunque con la incorporación de nuevos investigadores –hasta ahora ajenos a este campo– que aportan conocimientos diferentes, probablemente se incremente el abanico de posibilidades. Se prevén avances significativos en criptografía y la posibilidad de romper algoritmos considerados seguros hasta hace no muchos años; en logística, por la posibilidad de resolver pro-



MIKEL SANZ

Serán las empresas, startups y spin-offs cuánticas las que terminarán impulsando la comercialización de la tecnología

blemas combinatorios; en química, por la capacidad para comprender mejor procesos de alto interés industrial o en inteligencia artificial y posibles algoritmos más eficientes que los actuales».

En el mismo sentido, Mas Solé reconoce que «al ritmo actual, es muy probable que en diez años tengamos una computación cuántica capaz de ejecutar los primeros algoritmos cuánticos sin errores. De ser así, las promesas son importantes. Algunas tienen que ver con la posibilidad de diseñar fármacos de manera eficiente, algo que hasta ahora se hace de forma tediosa mediante prueba y error; un computador cuántico podrá albergar simultáneamente muchas configuraciones moleculares posibles y favorecer la probabilidad de escoger la correcta entre todas ellas. Otras se relacionan con la amenaza criptográfica, si se hace realidad la capacidad de romper las claves secretas RSA – iniciales de Ron Rivest, Adi Shamir y Leonard Adleman, autores que describieron el algoritmo en 1977– con las que compramos por Internet todos los días. Eso obligará a reconfigurar radicalmente el mundo de la ciberseguridad. Paradójicamente, la propia mecánica cuántica ofrece soluciones para una comunicación encriptada segura».

De hecho, insiste en que «durante la travesía de este desarrollo, permaneceremos en la denominada era NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum Computing), en la que los prototipos imperfectos y ruidosos que se van construyendo ofrecen ventajas marginales sobre los superordenadores clásicos en cierta clase de problemas. Entre ellos se encuentran los problemas logísticos, combinatorios, de análisis de riesgos, etc., con demanda en la economía del sector servicios. Sin embargo, existe una ventaja importante: el reducido coste energético de la computación cuántica. El consumo creciente es una barrera conocida para el desarrollo de inteligencias artificiales. La inteligencia artificial cuántica, incluso si solo sirviese para reproducir los logros de las redes neuronales profundas actuales, lo haría con un consumo energético mucho menor».

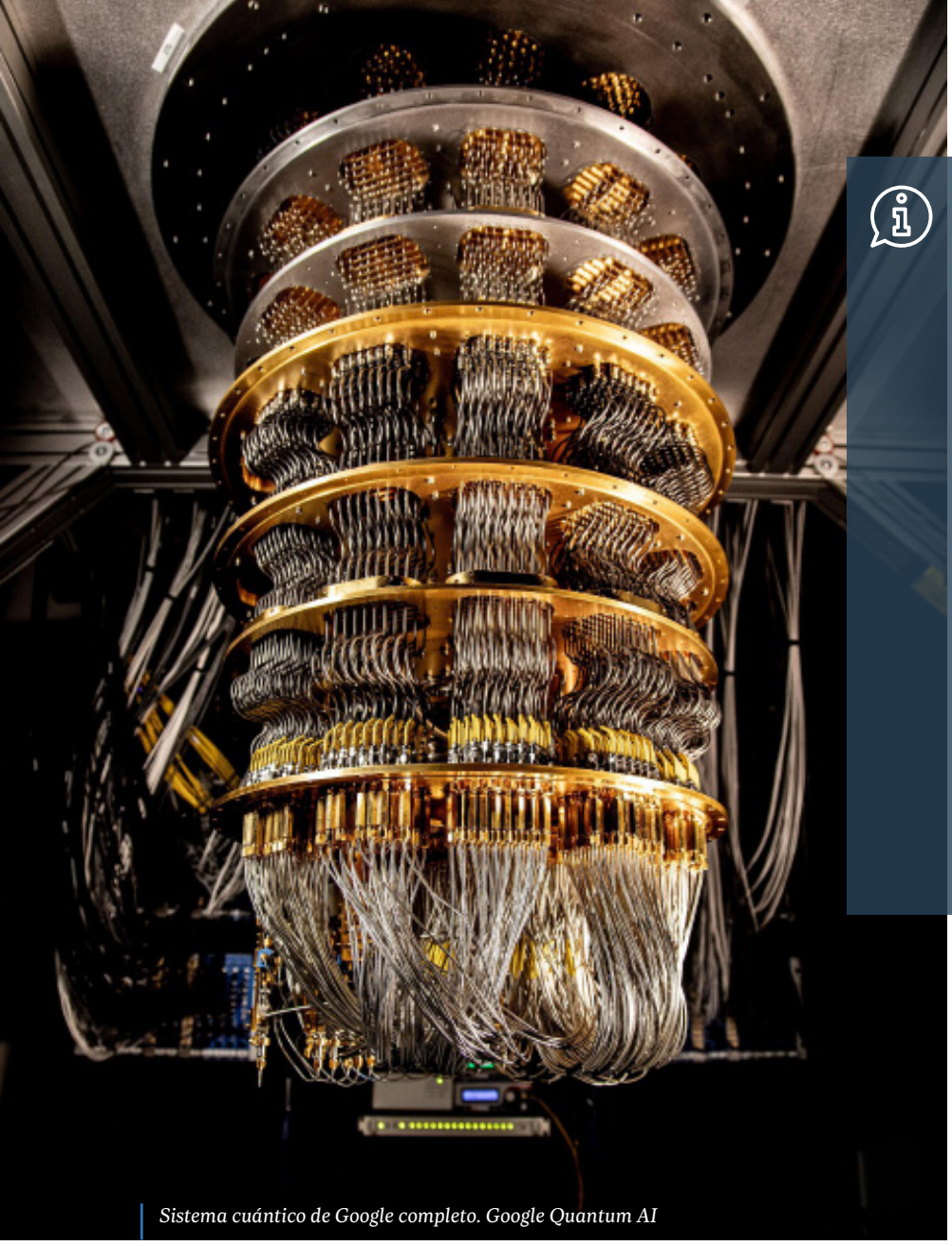
Si la computación cuántica avanza como se prevé, el mayor impacto para la sociedad y la economía vendrá por el lado de la criptografía. Al menos eso afirma Gómez Tato, para quien «los protocolos de seguridad que se aplican actualmente, así como la firma electrónica que usamos para muchas gestiones, podrían quedar seriamente comprometidos. Por ello, se trabaja intensamente en el desarrollo de la criptografía poscuántica, es decir, un conjunto de algoritmos que por diseño son resistentes a las capacidades teóricas futuras de los computadores cuánticos. Un segundo campo donde podría ocurrir una mejora sustancial es en el industrial, en general, y en el logístico, en particular. Dadas las características de la computación cuántica, puede abordar teóricamente de forma eficiente problemas de optimización combinatoria, que están presentes en muchos procesos de la economía, desde la planificación de la producción hasta el reparto de mercancías. Los procesos industriales asociados a los procesos químicos también podrían tener una mejora sustancial, ya que la computación cuántica proporciona algoritmos que teóricamente permitirían calcular cuestiones hasta ahora inalcanzables. Otros sectores que podrían alcanzar mejoras serían el bancario y el sanitario».

El experto del CESGA incide en que «a la vez que se avanza en este ámbito se mejoran los algoritmos clásicos e, incluso, ha aparecido una nueva familia denominada algoritmos de inspiración cuántica». Además, la computación cuántica ha de resolver múltiples retos tecnológicos. En su opinión, «tenemos muchas expectativas. Algunas encontrarán limitaciones que las harán inviables o generarán la necesidad de nuevos desarrollos tecnológicos clásicos o cuánticos. Otras llegarán a ser una realidad. Pero quizá es demasiado pronto para asegurar que todos los posibles beneficios y amenazas serán una realidad. Lo que sí es casi seguro es que veremos implantados los algoritmos de criptografía poscuántica, ya que la seguridad y confidencialidad de la información tiene que minimizar los riesgos de violar esas medidas de protección, y la computación cuántica es un riesgo cierto que es necesario atajar».

Carrera empresarial

Google presentó en 2023 su segundo intento de ordenador cuántico. El hallazgo fue publicado en la revista *Nature*[2] y representa la continuación de la «supremacía cuántica» lograda en otoño de 2019. Si todo va bien, habrá una computadora cuántica antes del fin de la década, aunque su salto del laboratorio a un uso extendido podría tardar más. En este intermedio hay una hermosa desolación.

Para Mas Solé se trata «de una revolución científica y tecnológica liderada por grandes corporaciones. Esto no había pasado antes. Grandes empresas, como IBM, Google o Microsoft, ya no hablan abiertamente de supremacía cuántica. La provocativa palabra abrió una competición entre los dos paradigmas de computación en el que ambas se han enriquecido notablemente. De hecho, los métodos clásicos han mejorado tanto que cada día se



Sistema cuántico de Google completo. Google Quantum AI

DIFERENCIAS ENTRE CÚBITS Y BITS

Los cúbits se representan mediante una superposición de varios estados posibles. Un cúbit utiliza los fenómenos de superposición de la mecánica cuántica para lograr una combinación lineal de dos estados. Un bit binario clásico solo puede representar un único valor binario, como cero o uno, lo que significa que solo puede estar en uno de dos estados posibles. Sin embargo, un cúbit puede representar un cero, un uno o cualquier proporción de cero y uno en la superposición de ambos estados, con una probabilidad determinada de ser un cero y una probabilidad determinada de ser un uno.

acercan más y estrechan el margen de *ventaja cuántica*, que es el concepto más modesto y adecuado que se maneja hoy en día. Hablamos así de computación clásica de inspiración cuántica. Para algunos, esto es lo que quedará al final».

La computación cuántica es la tecnología que se encuentra en un menor nivel de madurez, debido a la necesidad de controlar grandes cantidades de sistemas cuánticos (cúbits) con enorme precisión. Así lo considera Mikel Sanz: «como decía Bohr, es difícil hacer predicciones, especialmente sobre el futuro, pero esperaría ver notables avances en la ciencia de materiales, debido tanto al aumento de la capacidad de cálculo asociado propiamente a los ordenadores cuánticos como al impulso por las necesidades tecnológicas para su construcción. También esperaríamos ver avances en la capacidad de simulación de interacciones moleculares que nos permitan predecir el comportamiento de las moléculas sin necesidad de realizar costosos experimentos y ensayos clínicos, como en el caso de nuevos medicamentos». Otra posible área de avance es la física nuclear, «permitiendo predecir reacciones más eficientes o avanzar mucho más rápido en el problema del confinamiento de plasmas asociado a la fusión nuclear», afirma. En el grupo de investigación que lidera Sanz, trabajan también con otros temas de los que esperan un impacto importante a medio plazo, «como la simulación de la dinámica de fluidos turbulentos o ecuaciones diferenciales no lineales en colaboración con grupos de la Universidad de Nueva York (EE. UU.) y del University College London (RU)», señala.

Elías F. Combarro, por su parte, ve un gran potencial en áreas como la simulación de nuevos materiales y el estudio de compuestos químicos: «son tareas especialmente difíciles para los ordenadores clásicos porque el número de parámetros que describen los sistemas físicos y químicos crece exponencialmente con la cantidad de partículas involucradas. Sin embargo, las propiedades cuánticas de estos sistemas hacen que la simulación en un ordenador cuántico sea mucho más adecuada, tal como lo anticipó el físico Richard Feynman incluso antes de que la computación cuántica fuera una disciplina reconocida». Considerando que los ordenadores cuánticos tienen aplicaciones en campos tan importantes como la ciberseguridad, la simulación de procesos físicos y químicos, y la inteligencia artificial, el hecho de que no sean una solución para todos los problemas



JAVIER MAS

Es necesario capacitar a científicos y tecnólogos en el uso de la tecnología. Ellos son quienes conocen las preguntas y los enigmas y buscarán las respuestas

no disminuye su relevancia, sino que simplemente la contextualiza. «La llegada de estos dispositivos no eliminará todas nuestras limitaciones de cálculo, pero sin duda provocará una transformación significativa en la manera en que procesamos datos y, en consecuencia, en nuestra sociedad», asevera Combarro.

Inversión pública y privada

Gómez Tato considera que «en el caso de la computación cuántica, los principales impulsores serán inicialmente los centros de supercomputación, para avanzar en las soluciones de *software* y *hardware* necesarias, así como para comprender mejor la integración entre la computación cuántica y la clásica. Un segundo impulsor será probablemente la industria de logística junto con el sector bancario, por las posibilidades que podría ofertar. Realmente los españoles estamos contribuyendo de forma significativa al desarrollo de la tecnología cuántica. Muchas empresas internacionales cuentan en su plantilla con españoles que contribuyen significativamente, incluso en algunos casos con cargos de responsabilidad como ocurre en IBM o en Amazon. También hay españoles dirigiendo centros de investigación internacionales en otros países. Y localmente hay una comunidad investigadora e innovadora potente. Pero también es cierto que se necesita un mayor impulso, con más inversiones públicas y privadas».

Dentro del ámbito académico, Javier Mas opina que «en el plano teórico estamos en un nivel internacionalmente competitivo. La parte experimental, aunque cuenta con algunas instituciones potentes como el ICFO (Instituto de Ciencias Fotónicas), tiene que potenciarse para situarse al nivel de nuestro entorno. Están arrancando esfuerzos meritorios en esa dirección, pero poner en pie proyectos experimentales lleva mucho más tiempo y dinero que los teóricos. Lo importante es empezar».

El profesor de la Universidad de Santiago de Compostela reconoce que «en el ámbito privado, sí estamos muy por detrás de nuestro entorno en cuanto a la creación de empresas y la incorporación de tecnologías de información cuántica en su gestión. Siempre con excepciones puntuales, como Multiverse Computing, dedicada a servicios de computación; Qilimanjaro, en la puesta a punto de computadores cuánticos superconductores, o el BBVA, con una división de algoritmia cuántica aplicada a finanzas.

Actualmente, dos proyectos nacionales financiados con fondos de recuperación y resiliencia (MRR) intentan sentar las bases para un desarrollo a nivel estatal tanto de la computación cuántica (Quantum Spain) como de las comunicaciones cuánticas (Plan Complementario de Comunicaciones Cuánticas). Pero los expertos lamentan que el alcance de miras sea muy corto. Cabe mencionar también el proyecto CUCO de Computación Cuántica e Industrias Estratégicas, que pretende apoyar la incorporación de este paradigma a la cartera de conocimiento de las empresas.

El experto de la UPV/EHU, Mikel Sanz admite que «España tiene una larga tradición en información cuántica y aspectos teóricos de las tecnologías cuánticas, especialmente en comunicaciones cuánticas en el rango óptico y en metrología. Sin embargo, en los últimos años han surgido varios grupos potentes que trabajan en computación y algoritmia cuánticas. Además, hay múltiples iniciativas impulsadas por diferentes estamentos gubernamentales, como el Quantum Flagship de la Comisión Europea, dotado con unos dos mil millones de euros hasta 2029, cuyo objetivo es empujar a Europa a liderar el desarrollo y la comercialización de las tecnologías cuánticas. Otros proyectos destacados incluyen el Quantum Spain, impulsado por el Gobierno español para traer un ordenador cuántico al Barcelona Supercomputing Center (BSC), la estrategia BasQ del Gobierno Vasco para fomentar el desarrollo tecnológico y la adaptación de las empresas a través del Bizkaia Industrial Hub, así como la adquisición de un ordenador de IBM en Euskadi, y la estrategia de Galicia alrededor del Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA) para instalar un procesador cuántico, entre otras».

Sanz y su grupo de investigación forman parte de un proyecto denominado OpenSuperQPlus, cuyo objetivo es crear el ordenador cuántico europeo utilizando circuitos superconductores. El programa incluye a los treinta grupos más importantes del continente en esta área. Sin embargo, opina que «al final serán las empresas, *startups* y *spin-offs* cuánticas las que terminarán impulsando la comercialización de la tecnología. En este aspecto, estamos bien posicionados, con *startups* como Qilimanjaro, VLC Photonics, Multiverse, y Quantum Mads, entre muchas otras, y grandes empresas interesadas en explorar cómo estas tecnologías pueden afectar a su negocio».

Como punto débil, Sanz apunta a «la falta de una sólida red experimental

en el país. Aunque históricamente ha habido algunos grupos excelentes en óptica cuántica, apenas contamos con uno o dos laboratorios en áreas como iones atrapados o circuitos superconductores en Granada, Barcelona y Euskadi. Estos laboratorios requieren una gran inversión inicial y son costosos de mantener. Países mucho más pequeños, pero con una tradición científica y una financiación más estable, como Austria o los Países Bajos, tienen docenas de laboratorios, incluyendo también otras tecnologías, como las dedicadas a átomos fríos, centros de nitrógeno-vacante, optomecánica, etc. Estos grupos experimentales son fundamentales, ya que pueden conectar más fácilmente con la industria de fabricación y electrónica y generar *spin-offs* más industriales». ■

1. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. *et al.* (2019). «Quantum supremacy using a programmable superconducting processor». *Nature* 574, pp. 505-510. Disponible en: https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5

2. Castelvecchi D. (2023). «Google's quantum computer hits key milestone by reducing errors». *Nature*.



ELÍAS FERNÁNDEZ

El CERN investiga para mejorar los algoritmos que permitan clasificar los eventos que se producen en la colisión de partículas

Qué supondrá para la seguridad nuclear

La repercusión que tendrá la computación cuántica en el sector energético no es un tema baladí. El representante de España en la junta asesora de la Quantum Technology Initiative del CERN, Elías F. Combarro, admite que «aunque es difícil predecir el impacto de las tecnologías cuánticas en la sociedad, para la física de altas energías y el CERN los beneficios están claros. Son, por ejemplo, los algoritmos informáticos avanzados para hacer frente a futuros retos de análisis de datos, detectores ultrasensibles para buscar partículas y ondas gravitacionales, y el uso de sistemas cuánticos bien controlados para simular o reproducir el comportamiento de fenómenos cuánticos complejos de muchos cuerpos para la investigación teórica». Señala además que, desde el CERN se investiga en «mejorar los algoritmos que permitan clasificar los eventos que se producen en la colisión de partículas. Los datos que se manejan son ingentes y más del 99 % de la información se desecha. La computación cuántica puede ayudar a mejorar la reconstrucción de las trayectorias y también, mediante la construcción de modelos de inteligencia artificial, se pueden encontrar las anomalías, es decir, los casos extraordinarios que es lo que realmente queremos encontrar».

Javier Mas Solé apunta que «la gestión de la seguridad nuclear está basada en la resistencia a ataques, en particular cibernéticos. Dada su importancia crítica, la industria nuclear se protegerá mediante la adopción de protocolos de encriptación cuántica en sus comunicaciones. En cuanto a la seguridad física, es interesante recordar que el desarrollo de la computación clásica y de los ordenadores, tal como se conocen hoy, tuvo lugar con el objetivo de simular la reacción en cadena que está detrás del control de la energía nuclear. Es inquietante el paralelismo que algunos ven entre el avance en computación cuántica y el proyecto Manhattan. Si todo va bien, la computación cuántica permitirá simular de forma eficiente la dinámica nuclear a un nivel de detalle muy superior. Ello permitiría avanzar en el conocimiento de procesos como la incineración eficaz de residuos radiactivos, el uso más eficiente del combustible nuclear o la elusiva fusión fría».

Mikel Sanz indica que «las tecnologías cuánticas suponen un cambio de paradigma y un complejo reto geoestratégico. El acceso a radares más precisos, la navegación segura de aviones y drones, y las comunicaciones completamente seguras son desafíos para la seguridad, pero, sin duda, el reto más crucial sería el acceso a un ordenador cuántico funcional por parte, no ya de un grupo o país no amistoso, sino simplemente de un competidor. Esta posibilidad obliga a la actualización de sistemas criptográficos que no se basen en problemas de factorización o equivalentes, tanto en comunicaciones como en infraestructuras críticas, como las centrales nucleares».

Por contrapartida, Andrés Gómez opina que «no hay un consenso sobre cuándo estarán los algoritmos que podrían hacer inútiles los algoritmos de cifrado actual, pero las previsiones apuntan que será sobre 2030. Es por tanto un poco prematuro aventurarse, aunque es cierto que hay amenazas significativas».

El experto de la Universidad del País Vasco reconoce que «el acceso a tecnologías cuánticas también podría tener consecuencias positivas en el ámbito nuclear, como la realización de simulaciones de procesos nucleares que permitan optimizar la extracción de energía, que ya están haciendo grupos en el Oak Ridge National Laboratory en Tennessee (EE. UU.). A más largo plazo, podría facilitar un avance más rápido en la investigación de la fusión nuclear, lo que sería una revolución tecnológica en sí misma». ■

José María Bermúdez de Castro | Paleoantropólogo

«La ciencia, por mucho que avance, no puede atajar todos los problemas de la humanidad»

Texto: **Luis Tejedor** | Fotos: **Fundación Atapuerca**

La figura de Bermúdez de Castro se asemeja a los propios yacimientos de Atapuerca, a los que entregó cuarenta años de trabajo junto a Juan Luis Arsuaga y Eudald Carbonell. A medida que se profundiza, surgen más y más matices que enriquecen al personaje. Eminencia mundial de la paleoantropología, es también divulgador del español en el ámbito científico y una voz ante el cambio climático. El trigésimo aniversario del descubrimiento de una nueva especie humana, el *Homo antecessor*, es una excelente razón para rememorar el hallazgo y traer al presente sus circunstancias.

Se cumplen treinta años del descubrimiento de los fósiles del *Homo antecessor*. ¿Qué recuerda de aquel ocho de julio de 1994?

Lo recuerdo muy intensamente. Fue un hallazgo que no esperábamos, aunque sabíamos que excavábamos en unos niveles arqueológicos muy antiguos. Había aparecido industria lítica que indicaba presencia humana, pero faltaban los fósiles. Para nuestra sorpresa, no aparecieron solo tres, sino prácticamente un centenar. Fue un descubrimiento de un grupo de treinta personas y, claro, se desencadenó una especie de locura colectiva. Un auténtico ¡eureka! que no olvidaré en la vida.

¿Cómo recuerda la controversia suscitada en torno al hallazgo de esta nueva especie?

En ciencia siempre hay reacciones a favor y en contra. Al principio, hubo más respuestas negativas, a pesar de que contábamos con el apoyo de personas realmente importantes en el mundo de la paleoantropología, como el profesor Clark Howell, que vino a ver los fósiles. Es normal en estas situaciones: hay quienes se posicionan a favor y otros en contra. Inicialmente, nos sentimos un poco frustrados. Sabíamos que habíamos encontrado restos muy diferentes a todo lo descubierto hasta ese momento, y muy antiguos. Se conocían fósiles de hace medio millón de años, pero no de 850 000, por lo que decidimos seguir trabajando para convencer a nuestros colegas, que poco a poco vinieron a ver los restos. Imagino que quienes no han venido ya no tendrán reticencias, porque se han publicado muchos trabajos. Actualmente, la mayoría incluye esta especie en sus filogenias, lo que supone un éxito enorme.

¿Se confirmará en algún momento que *el Homo antecessor es la especie madre* de la que ha partido el resto?

Es la especie más próxima a un grupo de tres homínidos concretos: la nuestra, los neandertales y los denisovanos, lo que ha sido demostrado mediante el estudio de las proteínas halladas en los fósiles de *Homo antecessor*. Es lo más cercano. Falta por encontrar, si es que se encuentra, la especie que dio origen a estos tres grupos. Si no aparece –algo complicado porque, en mi opinión, debería estar en Próximo Oriente, una región donde es muy difícil trabajar–, *Homo antecessor* será la especie más próxima a nosotros y a los neandertales.

¿Se siente recompensado por los hallazgos vividos en Atapuerca o se ha quedado con ganas de más?

Tras cuarenta años de investigaciones en Atapuerca, y alguno más invertido en mi tesis doctoral, me siento muy recompensado. No hay que ser tan ambicioso (sonríe). Hemos encontrado muchos fósiles. Recuerdo algún ilustre paleontropólogo como Howell, un hombre fantástico, que siempre decía que «lo único que lamento es no haber encontrado un solo fósil humano en mi vida». ¡Imagínese nosotros, pobrecillos, que acabábamos de llegar de nuestras tesis doctorales y encontramos fósiles humanos en cantidades industriales! ¡Cómo no íbamos a estar felices con todo esto! Ha sido una vida maravillosa de hallazgos e investigaciones.



> *Las nuevas técnicas, como la gammagrafía nuclear, son maravillosas para aprender mucho más sobre estos humanos que nos precedieron*

¿España es consciente del privilegio que supone contar con yacimientos como Atapuerca?

Muchísima gente lo es. Lo que pasa es que estamos hablando de la ciencia española, que lleva un retraso significativo. Ahora progresa rápidamente en temas científicos y hay mayor interés. Se leen más libros de divulgación científica y la ciencia tiene más presencia en los medios de comunicación. Creo que avanzaremos a pasos agigantados y espero que, dentro de muy poco, estemos al nivel de otros países punteros.

¿Hace falta pedagogía?

Un poco más. También es necesario reconocer la relevancia que tiene la ciencia en nuestras vidas, especialmente ahora, con los tiempos complicados que se avecinan debido al cambio climático y otros problemas que enfrenta el planeta, como la gestión de los residuos. España, al igual que otros países, está tomando conciencia y vamos a estar ahí intentando resolver estos desafíos.

¿Qué importancia concede a técnicas como la gammagrafía nuclear para el desarrollo de la paleoantropología?

¡Mucha! Hasta hace cuatro días, lo máximo que teníamos para trabajar eran ordenadores. Cuando comencé, usábamos calculadoras, lápices, bolígrafos y poco más. En pocas décadas, hemos llegado al punto en que apenas es necesario tocar los fósiles. Se colocan en una máquina, se realiza una microtomografía computerizada y ya tenemos en la pantalla del ordenador, en gran tamaño, todas las medidas que necesitamos. Incluso se pueden hacer réplicas utilizando impresoras 3D. Todo es impresionante.

¿Cómo se ha incorporado la tomografía computerizada en estos procesos?

El método científico, en algunos aspectos, no ha cambiado. Tenemos que observar los fósiles; nuestros ojos son fundamentales. Me hace gracia cuando veo a mis colegas más jóvenes, aquellos que comenzaron sus tesis doctorales hace pocos años y conocen los fósiles a través de las pantallas del ordenador. Cuando ven un fósil real, les resulta extraño. Nosotros estamos acostumbrados a verlos en persona. Creo que es esencial seguir observando los fósiles originales para comprender cómo son. Eso sí, luego ya se trabaja en la pantalla del ordenador, donde las cosas se hacen con mayor precisión. Las nuevas técnicas, como la gammagrafía nuclear, son maravillosas para aprender mucho más sobre estos humanos que nos precedieron.

¿Ha afectado a su concepción del tiempo trabajar con fósiles tan antiguos como los de Atapuerca?

Mucho. Eso lo notamos, sobre todo, cuando vienen personas que no están acostumbradas a tratar temas de paleoantropología. Cuando les dices que estos fósiles tienen un millón de años, que no es prácticamente nada, su mente no está preparada para entenderlo. Nosotros nos hemos educado en este concepto. Ya tenemos asentadas estas cifras y, no digo que las comprendamos, pero nos resultan más familiares. Entiendo que no es sencillo.



Tras cuarenta años de investigaciones en Atapuerca, me siento muy recompensado

Después de tantos años de carrera, ¿tiene esperanza o es escéptico sobre la especie humana?

Tengo días buenos y otros menos buenos. Unos con más esperanza y otros en los que me levanto con más pesimismo. Sin querer, nos hemos ido equivocando con el modelo de vida que llevamos. Es algo muy obvio. Nos hacinamos en ciudades cuando lo más lógico sería vivir mucho más tranquilos, extendidos en el espacio, sin dejar zonas vacías. Ver todo esto me preocupa, no es lo más adecuado. No deberíamos culpabilizarnos, porque lo hemos hecho sin querer. Eso sí, ahora los científicos nos han advertido de que hay un cambio climático en marcha y una contaminación tremenda que solucionar. Si no hacemos caso a esto, lo tenemos muy difícil. La ciencia, por mucho que avance, no puede atajar todos los problemas de la humanidad. Hay mucha desigualdad en el mundo. O esto cambia o el futuro será complicado: tendremos que pasar crisis importantes, como la de la covid-19.

Siendo catastrofistas, ¿podremos sobrevivir al cambio climático que está en camino?

Creo que sí, que sobreviviremos como especie. Lo pasaremos mal. De hecho, ya hay muchas poblaciones que están sufriendo penurias y hambre porque no hay cosechas adecuadas y se ven obligadas a desplazarse. Por otra parte, los países del norte de Europa no están libres de nada. Las cosas no son fáciles. Que nadie se sienta seguro y piense: «como yo vivo en tal sitio, esto no me afecta». Una parte de la población va a pagar el precio de todo esto.

Usted es académico de la RAE. Desde su punto de vista, ¿cuál debería ser el papel del español en la ciencia?

Ojalá fuera mucho mejor. El inglés es el lenguaje de la ciencia. Toda mi vida he tenido que aprender inglés para poder defenderme. Soy mayor y, en mi época, aprendíamos francés, así que me tocó aprender posteriormente. En la comunidad de quinientos millones de hablantes de español, hay países que no tienen suficiente fuerza económica para hacer ciencia. Tenemos que reconocer la situación y asumir que el español no es el vehículo oficial de la ciencia, aunque seamos la cuarta lengua más hablada del planeta. No podemos cambiarlo de la noche a la mañana. Eso sí, la ciencia es universal y da igual la lengua en la que se escriba.

¿Cómo se pueden superar estos obstáculos para el progreso del español en el ámbito científico?

No es sencillo. Las revistas más importantes se escriben en inglés. En algunos casos, te ofrecen hacer un resumen en español de lo que estás publicando. Las revistas españolas que intentan sobrevivir lo hacen con muchas dificultades. Luego, los científicos no citan los trabajos que se hacen en español. Tengo artículos de mis comienzos y me citaban una o dos personas. Hasta que no empecé a publicar en inglés, prácticamente no tenía citas de otros científicos.

La evolución humana me ha enseñado mucha humildad

Lo que sí se ha revelado como algo vigorizante para la RAE es contar con académicos como usted, que vienen del ámbito científico.

Lo agradezco mucho. He hecho un cómputo de los académicos que vienen de este mundo de la ciencia y suman una docena desde 1713. Es un honor estar ahí, y estoy haciendo un esfuerzo muy grande para dar ese lustre que necesita nuestra lengua con las acepciones de los términos científicos.

En su discurso de ingreso afirmaba que, a pesar de nuestra singularidad, el parecido con ancestros como los chimpancés es extremo…

Siempre digo que la evolución humana me ha enseñado mucha humildad. Hay que reconocer lo que somos: primates con una inteligencia razonablemente buena, pero no lo suficiente como para superar los problemas causados por la naturaleza. Somos listos, pero no tanto. Compartimos cosas con muchos primates que nos hacen ser no tan buenos como quisiéramos, como la violencia o la territorialidad. También hay cosas buenas, como ser solidarios con los vecinos. Si reconocemos esta condición, a lo mejor podremos mejorar en el futuro.



Incisivo de Homo antecessor. Gran Dolina TD6 (sierra de Atapuerca)
Foto: Maria D. Guillén / IPHES-CERCA.



Fig. 1



Fig. 2

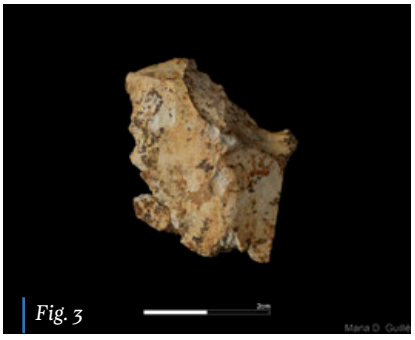


Fig. 3



Fig. 4

Figura 1. *Núcleo de arenisca. Galería (sierra de Atapuerca).*

Figura 2. *Maxilar de bisonte infantil Galería (sierra de Atapuerca)*

Figura 3. *Denticulado de sílex neógeno. Gran Dolina TD6 (sierra de Atapuerca)*

Figura 4. *Raedera de sílex neógeno Galería (sierra de Atapuerca)*

Fotos: María D. Guillén / IPHES-CERCA

NUEVOS ESTUDIOS SÍSMICOS EN LOS EMPLAZAMIENTOS DE LAS CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS: DESARROLLO Y RESULTADOS

Hoy en día existe en España un enfoque regulador sólido para la evaluación de los riesgos de centrales nucleares asociados con fenómenos naturales extremos y, en particular, con la ocurrencia de terremotos severos incluso más allá de la base de diseño sísmico originalmente adoptada para cada central nuclear. El estado del conocimiento en la materia ha evolucionado significativamente desde que se concedieron las autorizaciones de construcción a las centrales nucleares actualmente en explotación, ya que, a medida que avanza el tiempo y la experiencia operativa, se dispone de nueva información práctica sobre estos riesgos, su análisis y posibles consecuencias.

Autores: Alberto García de la Varga, Antonio Jiménez Juan| Área de Ciencias de la Tierra, Subdirección de Ingeniería

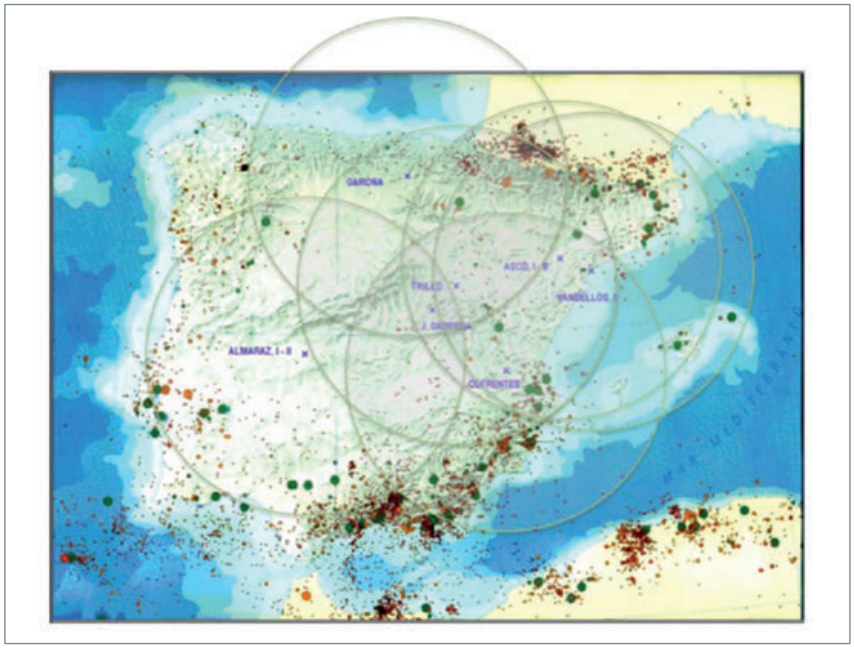
En este artículo se pasa revista a las etapas de desarrollo de la caracterización sísmica en los emplazamientos de las centrales nucleares españolas desde su diseño inicial, mostrando un apunte de resultados. Se presenta con mayor detalle la etapa más reciente de estos estudios, abordada entre 2015-2022 y denominada genéricamente como ITC-Sísmica. Se acometió por decisión del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), a raíz de las pruebas de resistencia europeas realizadas tras el accidente en la central nuclear Fukushima Dai-ichi, provocado por el gran terremoto y tsunami ocurrido al este de Japón, el 11 de marzo de 2011. A fin de valorar la peligrosidad sísmica en los emplazamientos con el mejor conocimiento del momento, el CSN requirió a los titulares de centrales nucleares que actualizaran los estudios, considerando toda la información sismotectónica disponible en la comunidad científica y en el entorno de 300 km de sus instalaciones, y que recabaran la información de detalle necesaria en los entornos más próximos de 50 y 25 km.

Entre los sucesos naturales extremos que pueden afectar a la seguridad de las instalaciones nucleares, los que tienen mayor impacto son los terremotos severos, como acredita la ya larga experiencia operativa de la industria nuclear mundial. Así, ya quedó establecido en la primera normativa norteamericana aplicable al emplazamiento de centrales nucleares, editada en 1962, la necesidad de adoptar un terremoto base de diseño a la hora de proyectar y solicitar autorización para construir una de estas instalaciones. Ese terremoto de diseño, designado también «de parada segura» por su terminología inglesa (Safe Shutdown Earthquake, SSE), es el mayor que podría ocurrir razonablemente en el emplazamiento, considerando los datos históricos y las características geológicas, geotectónicas y sismológicas del terreno, y el que provocaría el máximo movimiento vibratorio del suelo para el que se diseña la instalación.

En su origen, dada la escasez de datos disponibles de terremotos ocurridos y la incertidumbre de su interpretación según el estado del conocimiento, se adoptó el *método determinista*



para establecer el terremoto de diseño (SSE). Se basa en considerar el máximo terremoto histórico conocido que ha afectado al emplazamiento de la instalación y añadirle un margen razonable de seguridad, según el conocimiento experto del momento. Ese fue el método aplicado en la práctica nuclear americana hasta la década 1970-1980, y también en la española, que seguía la normativa americana por ser la tecnología origen de sus centrales. La forma de cuantificar el terremoto de diseño, en síntesis, era establecer un valor de aceleración máxima del movimiento en la superficie del terreno (en proporción a la gravedad, *g*) y adoptar un espectro de respuesta del terreno de formato normalizado para el cálculo estructural, cuyo significado es el de aportar el máximo valor de aceleración del suelo para cada una de las frecuencias simples que componen su movimiento vibratorio real. La frecuencia más alta, superior a los 50 hertzios, se asocia a un terreno rocoso rígido y su aceleración máxima se corresponde con el valor único de aceleración que identifica al terremoto de diseño.



Conforme se ha ido disponiendo de registros instrumentales de terremotos ocurridos y ha avanzado el conocimiento del comportamiento de las fallas tectónicas en su génesis de terremotos, ha ido aumentando el volumen y la calidad de datos de registros sísmicos, y también la capacidad para identificar posibles movimientos de fallas en periodos geológicos y de datar con cierta precisión la antigüedad de esos movimientos. Todo ello ha permitido el rápido desarrollo de los métodos probabilistas en el análisis de la peligrosidad sísmica; entendida como la probabilidad de ocurrencia en un emplazamiento concreto de movimientos vibratorios sísmicos, según sean su severidad o magnitud y las frecuencias de vibración que componen el movimiento real. La peligrosidad se cuantifica en términos de probabilidad de excedencia cada año de un valor determinado de aceleración del suelo o su equivalente en periodo de recurrencia (p. ej., 10^{-4}/año o 10 000 años, para un valor dado).

Se denomina caracterización sísmica de un emplazamiento al conjunto de estudios y trabajos de campo que

es necesario realizar en su entorno local y regional, según el estado del conocimiento, para determinar qué terremotos pueden ocurrir en esos entornos y cuantificar qué impacto pueden tener en la ubicación concreta de la instalación, a efectos de definir su base de diseño sísmico.

Evolución de la caracterización sísmica en centrales nucleares españolas

El proceso de caracterización sísmica de un emplazamiento cuenta con tres componentes principales: *fuente sísmica* origen del terremoto, *modelo de atenuación* en la propagación de ondas y *efecto sitio* o efecto local. Las fuentes sísmicas son fallas de la corteza terrestre que sufren algún desplazamiento. A veces no llegan a determinarse fallas concretas, pero sí se perfilan zonas sísmicas en superficie. Los modelos o leyes de atenuación son ecuaciones semiempíricas que predicen cómo se reduce la energía de las ondas al propagarse por la corteza. El efecto sitio analiza la distorsión de las ondas al atravesar terrenos superficiales, entre el basamento rocoso y la ubicación de la instalación.

En el diseño original de las centrales nucleares españolas la metodología de análisis de peligrosidad sísmica fue de tipo determinista. En ella se busca el terremoto más penalizante (fuente sísmica) para el emplazamiento, caracterizado por su intensidad o magnitud y su distancia; se estima el nivel de vibración que produciría en la zona del emplazamiento (atenuación), y se analiza el posible efecto de amplificación por la transmisión de ondas sísmicas a nivel local en las capas más superficiales del terreno (efecto sitio). El concepto de terremoto más penalizante según la metodología determinista, además de que puede no resultar realista a la luz de la experiencia reciente, impide poder valorar y acotar las incertidumbres en su determinación, al considerarlo con excesiva confianza como el máximo posible.

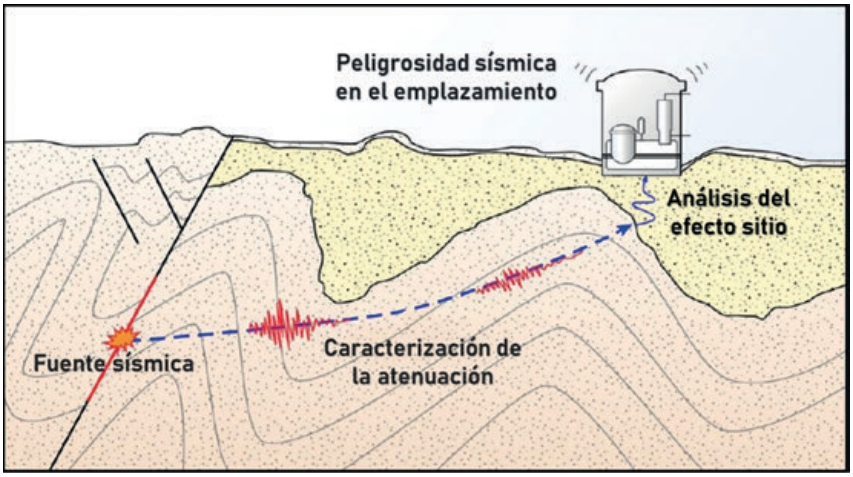


Figura 1. *Componentes del análisis de peligrosidad sísmica*

Ante la posibilidad de ocurrencia de terremotos que superen la base de diseño, surgen dos cuestiones a resolver en relación con la seguridad: una es qué valor de aceleración puede llegar a alcanzarse y con qué probabilidad de excedencia; y otra, qué respuesta tendría la central nuclear ya existente frente a ese terremoto que exceda su base de diseño. Las metodologías de análisis probabilista dan respuesta a ambas cuestiones, mediante la determinación de las curvas de peligrosidad sísmica en un caso y mediante el análisis de la capacidad sísmica de la central en el otro.

Con esa finalidad, al inicio de la década de 1990, el organismo regulador norteamericano (USNRC) lanzó su programa IPEEE[1], que aplicaba a diversos sucesos externos y prestaba especial atención al caso de los terremotos. El propósito fundamental del programa no fue reconsiderar los criterios y métodos deterministas, sino aplicar metodologías de análisis probabilista para identificar vulnerabilidades significativas ante accidentes severos debidos a sucesos externos más allá de la base de diseño, e identificar también posibles mejoras de seguridad efectivas para eliminar esas vulnerabilidades. En caso de terremotos, el programa IPEEE permitía la cuantificación del *margen sísmico* de una central o capacidad de respuesta frente a un terremoto superior a la base de diseño, asegurando la disponibilidad operativa de dos caminos independientes para alcanzar la parada segura del reactor si ocurriera dicho terremoto.

Con el antecedente americano, el CSN implantó en 1991 la aplicación de las metodologías del IPEEE-Sísmico en las centrales nucleares entonces en explotación. Los titulares de todas ellas plantearon realizar de forma conjunta un análisis probabilista de peligrosidad sísmica en los siete emplazamientos involucrados, aplicando así la misma información de partida geológica y sísmica en todos los casos y los mismos métodos de análisis; cosa que no había sucedido al realizar el diseño original de cada central y que ahora facilitaba la comparación de resultados al haber homogeneidad metodológica y en datos de partida. El proceso de trabajo del análisis de peligrosidad concluyó en 1994 y los análisis para cuantificar el margen sísmico en cada central nuclear se extendieron hasta 2001. Como resultado, se obtuvo que la probabilidad media de excedencia del SSE en los emplazamientos estaba en el rango entre $2{,}8 \times 10^{-4}$ y $2{,}6 \times 10^{-5}$ reactor/año; para un terremoto de referencia de valor 0,30 g, superior al de diseño en todos los casos, la probabilidad media de excedencia resultó entre $0{,}94 \times 10^{-4}$ y $0{,}48 \times 10^{-5}$ reactor/año. El margen sísmico en cada central resultó bastante por encima de la base de diseño, entre un 23 % y un 100 %.

1 «Individual Plant Examination of External Events» (IPEEE), NUREG-1407 (1991).

Figura 2. **Resultados de las metodologías del IPEEE-Sísmico en centrales nucleares españolas**

CENTRAL NUCLEAR	SSE	IPEEE 1994-2001 (margen sísmico)	IPEEE 2011-2014 (Stress Tests, margen)
Almaraz I y II	0,10 g	0,20 g	0,30 g
Ascó I y II	0,13 g	0,16 g	0,30 g
Cofrentes	0,17 g	0,28g	0,30 g
Vandellós II	0,20 g	> 0,30 g	0,30 g
Trillo	0,12 g	0,20 g	0,30 g

Tras el análisis de estos resultados, el CSN consideró razonable aumentar el conocimiento de la peligrosidad sísmica mediante el desarrollo de proyectos de investigación y se acometieron entre ellos los proyectos Sigma (1996-97), Daños (1997-98), Datación (1997-99), Prior (2000-03), Expel (2001-04), Peligrosidad Sísmica (2012), disponibles en las publicaciones del CSN. Además, al realizar las revisiones periódicas de seguridad, el CSN requería en cada central nuclear que se mantuviera como mínimo el margen sísmico ya determinado en el IPEEE.

Luego se ha ido experimentando en el mundo la ocurrencia de terremotos que han excedido la base de diseño en alguna central nuclear, como las japonesas de Onagawa (2005), Shika y Kashiwazaky Kariwa (2007) o la americana de North Anna (2011). Llegó el gran terremoto Tohoku en marzo de 2011, cuyo enorme tsunami posterior arrasó la central japonesa de Fukushima Dai-ichi y afectó con impacto menor a otras centrales. Este accidente dio lugar a las pruebas de resistencia europeas y, tras sus resultados, el CSN decidió requerir que las centrales nucleares se reforzaran, aumentaran su margen sísmico hasta el valor de 0,30 g e implantaran las mejoras necesarias para ello.

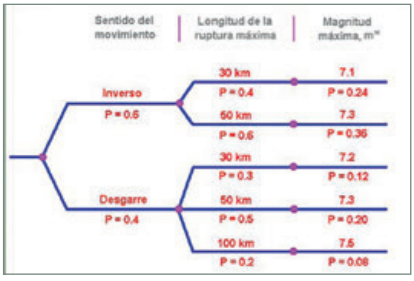
El análisis probabilista de la peligrosidad y la metodología SSHAC

Existe gran incertidumbre, tanto aleatoria como de conocimiento, sobre la estimación de ubicación, magnitud o severidad respecto a la ocurrencia de terremotos futuros, por lo que se recurre al «análisis probabilista de peligrosidad sísmica» (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA) para cuantificar esas incertidumbres y combinarlas, de modo que se obtenga una descripción explícita de la probabilidad de futuras sacudidas que pudieran ocurrir en un emplazamiento dado.

En el análisis probabilista se consideran todos los posibles sucesos sísmicos (fuentes) y los movimientos del suelo resultantes (propagación, atenuación), junto con sus frecuencias de ocurrencia asociadas, para encontrar la frecuencia de excedencia de cada nivel de intensidad del movimiento del terreno (incluso el efecto sitio). Por lo general un PSHA se compone de cinco etapas secuenciales:

- Identificar todas las fuentes de terremotos capaces de producir movimientos vibratorios con impacto en el emplazamiento. Estas fuentes pueden ser fallas sismogénicas o zonas de sismicidad difusa, que no puede asociarse a una falla en concreto.
- Caracterizar la distribución de las magnitudes de los terremotos, es decir, las tasas a las que se espera que ocurran terremotos de diversas magnitudes y en cada fuente sísmica.
- Caracterizar la distribución de distancias entre las fuentes sísmicas y el emplazamiento dado.
- Caracterizar la distribución resultante de la intensidad del movimiento del terreno (aceleración), en función de los parámetros básicos del terremoto (al menos, magnitud y distancia).
- Obtener las curvas de peligrosidad sísmica integrando las incertidumbres asociadas a la magnitud, la ubicación y la intensidad del movimiento del terreno derivadas de todas las fuentes sísmicas consideradas.

Las incertidumbres asociadas a este tipo de análisis se capturan o acotan utilizando árboles lógicos para cada componente del cálculo. En cada nodo del árbol lógico se incluyen los elementos considerados y se les asigna un peso, según opinión experta, teniendo en cuenta que la suma de los pesos de todos los elementos de cada nodo debe dar la unidad.



Árbol lógico para evaluar la magnitud máxima

Una vez integrados todos los caminos dados por los árboles lógicos, el resultado final será una curva de

Tabla 1. **Niveles de estudio en la metodología SSHAC**

Grados SSHAC de Relevancia y Niveles de estudio (tabla 3.1 del NUREG/CR-6372)		
Relevancia	**Factores de decisión**	**Nivel de estudio**
A Sin controversia; poco significado para la peligrosidad sísmica.	Impacto en proceso regulador	**NIVEL 1 (TI)** *Technical Integratir (TI):* evalúa/asigna pesos a los modelos mediante revisión de literatura técnica y su experiencia; estima probabilidades según distribución de la comunidad científica.
B Incertidumbre significativa y con diversidad; asuntos complejos y controversia en opinión experta.		**NIVEL 2 (TI)** El TI interactúa con proponentes y expertos para identificar modelos/hipótesis y sus posibles interpretaciones; estima valores de probabilidad según distribución de la comunidad cientifica.
C Fuerte controversia entre expertos. Alta complejidad técnica y significativo para la peligrosidad sísmica.	Disponibilad de recursos	**NIVEL 3 (TI)** El TI reúne a proponentes y expertos para debatir e interactuar juntos; enfoca el debate y evalúa las interpretaciones alternativas que proponen; estima distribución de probabilidad según opinión de la comunidad científica.
	Percepción púbilca (técnica y social)	**NIVEL 4 (TFI)** *Technical Facilitator Integrator:* organiza panel de expertos para interpretar y evaluar; enfoca los debates; evita conductas inapropiadas en los evaluadores; elabora una distribución compuesta con las estimaciones de los evaluadores sobre las opiniones de la comunidad científica; tiene la responsabilidad última del proyecto.

distribución completa de los niveles de intensidad del movimiento vibratorio del terreno asociada a su frecuencia anual de excedencia.

A finales de los ochenta, la USNRC advirtió que la aplicación de los PSHA en emplazamientos de centrales nucleares americanas por diferentes grupos de trabajo producía resultados significativamente diferentes en el valor medio de peligrosidad sísmica, aunque no así en el valor mediano. En 1993 se formó un comité denominado SSHAC[2] para estudiar y entender el origen de estas diferencias, que culminó en la publicación en 1997 del NUREG/CR-6372, *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and the Use of Experts*, conocido como informe SSHAC. La conclusión principal de este comité es que las diferencias se deben a aspectos procedimentales del proyecto (PSHA) más que a aspectos técnicos de los cálculos. Por ello, el informe SSHAC describe un proceso formal para estructurar y realizar evaluaciones de juicios de expertos que se conoce como el «proceso SSHAC», que proporciona un marco para tratar el análisis de incertidumbres en un PSHA. La metodología SSHAC pone un fuerte énfasis en el desarrollo de parámetros de entrada de alta calidad para los modelos, imponiendo que estos deben ser técnicamente defendibles, hacer un uso completo de todas las observaciones y datos conocidos, así como representar de forma clara y justificable las incertidumbres para todos los parámetros de entrada. Para alcanzar estos objetivos la metodología SSHAC establece como elementos esenciales del proceso:

- *Roles claramente definidos para todos los participantes en los trabajos.*
- *Evaluación objetiva.* Todos los datos, modelos y métodos disponibles que pudieran ser relevantes para la caracterización de la peligrosidad sísmica en el emplazamiento.
- *Integración.* Desarrollo de modelos que reflejen tanto la mejor estimación de cada elemento de entrada para la peligrosidad, con el estado actual del conocimiento, como su incertidumbre asociada. Abordar tanto la variabilidad aleatoria como las incertidumbres epistémicas.
- *Documentación.* Identificar todos los datos, modelos y métodos considerados en la evaluación, y justificar en detalle las interpretaciones técnicas que respaldan los modelos y datos de entrada.
- *Revisión por pares independiente* (*peer review*).

2 Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC).

Para tener en cuenta las diferentes necesidades en los proyectos llevados a cabo en diferentes marcos reguladores, el informe SSHAC describe cuatro niveles de estudio que definen los procesos a seguir, el alcance y la complejidad de las actividades recomendadas del proyecto. Los niveles de estudio 3 y 4, normalmente denominados «Niveles 3 y 4 SSHAC», son los más complejos e implican el mayor esfuerzo (el análisis IPEEE-1994 sería Nivel 1 y parcialmente 2 de SSHAC). Posteriormente al informe SSHAC se han publicado los NUREG-2117 y NUREG-2213 actualizando la metodología SSHAC, a partir de la realimentación y lecciones aprendidas de los procesos SSHAC llevados a cabo desde la publicación del NUREG/CR-6372.

Trabajos en la actualización de la caracterización sísmica según proceso SSHAC Nivel 3

El informe nacional de las pruebas de resistencia europeas[3] aprobado por el CSN recoge en sus conclusiones la decisión de «abordar un programa de actualización de los estudios de caracterización sísmica de emplazamientos, siguiendo la normativa más reciente del OIEA».

En mayo de 2015, conforme a tal decisión, el CSN emitió una Instrucción Técnica Complementaria para cada titular de central nuclear entonces en explotación, de idéntico contenido para todas ellas, requiriendo la actualización de la caracterización sísmica de sus emplazamientos (conocida como ITC-Sísmica). El CSN solicitó a los titulares que se organizaran en un proyecto conjunto y emplearan la metodología SSHAC de Nivel 3.

El titular de cada planta debía abordar trabajos de campo y realizar el análisis integrado de la peligrosidad sísmica partiendo de una nueva base de datos estructurada de su emplazamiento, todo ello a través de un plan de actividades programadas en dos fases de actuación. Para cada fase, la

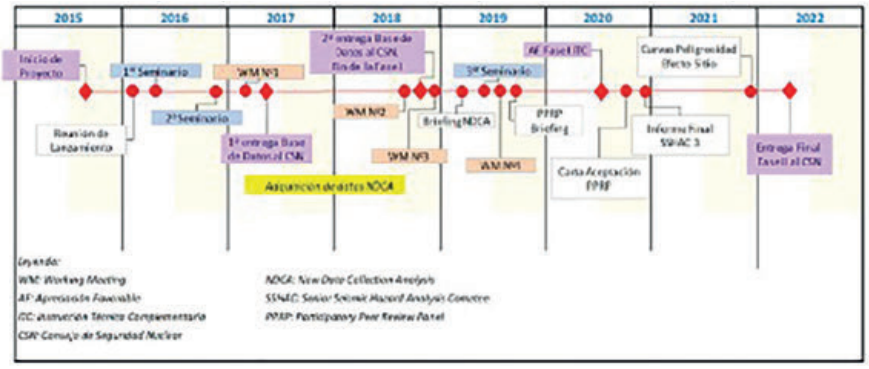


Figura 3. *Cronograma del proyecto ITC-Sísmica. Línea del Tiempo del Proyecto de Caracterización Sísmica de los Emplazamientos de las Centrales Nucleares Españolas*

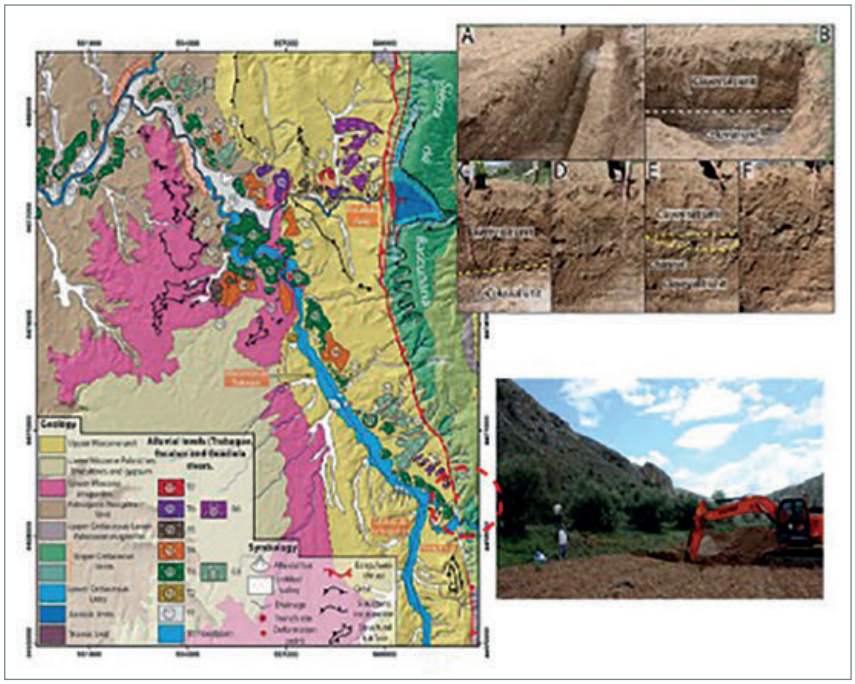


Figura 4. *Estudio paleosísmico de falla con trabajos de campo*

ITC-Sísmica establecía actuaciones a realizar por los titulares.

La Fase I comprende los trabajos de campo, actualización documental e integración de todo en una base de datos de proyecto, para lo que se requirió:

- Recopilar información sismotectónica disponible mediante revisión documental a escala regional en un radio de 300 km.
- Actualizar la información sismotectónica del emplazamiento en un radio de 50 km, mediante los trabajos de campo y de revisión documental necesarios.
- Actualizar la información geodinámica del emplazamiento mediante trabajos de campo y revisión documental necesarios a fin de analizar el «efecto local».
- Analizar en detalle fuentes potencialmente capaces o sismogénicas identificadas en el entorno de 25 km alrededor del emplazamiento.

3 «Pruebas de resistencia realizadas a las centrales nucleares españolas. Informe final» (CSN, Dic/2011).

- Configurar una base de datos del emplazamiento (geociencias) integrada en un entorno SIG (Sistema Información Geográfica), que reúna de forma estructurada la nueva información obtenida del terreno con la ya existente en cada planta.

La Fase II comprende el análisis integrado de peligrosidad sísmica mediante metodología SSHAC Nivel 3, para lo que se requirió:

- Obtener, en la cimentación de las estructuras del emplazamiento, las curvas de peligrosidad sísmica para diferentes frecuencias de excedencia, mediante el uso de un código validado que permita incorporar las incertidumbres inherentes a este análisis.

- Abordar el tratamiento de incertidumbres mediante un proceso apropiado de integración de opinión de expertos, que debía incluir la celebración de tres seminarios abiertos, con expertos y de modo secuencial, para: 1) identificar los aspectos y parámetros más significativos para la peligrosidad sísmica del emplazamiento; 2) analizar las interpretaciones alternativas; y 3) realimentar el proceso tras los resultados preliminares que se fueran obteniendo.

Adicionalmente se establecían las referencias normativas aceptables y los plazos para completar cada una de las fases, así como requisitos respecto a la documentación generada en el proyecto y su archivo. En el cronograma del proyecto «ITC-Sísmica» se muestran los hitos principales a lo largo de los siete años de duración, desde su requerimiento hasta la entrega al CSN del informe final de resultados de cada central nuclear.

El equipo de proyecto organizado por los titulares estaba configurado por una veintena de expertos de ámbito nacional e internacional, cuya máxima autoridad técnica con el rol de *Project Technical Integrator* correspondía al Dr. Kevin Coppersmith, uno de los siete miembros del comité SSHAC. En los trabajos del proyecto han participado, además, una cincuentena de diversos especialistas con experiencia acreditada para cubrir todas las disciplinas necesarias en el campo técnico y científico a lo largo de su desarrollo.

Tras la celebración de los seminarios 1 y 2, de acuerdo a su alcance establecido, el equipo de proyecto diseñó un plan de actividades denominado NDCA[4]. Este plan tenía como objetivo definir las actividades y trabajos de campo necesarios para obtener información adicional que permitiera reducir la incertidumbre de aquellos aspectos o parámetros más significativos para la peligrosidad sísmica. Las actividades compiladas en el plan NDCA incluían:

- **Estudios geológicos del Cuaternario y geomorfología tectónica.** Estudiar la existencia real de fallas sismogénicas cercanas según lo evaluado a partir del mapeo geológico cuaternario y el análisis geomorfológico tectónico, incluidas las evaluaciones de características paleosísmicas, geocronología de las fallas y las tasas de deformación a lo largo de las fallas mapeadas.

- **Estudios paleosísmicos detallados y comportamiento de fallas.** Tasas de deslizamiento de fallas y otras características de fallas sismogénicas cercanas (abrir trincheras).

- **Catálogo y análisis de terremotos.** Analizar magnitudes y ubicaciones de terremotos históricos, de moderados a grandes, mal documentados.

- **Caracterización geotécnica del emplazamiento.** Perfil de velocidad de ondas de corte en los emplazamientos a profundidades de al menos 100 metros, para realizar análisis de efecto sitio y determinar la influencia de las capas cercanas a la superficie sobre los movimientos del terreno.



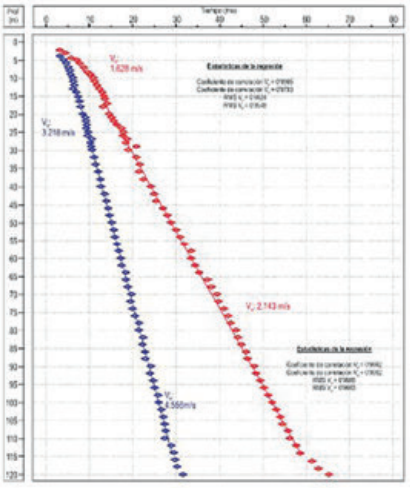


Figura 5. *Sondeo y perfil de ondas de corte por ensayo Downhole*

- **Caracterización de estaciones de registro próximas** (estaciones del Instituto Geográfico Nacional y otras oficiales)**.** Obtener perfiles de velocidad de ondas de corte en estaciones de registro ubicadas cerca de los emplazamientos.

- **Caracterización de estaciones españolas de registro de movimientos fuertes**. Para hacer un uso eficaz de la base de datos de registros de movimientos del terreno en España era necesario conocer los perfiles de velocidad de las ondas de corte en las estaciones de la red del Instituto Geográfico Nacional.

- **Propiedades regionales de la corteza terrestre.** Definición del perfil de velocidad de ondas de la corteza bajo los emplazamientos, utilizando tomografía de ruido ambiental (ANT) y datos de pozos profundos en la región cercana a los emplazamientos. También se recopiló y eva-

4 «New Data Collection and Analyses» (NDCA).

luó información geofísica y sismológica relacionada con el factor Q de atenuación anelástica de la corteza a nivel regional.

Completadas las actividades del plan NDCA, el equipo de proyecto procedió a ensamblar un modelo preliminar de peligrosidad sísmica para cada emplazamiento. Los resultados obtenidos con este modelo preliminar se presentaron en el seminario 3; incluyeron cálculos de peligrosidad sísmica para unas frecuencias de vibración determinadas, junto con un análisis de sensibilidad respecto a los componentes que forman el modelo. Este análisis de sensibilidad permitía al equipo de proyecto determinar aquellos componentes que más contribuían a la incertidumbre y focalizar en ellos los esfuerzos de cara a desarrollar el modelo finalmente adoptado.

Una vez definido el modelo final, se integra la predicción del movimiento vibratorio que producirían todas las fuentes sísmicas identificadas en el proyecto para obtener las curvas de peligrosidad en cada emplazamiento (en realidad, familias de curvas). Cada familia de curvas muestra, para veinte frecuencias de vibración del terreno en el rango de 0,1 a 100 Hz, el valor medio y los percentiles (5 %, 16 %, 50 %, 84 % y 95 %) de confianza de la frecuencia anual con la que se excede un valor de aceleración en cada emplazamiento.

Las curvas de peligrosidad sísmica, para el conjunto de veinte frecuencias, se pueden procesar para obtener un espectro de respuesta de peligrosidad uniforme o UHRS[5], es decir, un espectro de respuesta calculado en el rango 0,1 a 100 Hz con la misma frecuencia anual de excedencia para todas las frecuencias vibratorias del terreno. Los UHRS se utilizan para comparar con los espectros de respuesta «base de diseño» y de «margen sísmico» de cada central. Así se pueden identificar posibles actuaciones de refuerzo estructural a realizar en función de si se excede o no la base de diseño o el margen sísmico, y para qué valores de frecuencia sucede dentro del rango 0,1 a 100 Hz.

Resultados de la ITC-Sísmica y su aplicación para la seguridad

El resultado final de los trabajos requeridos en la ITC-Sísmica es realmente el conjunto de familias de curvas de peligrosidad sísmica obtenidas en cada uno de los emplazamientos de las centrales nucleares, que aportan un abundante detalle del comportamiento del terreno ante la eventualidad de movimientos sísmicos. En el aspecto práctico, la probabilidad media de excedencia del SSE en los emplazamientos se encuentra en el rango entre 2,38 x 10^{-4} y 5,44 x 10^{-5} reactor/año, según sea el conjunto de fuentes sísmicas considerado; en el caso de Vandellós II se distingue entre la falla de El Camp y el resto de fuentes sísmicas. Para el valor del margen sísmico de 0,30 g, común hoy a todas las centrales, la probabilidad media de excedencia resulta entre 1,48 x 10^{-4} y 0,69 x 10^{-5} reactor/año, teniendo en cuenta también la distinción indicada para el caso de Vandellós II. Estos valores resultan algo superiores al compararlos con los obtenidos en los estudios del IPEEE-1994.

A partir de las nuevas curvas de peligrosidad sísmica obtenidas, puede valorarse el riesgo sísmico actual de cada central (p. ej. en términos de frecuencia de daño al núcleo) considerando las mejoras de diseño realizadas desde su proyecto inicial y, particularmente, las implantadas para alcanzar el margen sísmico de 0,30 g. De este modo se verificaría si una central dispone de robustez adecuada frente a potenciales sismos o si necesitaría análisis o mejoras adicionales para reducir su riesgo sísmico asociado. La valoración comparada del riesgo sísmico de centrales existentes

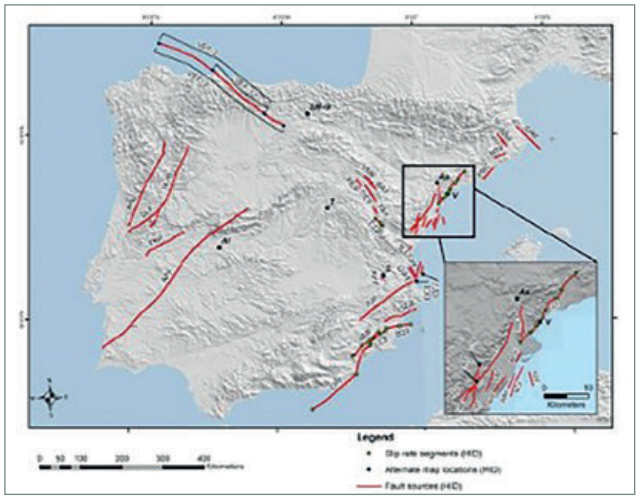


Figura 6. *Fallas y segmentos definidos en el modelo final (ITC-Sísmica)*

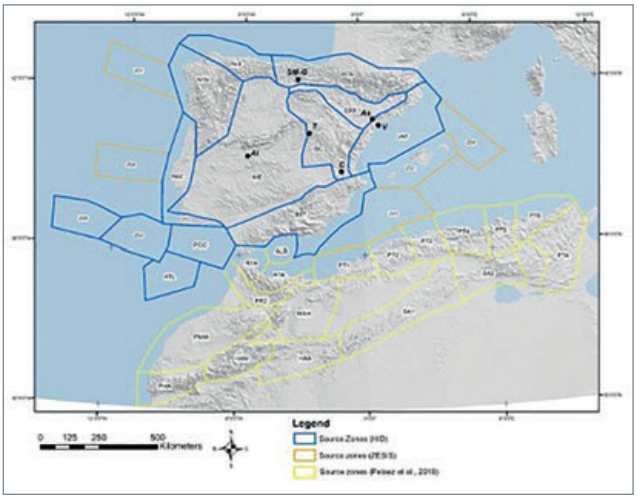


Figura 7. *Zonificación ilustrativa de fuentes sísmicas (ITC-Sísmica)*

5 Uniform Hazard Response Spectra (UHRS).

respecto a los estándares normativos actuales resulta un tanto compleja; la USNRC ha aceptado para ello la metodología SPID[6], que es también la que está aplicándose en las centrales nucleares españolas. Un examen preliminar de aplicación de esta metodología arroja la estimación de que no sería necesario adoptar mejoras significativas en las centrales, salvo el caso de Vandellós II, que tiene en curso un análisis particularizado de su riesgo sísmico.

Conclusiones

La nueva valoración de la peligrosidad sísmica en los emplazamientos de centrales nucleares resulta más realista que la estimada con el IPEEE-1994 y con incertidumbres acotadas según el conocimiento actual. Como ya se había constatado en la revaluación de otros emplazamientos de centrales nucleares en el mundo, los avances en el conocimiento para caracterizar las fuentes sísmicas y sus incertidumbres han dado lugar a una percepción de la peligrosidad sísmica relativamente algo mayor. De aquí surge la iniciativa de aplicar los resultados de la ITC-Sísmica para la valoración del riesgo sísmico resultante en cada planta y establecer, si fuera el caso, posibles refuerzos para aumentar la robustez de las centrales nucleares y acotar más el riesgo sísmico.

El desarrollo de los trabajos promovidos por la ITC-Sísmica, además de facilitar la participación de expertos españoles en el equipo de proyecto, ha contribuido eficazmente en el proceso de integración de opinión de expertos a impulsar la transferencia tecnológica al colectivo científico y técnico español.

La información técnica generada en los trabajos realizados y sus resultados finales constituyen datos de base de gran utilidad para su aplicación práctica en otros proyectos e instalaciones dentro del entorno de los mismos emplazamientos, e incluso en estudios y proyectos de ámbito nacional en materia de caracterización de la peligrosidad sísmica. ■

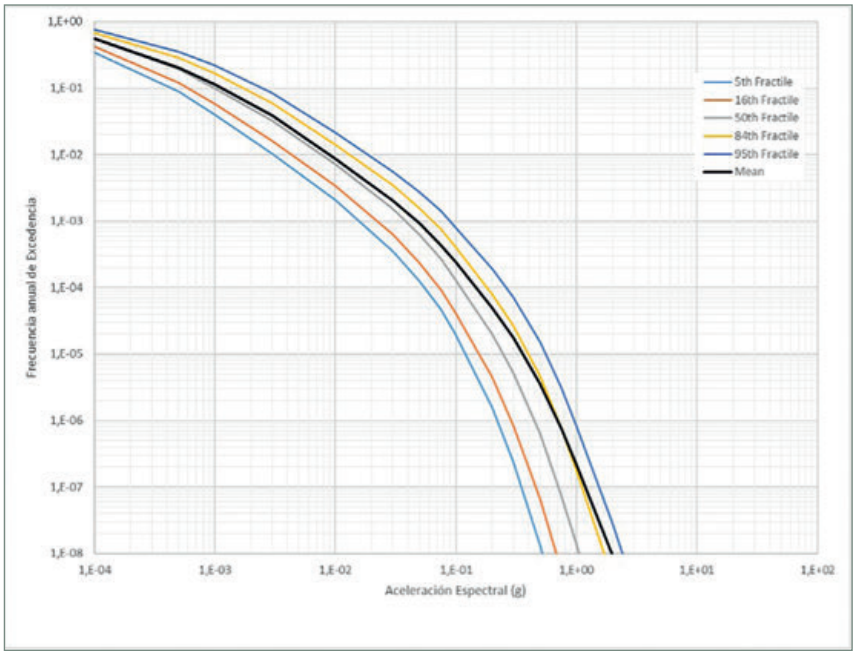


Figura 8. *Familia de curvas de peligrosidad sísmica (ilustrativa de 100 Hz)*



6 EPRI-1025287, «Seismic Evaluation Guidance: Screening, Prioritization and Implementation Details (SPID) for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1: Seismic», February 2013.

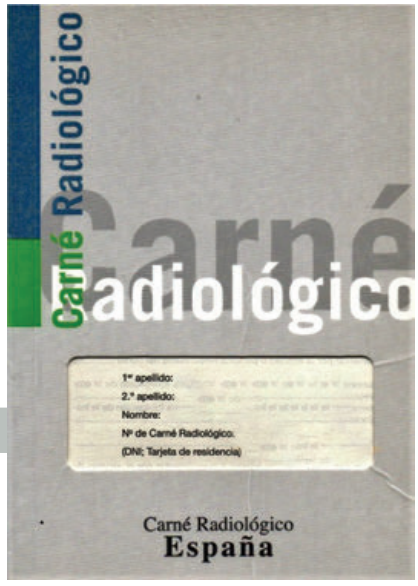
CARNÉ RADIOLÓGICO DIGITAL (CRAD)

El Carné Radiológico Digital (CRAD) supone la digitalización del documento individual de seguimiento radiológico que se utiliza en España desde 1990 como instrumento para el registro de datos, en el cual se recogen los aspectos oportunos relativos al trabajador expuesto externo procedentes de la aplicación del sistema de protección radiológica.

Autores: Ignacio Calavia, Isabel Villanueva, Subdirección de Protección Radiológica Operacional (SRO)

El CRAD se enmarca dentro del plan de actuación en tecnologías de información y comunicación (TIC) del CSN, incorporando nuevas herramientas que hacen más eficiente la actividad del CSN, facilitando el cumplimiento de la normativa vigente por parte de las empresas externas y de las instalaciones, lo que contribuye y redunda en una mejora de la seguridad nuclear y la protección radiológica y acerca el CSN a sus usuarios y a la ciudadanía.

La migración del documento físico a un modelo en la nube presenta grandes ventajas para los usuarios, no obstante, el proceso de transición en el que ambos modelos van a coexistir presenta una serie de retos que ya han sido considerados y analizados para asegurar su abordaje de forma eficiente.



Si bien el carné radiológico lleva implantado en España desde 1990, las bases legales para su utilización, así como las responsabilidades de las diferentes partes implicadas en la protección radiológica operacional de los trabajadores externos (empresas e instalaciones), se establecían inicialmente en el Real Decreto 413/1997, de 21 de marzo, sobre protección operacional de los trabajadores externos con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes por intervención en zona controlada.

El formato y contenido del carné radiológico actualmente en vigor se estableció en la Instrucción de Seguridad IS-01, de 31 de mayo de 2001, por la que se define el formato y contenido del documento individual de seguimiento radiológico (carné radiológico) regulado en el Real Decreto 413/1997. El formato y contenido del documento en dicha instrucción respondían a la necesidad de actualización y revisión del carné radiológico existente derivada de la transposición a la normativa española de la Directiva 96/29/EURATOM, a través del Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.

La aprobación del Real Decreto 1029/2022, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, supone la derogación del Real Decreto 413/1997. Este cambio normativo ha

requerido llevar a cabo una nueva revisión del formato y el contenido del carné radiológico para adaptarlo a la nueva normativa vigente.

El nuevo escenario ha brindado una oportunidad para que, desde el Área de Protección Radiológica de los Trabajadores (APRT), encargada de la gestión tanto de la gestión del Registro de Empresas Externas como de los Carnés Radiológicos, se haya promovido llevar a cabo un proceso encaminado a la digitalización del carné radiológico como una acción alineada con los siguientes objetivos del Plan Estratégico 2020-2025 del CSN:

- Objetivo 1: mantener una supervisión efectiva de las actuaciones de los titulares de las instalaciones o actividades, focalizada en los aspectos más relevantes para la seguridad.

- Objetivo 2: aumentar la eficiencia y la eficacia en la realización de las funciones y competencias del CSN.

También expresa el compromiso con la meta estratégica transversal de sostenibilidad contenida en dicho plan estratégico, orientado a la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible para 2030.

Bases para la digitalización del carné radiológico

Desde un punto de vista estrictamente informático, la Instrucción IS-01 se puede interpretar como el conjunto de elementos necesarios para el diseño y desarrollo de una base de datos, puesto que se definen con gran detalle los campos cuya información debe ser cumplimentada.

De manera análoga, las obligaciones para cada una de las partes que establece la Instrucción IS-01 se pueden interpretar en términos de permisos de lectura y escritura en dicha base de datos.

Con vistas a garantizar la calidad de la información que se registra en el carné radiológico, la citada Instrucción, en su anexo 1, establece la necesidad de firmar y sellar cada uno de los registros por parte de la instalación o de la empresa, según corresponda.

La traslación de la firma y sello al ámbito digital lleva años implantada en España a través del uso de certificados digitales, tanto de personas jurídicas (empresas) como de personas físicas. España es uno de los países líderes de la Unión Europea en implantación de la identidad digital, así como en su uso para la interacción con las administraciones públicas, siendo su grado de implantación superior al 80 %[1] para empresas.

La Sede Electrónica del CSN (https://sede.csn.gob.es), a través de la cual se pueden realizar de manera telemática la mayor parte de los trámites relacionados con las funciones y competencias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica del CSN, utiliza los certificados digitales como medio de autentificación de los usuarios.

Por todo lo anterior, la opción elegida para la digitalización del carné radiológico ha sido la de una aplicación web basada en la propia Sede Electrónica del CSN, ya que de esta manera la aplicación se puede beneficiar de manera directa de los mecanismos de autenticación mediante certificados digitales que ya se encontraban operativos.

Situación actual versus situación futura

Actualmente, el uso de carnés radiológicos en formato físico es equiparable a una base de datos distribuida, a la que no se tiene un acceso completo.

Los datos se registran y cumplimentan de manera manual, debiendo ser firmados y sellados por cada uno de los actores implicados.



Los carnés son expedidos por el CSN, de forma gratuita, y enviados mediante correo postal a las empresas externas que lo han solicitado, lo que requiere disponer de recursos humanos suficientes que permitan tener capacidad para poder dar respuesta a la demanda existente en cada momento en un tiempo razonable. Cuando no se dispone por múltiples motivos de esos recursos humanos se provoca una interrupción en el proceso que puede provocar demoras en la entrega o expedición de los carnés radiológicos.

El objetivo de cara al futuro es disponer de una base de datos centralizada y de fácil acceso, lo que implica el uso de una aplicación web, alojada en una plataforma segura, como es la Sede Electrónica del CSN.

La entrada de datos estará verificada por el uso de certificados digitales, y el almacenamiento digital de la información de los Carnés permitirá la automatización de procesos.

El proceso de digitalización permitirá al CSN mejorar la eficiencia operativa al transformar todos los procesos realizados actualmente en modo manual o papel a procesos automatizados o electrónicos mediante el uso de tecnologías digitales

1 Datos de la Encuesta de uso de TIC y comercio electrónico (CE) en las empresas 2022-2023 del Instituto Nacional de Estadística. Disponible en: https://www.ine.es/dynt3/inebase/index.htm?padre=9940&capsel=9941

De esta forma, el CSN ofrecerá un servicio más rápido y eficiente, lo que resultará en una experiencia mejorada para los usuarios principales y la ciudadanía en su conjunto. El espíritu del CSN como organismo de servicio público es llegar a ser capaces de prestar una atención rápida y precisa, mejorando la satisfacción y percepción de un adecuado servicio por parte del usuario final.

Principales ventajas

La eliminación de la necesidad de un soporte físico para el registro de los datos relativos a la protección radiológica de los trabajadores presenta una serie de ventajas, entre las cuales cabe destacar:

- Se elimina la necesidad de personarse para mostrar el carné y realizar trámites, así como la necesidad de custodia del mismo.
- Se elimina la posibilidad de pérdida del carné y los tiempos muertos asociados a la gestión administrativa de los mismos.
- Se elimina la necesidad de renovar el carné. La vigencia del CRAD viene determinada por la vigencia de los registros de aptitud médica y formación.
- Se agilizan los procesos de alta y baja tanto en las empresas como en las instalaciones.
- El CRAD permite el acceso a toda la información registrada en el mismo desde su emisión.
- La opción elegida para el desarrollo de esta aplicación permitirá que cualquier cambio normativo que afecta al CRAD, modificación o mejora sea implementada de manera rápida y efectiva.

Desarrollo del proyecto

Durante el primer semestre de 2022, el Área de Protección Radiológica de los Trabajadores (APRT) perteneciente a la Subdirección de Protección Radiológica Operacional (SRO) y el Área de Desarrollo de Aplicaciones (DESA) de la Subdirección de Tecnologías de la Información (STI) mantuvieron una serie de reuniones en las que se establecieron las bases del proyecto, así como los procesos a los que la aplicación debe dar soporte.

Estos procesos son los siguientes:

1. Alta del trabajador en la empresa, ya sea por nueva incorporación como trabajador expuesto o por cambio de empresa.
2. Cumplimentación por parte de la empresa de los registros del carné radiológico que son de su responsabilidad según la Instrucción IS-01 (categoría radiológica, aptitud médica y formación básica en materia de protección radiológica según la Instrucción de Seguridad IS-06, de 9 de abril de 2003, por la que se definen los programas de formación en materia de protección radiológica básico y específico regulados en el Real Decreto 413/1997, de 21 de marzo en el ámbito de las instalaciones nucleares e instalaciones radiactivas del ciclo del combustible).
3. Awlta del trabajador expuesto externo en una instalación.
4. Cumplimentación por parte de la instalación de los registros del carné radiológico del trabajador expuesto externo que son de su responsabilidad según la Instrucción IS-01, (controles de dosimetría interna, formación específica en materia de protección radiológica según la IS-06 y dosimetría operacional).
5. Baja del trabajador expuesto externo de una instalación.
6. Baja del trabajador expuesto externo de la empresa.

A continuación, se describen brevemente cada uno de los procesos.

Alta de un trabajador en la empresa externa

Este proceso es llevado a cabo por un usuario representante de una empresa externa inscrita en el Registro de Empresas Externas operado y mantenido por el CSN. El primer paso consiste en realizar la solicitud electrónica de alta al trabajador; para ello, el representante de la empresa externa rellena los datos del mismo en un formulario web y confirma el envío.

El sistema envía al trabajador un correo electrónico informándole que la empresa externa solicita su alta como trabajador expuesto, proporcionándole una URL a la que debe acceder para confirmar su acuerdo en ser dado de alta como trabajador expuesto.

Una vez que el trabajador ha autorizado el alta, la empresa externa recibe un aviso por correo electrónico informando de la autorización por parte del trabajador, debiendo proceder a ejecutar el alta, firmando digitalmente la correspondiente solicitud.

A partir de ese momento, el carné radiológico digital del trabajador ya estará dado de alta como trabajador expuesto de la empresa externa y disponible para su cumplimentación. El representante de la empresa contratante podrá seleccionar al trabajador del listado de trabajadores expuestos de la empresa externa y acceder a su CRAD.

Los campos disponibles para su edición por parte de la empresa externa son los relativos a los reconocimientos médicos y a la formación básica en materia de protección radiológica.

El apartado 1 del CRAD, relativo al historial dosimétrico del trabajador aparecerá cumplimentado de manera automática con los datos de la dosis oficial asignada al trabajador como consecuencia de su actividad laboral con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes y que son suministrados del registro de dosis existente en el Banco Dosimétrico Nacional (BDN) operado y mantenido por el CSN.

Esta ventaja que ofrece el CRAD permitirá eliminar la necesidad de transcribir los datos de dosimetría oficial por parte de la empresa contratante, manteniéndose continuamente actualizado el carné radiológico del trabajador en función de la última lectura disponible en la base

de datos alimentada por los servicios de dosimetría personal autorizados por el CSN que es el Banco Dosimétrico Nacional operado por el CSN. En esta etapa, hay que contar con la activa colaboración y adecuado funcionamiento en calidad de dichos servicios de dosimetría personal autorizados, en el marco del cumplimiento de los requerimientos y criterios establecidos por el CSN para llevar a cabo la carga de datos del BDN.



Figura 1. *Formato del nuevo carné radiológico digital*

Alta de un trabajador expuesto externo en una instalación

Este proceso es llevado a cabo por un usuario representante de la instalación, en la que realizará actividades laborales con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes el trabajador externo.

El proceso consta únicamente de los tres pasos que se relacionan en la figura 2.

Entre el segundo y el tercer paso, la aplicación digital realiza una comprobación automática del cumplimiento de los requisitos normativos requeridos por parte del trabajador externo, verificando que dispone tanto de aptitud médica como de formación básica en protección radiológica en vigor.

A partir del momento de la firma electrónica de la solicitud de alta del trabajador externo en la instalación, el CRAD del mismo se encuentra disponible para la cumplimentación de los campos responsabilidad de la instalación en la que realizará las actividades laborales, (formación específica en materia de protección radiológica, controles de dosimetría interna y dosimetría operacional).

Durante el tiempo que el trabajador externo esté dado de alta en dicha instalación, el CRAD del trabajador no es accesible por parte de la empresa externa, ni por otra instalación.

Baja de un trabajador de una instalación

Este proceso es llevado a cabo por un usuario representante de la instalación. El proceso consta de los tres pasos representados gráficamente en la figura 3.

Entre el segundo y el tercer paso, la aplicación digital realiza una comprobación automática de que la instalación en la que estaba realizando actividades laborales el trabajador expuesto externo ha cumplimenta-



Figura 2. *Alta de un trabajador expuesto externo en una instalación*

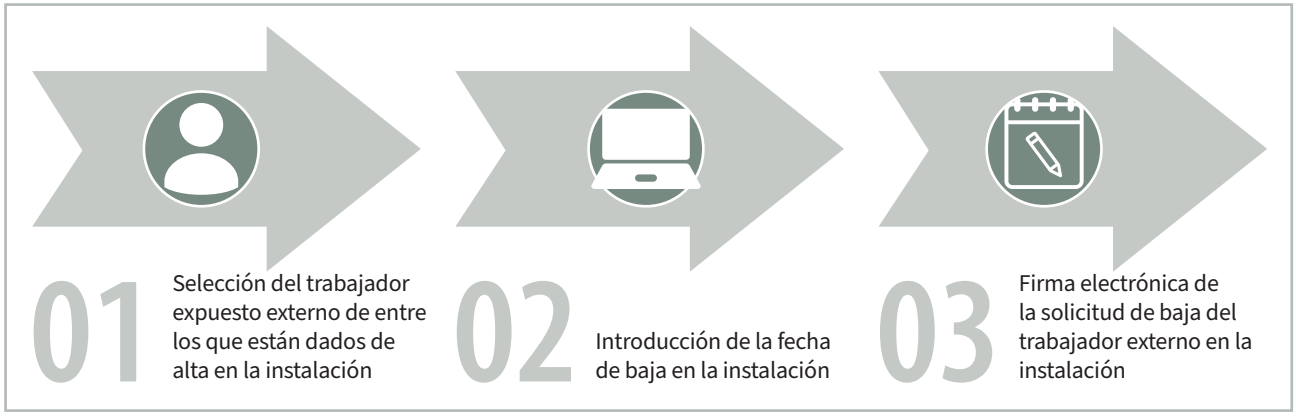


Figura 3. *Baja de un trabajador expuesto externo en una instalación*



Figura 4. *Baja de un trabajador expuesto externo de una empresa externa*

do los campos que son de su responsabilidad y obligación conforme a la normativa vigente.

Baja de un trabajador de la empresa externa

Este proceso lo lleva a cabo un usuario representante de una empresa externa inscrita en el Registro de Empresas Externas del CSN. El proceso consta de tres pasos, que se relacionan en la figura 4.

La baja de un trabajador de la empresa externa también puede realizarse a consecuencia de un proceso de cambio de empresa. En este caso, la confirmación por parte del trabajador del alta en una nueva empresa externa supondría de manera automática la baja en la empresa externa anterior.

Visualización del CRAD por parte del trabajador

Además de los procesos anteriores, es necesario proporcionar al trabajador expuesto un acceso a sus datos, puesto que el carné radiológico, tanto físico como digital, es un documento público, personal e intransferible, tal y como se establece en el artículo 58 del Real Decreto 1029/2022, de 22 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

Para garantizar en todo momento el acceso del trabajador a los datos contenidos en su CRAD, se proporcionará acceso a la Sede Electrónica mediante códigos de acceso enviados a la dirección de correo electrónico del trabajador.

Pruebas piloto del Carné Radiológico

La primera versión de la aplicación CRAD fue presentada a los representantes de los Servicios de Protección Radiológica de las centrales nucleares españolas en marzo de 2023, recibiendo una excelente acogida.

La central nuclear Trillo expresó su voluntariedad e interés central en participar en la prueba piloto de la aplicación diseñada por el CSN durante la siguiente parada de recarga de la central, que tuvo lugar en mayo de 2023.

La prueba piloto consistía en replicar en la aplicación CRAD los trámites que se realizan sobre los carnés radiológicos físicos de un número reducido de empresas. Para la realización de esta prueba, el CSN celebró dos reuniones orientadas a la presentación de la aplicación. Una de ellas, enfocada al uso por parte de las empresas externas participantes, y otra, dirigida al personal de la propia central nuclear involucrado en estas tareas.

Finalizada la parada de recarga de la central nuclear Trillo, los representantes del Servicio de Protección Radiológica y los representantes de las empresas externas participantes proporcionaron al CSN sus observaciones, comentarios y lecciones aprendidas sobre el funcionamiento de la aplicación.

Una vez analizada la información proporcionada se incorporó al desarrollo de la aplicación aquellas que fueron consideradas de interés. Entre ellas cabe destacar la presen-



Figura 5. *Visualización del carné radiológico individual por parte del trabajador externo*

tación la suma de la dosis oficial más la dosis operacional del año en curso al personal de las instalaciones en el momento de dar de alta a un trabajador externo en la instalación.

Tras la implementación de los aspectos derivados de esta primera prueba piloto, la central nuclear Ascó solicitó al CSN participar en una nueva prueba piloto durante la parada de recarga de la unidad 2 de la central, que tuvo lugar en noviembre de 2023.

Al igual que en el caso anterior, tanto el Servicio de Protección Radiológica de la central nuclear como los representantes de las empresas externas participantes fueron informados del funcionamiento de la aplicación en sesiones dedicadas y, posteriormente, proporcionaron al CSN sus observaciones, comentarios y lecciones aprendidas sobre la experiencia de uso de la aplicación.

Cabe destacar que gran parte de las observaciones realizadas por parte de los usuarios de la aplicación estaban referidas al impacto que la digitalización del carné radiológico podía ocasionar en sus procedimientos de funcionamiento internos. Aspecto este subsidiario a la incorporación de una aplicación digital para la gestión de carnés radiológicos, pero no directamente asociado al funcionamiento de la citada aplicación digital.

Una vez completadas estas dos pruebas piloto durante las paradas de recarga de las centrales nucleares de Trillo y Ascó, en enero de 2024 se procedió por parte del CSN a ofrecer la posibilidad de participar en el proyecto piloto a los usuarios del resto de las centrales nucleares, así como a un número reducido de empresas externas, en su mayor parte contratistas permanentes de las mismas.

Por todo ello, en el momento de puesta en producción o explotación de esta nueva herramienta es de esperar que no se produzcan necesidades de mejoras de la herramienta que no hayan sido identificadas previamente. Sí es de esperar la necesidad de capacitación del personal usuario de la misma, tanto de las empresas externas, como de las instalaciones, así como el propio trabajador externo en el manejo de la herramienta, pero dicho aspecto también ha sido abordado previamente por el CSN en el diseño de una estrategia de comunicación en el momento de explotación de esta aplicación.

Datos sobre las pruebas

Durante los períodos de prueba piloto expuestos anteriormente, el CSN ha venido realizando un seguimiento estadístico sobre el uso de la aplicación. De esta manera, se han definido unos parámetros que permiten monitorizar el grado de implantación del CRAD. Los más destacados son los siguientes:

- Número de carnés radiológicos emitidos.
- Número de carnés activos por empresa externa.
- Número de empresas externas con trabajadores dados de alta en instalaciones.
- Número de trabajadores externos por instalación.

En términos de los parámetros anteriores, las cifras resumen de los períodos de prueba piloto son los siguientes:

- Prueba piloto durante la parada de recarga de la central nuclear Trillo: con cinco empresas participantes, el número de CRAD emitidos se aproximó a los cuarenta.
- Prueba piloto durante la parada de recarga de la central nuclear Ascó: con cuatro empresas participantes y cerca de treinta CRAD emitidos.

Tras extender el período de prueba al resto de instalaciones, la situación en fechas recientes es la siguiente:

- Trece empresas han emitido CRAD para algunos de sus trabajadores expuestos. La empresa con mayor número de CRAD emitidos cuenta con 73.
- El número total de CRAD emitidos desde la puesta en marcha de la aplicación es de 419. De los cuales, 416 corresponden a trabajadores de categoría A, y 3 a trabajadores de categoría B.
- De estos 429 CRAD emitidos, 49 corresponden a trabajadores que han sido dados de baja en la empresa externa que los emitió, quedando por tanto 370 CRAD activos.
- Diez empresas tienen trabajadores expuestos externos con CRAD dados de alta en las instalaciones nucleares.
- 105 trabajadores con CRAD están dados de alta en las instalaciones nucleares.

Puesta en explotación de la aplicación de carné radiológico digital

A la vista de los resultados de los proyectos piloto de prueba y de la rápida adopción del funcionamiento de la aplicación por parte de los usuarios participantes en las citadas pruebas, tras haber solventado en el proceso de diseño y desarrollo por parte de la STI del CSN los últimos detalles pendientes de resolver, la aplicación está preparada para su puesta en explotación en septiembre de 2024.

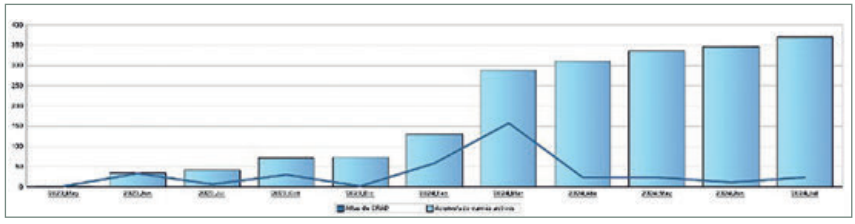


Figura 6. *Proyección de datos de acumulados de carnés activos frente a altas de carnés radiológicos*

Para asegurar el éxito del despliegue es necesario tener en cuenta tanto al numeroso y heterogéneo colectivo de empresas (2267 empresas externas registradas) como a los trabajadores expuestos externos.

El CSN ha identificado como herramienta fundamental para un exitoso despliegue y arranque de esta aplicación la formación de ambos colectivos, así como el acompañamiento en el periodo de transición en el que van a convivir el carné radiológico en formato papel y el carné radiológico digital, dado que esta aplicación tendrá un impacto en sus procedimientos de trabajo.

Con el objetivo anterior, la Subdirección de Protección Radiológica Operacional, con la colaboración del Gabinete de Presidencia del CSN, ha diseñado una estrategia de comunicación para el lanzamiento y puesta en explotación de esta aplicación destinada a los dos colectivos identificados anteriormente.

En la definición y diseño de esta estrategia de comunicación se han tenido en cuenta aspectos relacionados con:

- El lanzamiento de la aplicación.
- Definición de los canales y los materiales necesarios para proporcionar formación y colaboración a los usuarios en función de las demandas objetivas que ya se han identificado.
- Proporcionar confianza y satisfacción a los usuarios.
- Disponer de mecanismos que proporcionen capacidad de evaluación de los resultados de la estrategia de comunicación diseñada, con objeto de llevar a cabo mejoras en caso de ser preciso.

Retos

La transición del Carné Radiológico en papel al CRAD presenta una serie de retos que será necesario abordar y que requerirá esfuerzo por parte de todas las partes implicadas.

- En primer lugar, durante los primeros años tras el despliegue del CRAD, existirá una coexistencia de los dos tipos de carné, dado que los carnés radiológicos físicos expedidos con anterioridad a la puesta en explotación del CRAD tienen una vigencia de tres años.
- A corto plazo, es necesario revisar la Instrucción de Seguridad IS-01, tanto para adaptarla al CRAD como para actualizar el formato y contenido del carné radiológico a las disposiciones incluidas en el Real Decreto 1029/2022.
- A medio plazo, será necesario realizar un análisis del impacto de la implantación del CRAD desde el punto de vista regulador, tanto en relación con la supervisión y control de la protección radiológica en las instalaciones nucleares, como en la supervisión y control de las obligaciones de las empresas externas

Conclusiones

El carné radiológico implantado por España fue considerado una buena práctica y adoptado en contenido y forma por parte de países como Francia y Alemania. Posteriormente, el contenido dispuesto en el Anexo X de la Directiva 2013/59/Euratom e impulsado por la Subdirección de Protección Radiológica Operacional ha transformado el carné radiológico en formato papel en un formato digital que representará un avance sustancial y prácticamente único en la actualidad, que ya ha sido reconocido por organismos homólogos al CSN en grupos de trabajo internacionales soportados por el OIEA y la NEA/OCDE, como el Information System on Occupational Exposure (ISOE), donde la iniciativa fue presentada en el ISOE Europeam Symposium, celebrado del 4 a 6 de junio de 2024 en Rotterdam.

El CRAD mantiene los aspectos básicos del carné radiológico en formato físico, adaptándolo a las necesidades que demanda una sociedad cada vez más automatizada y digitalizada, y agiliza la realización de los procesos por parte de las partes involucradas, reduciendo errores de tipo humano, contribuyendo a una mayor eficacia y eficiencia, tanto para sus usuarios como para el regulador, mejorando la colaboración y ofreciendo una experiencia mejorada a los usuarios en los servicios prestados por el CSN como organismo de servicio público.

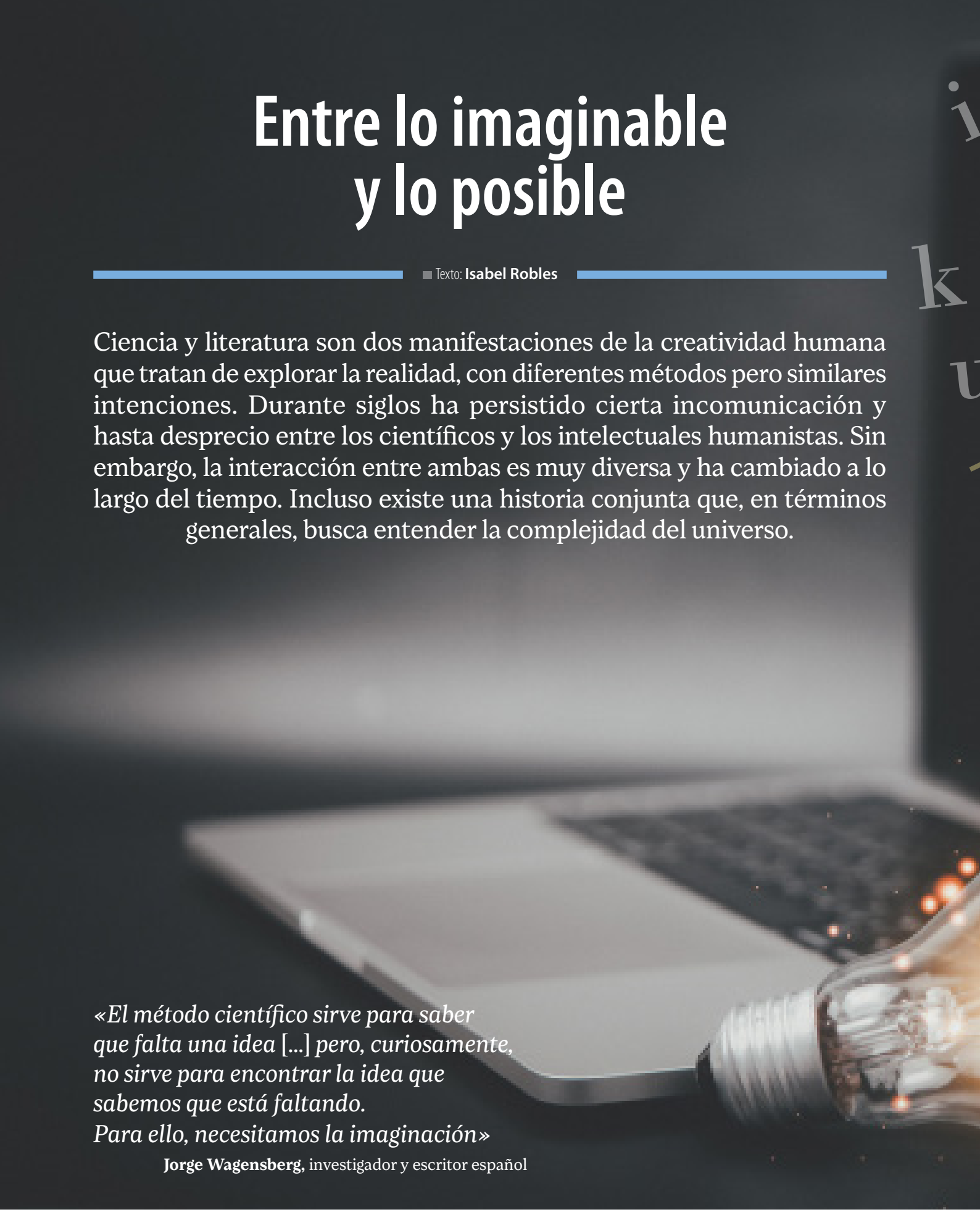


La digitalización de procesos, al igual que cualquier cambio en los flujos de trabajo habituales, requiere un esfuerzo por parte de todos los actores. Las pruebas piloto del CRAD, impulsadas por la SRO como parte de la puesta en marcha de esta nueva herramienta, han supuesto un gran esfuerzo por la duplicidad de los trámites asociados a la gestión del carné radiológico por parte de empresas e instalaciones participantes en estas pruebas. Por tanto, la Subdirección de Protección Radiológica considera una oportunidad la publicación de este reportaje para expresar su agradecimiento a todas ellas por su participación y colaboración, voluntaria y desinteresada, aportando valor añadido al proceso que ha redundado en un desarrollo más adecuado de la aplicación informática, orientada a garantizar una eficaz y eficiente prestación de servicio. ■

Entre lo imaginable y lo posible

Texto: **Isabel Robles**

Ciencia y literatura son dos manifestaciones de la creatividad humana que tratan de explorar la realidad, con diferentes métodos pero similares intenciones. Durante siglos ha persistido cierta incomunicación y hasta desprecio entre los científicos y los intelectuales humanistas. Sin embargo, la interacción entre ambas es muy diversa y ha cambiado a lo largo del tiempo. Incluso existe una historia conjunta que, en términos generales, busca entender la complejidad del universo.

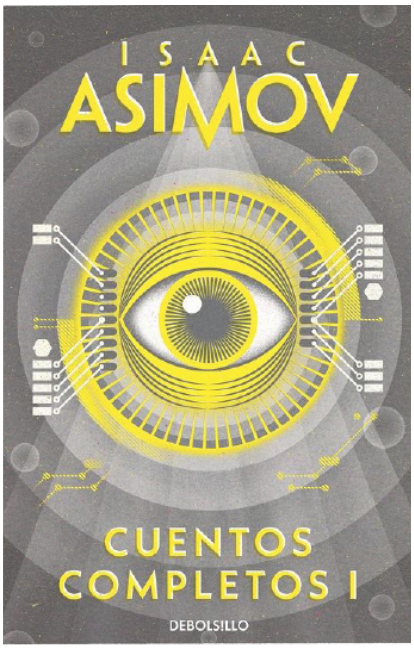


«El método científico sirve para saber que falta una idea [...] pero, curiosamente, no sirve para encontrar la idea que sabemos que está faltando. Para ello, necesitamos la imaginación»

Jorge Wagensberg, investigador y escritor español



Ciencia y literatura son dos ramas del mismo árbol: el conocimiento. Cada una con sus matices y singularidades, con sus códigos y lenguajes, pero ambas imprescindibles para la sociedad. En el imaginario popular se ha impuesto una separación artificial, una falsa dicotomía que parece obligar a elegir entre una u otra. Sin embargo, a lo largo de la historia no son pocos los nombres que han encontrado su camino deambulando entre ambas ramas del saber. Científicos poetas, escritores de ciencia o físicos pintores son ejemplos de una clara fusión que responde al interés y la curiosidad innata del ser humano. En el campo de la literatura, esta relación ha arrojado magníficas obras de géneros variados. Autores como Isaac Asimov, Ernesto Sábato, Juan José Gómez Cadenas, Sonia Fernández-Vidal, Gerald Durrell o Adela Muñoz Páez –todos reconocidos científicos– han destacado en el ámbito de la literatura, y multitud de escritores y periodistas introducen la ciencia



La literatura se une a la ciencia para ofrecer novelas, artículos y todo tipo de publicaciones surgidas del estudio y el placer de escribir

en sus obras, como Dan Brown, Javier Moro, Nancy Kress, Sylvia Nasar, Daniel Kehlmann o Magdalena Albero, entre muchos otros.

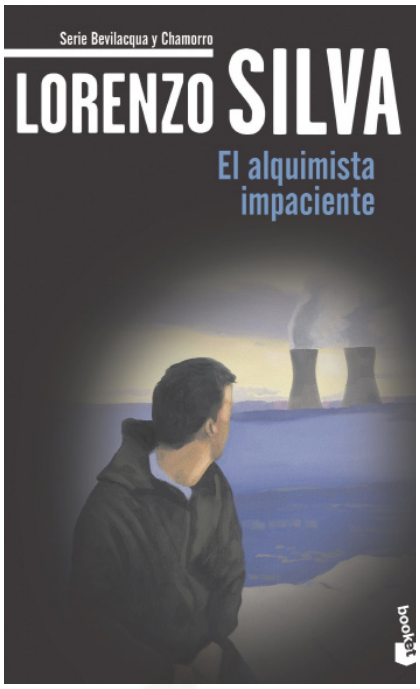
Un amor difícil

Las ciencias y las letras siempre han estado relacionadas de un modo u otro, pero a veces falla entre ellas la comunicación. «Hay una barrera indudable, que es el lenguaje matemático. O se aprende pronto en la vida o luego es difícil. Las mentes de ciencias adquieren esas capacidades, a veces, a cambio de sacrificar otras que se desarrollan más entre las de letras, y eso genera un cierto cisma, como si hablaran en idiomas diferentes» asegura Gómez Cadenas. Por suerte, cada vez son más los que rompen esa barrera y descubren lo que hay al otro lado.

De este modo, la literatura se une a la ciencia para ofrecer novelas, artículos y todo tipo de publicaciones surgidas del estudio y el placer de escribir. Y la ciencia aparece en ellas aunque apenas se perciba su presencia. ¿Acaso no utilizan los modernos policías que pueblan las novelas negras el método científico? ¿No hay matemáticos y biólogos deambulando entre las páginas de las novelas históricas? Lugares, descubrimientos y palabras científicas salpican todos los géneros literarios. Sin ir más lejos, Dan Brown debutó su carrera literaria con *La*







fortaleza digital, donde aborda la supercomputación, y Lorenzo Silva situó en una central nuclear parte de la trama que desgrana en *El alquimista impaciente.* En todos los casos, la ciencia asoma entre la tinta y el papel para recordar que, si no se incluye en la literatura, se olvida uno de los elementos esenciales para entender el mundo.

Entre la ciencia y la ficción

Si hay un término que sirve para ligar la ciencia y la literatura es, sin duda, «ciencia ficción». El género se remonta a 1926, aunque sus primeros testimonios son anteriores. A partir de entonces, la ciencia se ha entrelazado con la ficción para crear universos literarios que forman parte de la historia y son mundialmente conocidos, como por ejemplo los de Julio Verne. Además, como los matices son necesarios para satisfacer la inherente necesidad humana de clasificar la realidad –dependiendo de si en esos universos se respetan las leyes de la física o no– se puede distinguir entre ciencia ficción dura o blanda.

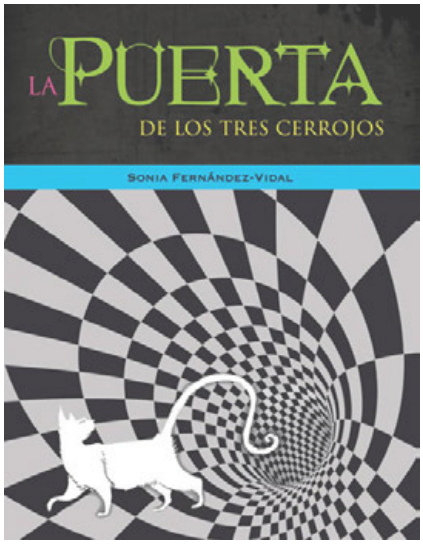
Gómez Cadenas identifica un género más, la «ficción científica», donde encuadra sus propias novelas: «son trabajos en los que no solo se respetan las leyes de la física, sino que además intentan hacer extrapolaciones tecnológicas creíbles. Para ello, generalmente, los escenarios se sitúan en futuros cercanos, donde la extrapolación es plausible».

Sin embargo, la combinación de ciencia y literatura no solo produce ciencia ficción, sino que también aparece en otros tipos de novelas. Este es el caso de las novelas históricas, que no se proyectan hacia el futuro, sino hacia el pasado. «Las novelas sobre ciencia y científicos dan muchas posibilidades para el desarrollo de personajes que se sienten inseguros en un mundo que no los entiende, y al mismo tiempo convencidos de que deben seguir adelante. Esa contradicción es una buena base literaria», asegura Magdalena Albero, que en su novela *Los caminos del mar* presenta los avances que se dieron en el campo de la medicina en el siglo III a. C.

Por supuesto, no toda la literatura se dirige a un público adulto. Gerald Durrell, magnífico naturalista inglés, escribió varios relatos juveniles que se internan en la historia natural, y Sonia Fernández-Vidal publicó *La puerta de los tres cerrojos,* una novela que permite a los más jóvenes sumergirse en el apasionante mundo de la física cuántica, ya que, según la propia autora, «la mejor manera de llegar a la gente que le da miedo acercarse a la ciencia es escribir un libro para niños».

Sin embargo, no debe olvidarse que una novela es, ante todo, una obra

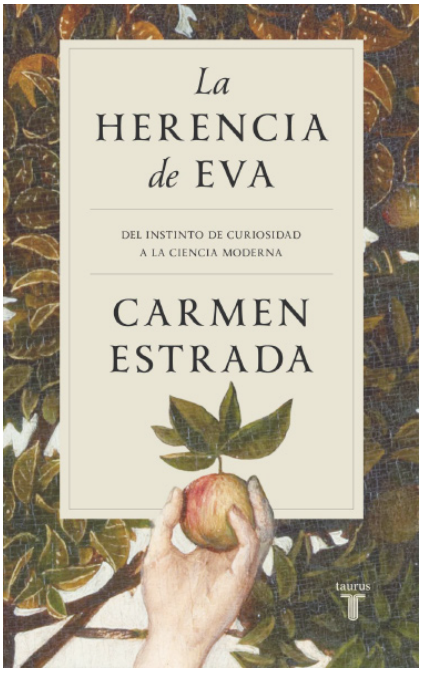


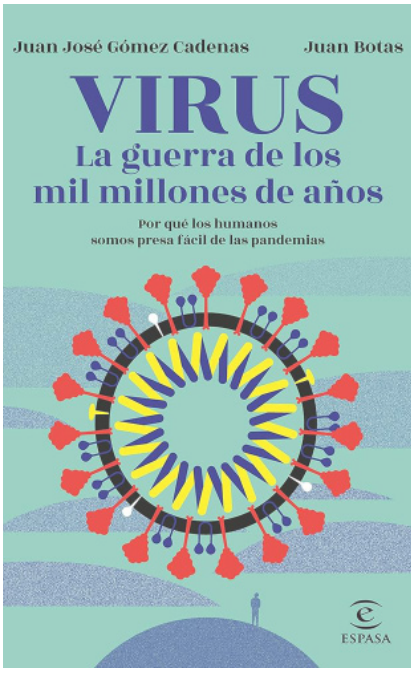


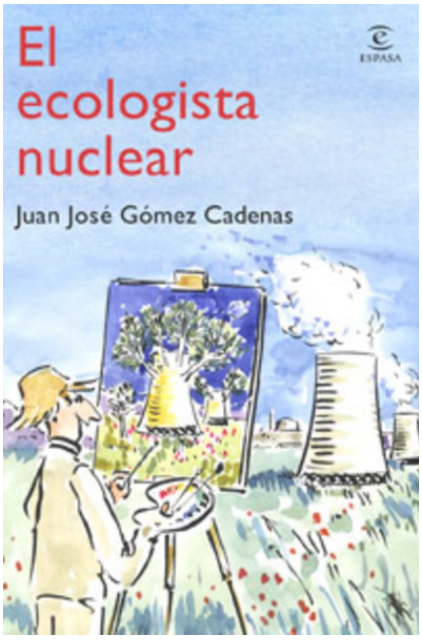
de ficción, por lo que es necesario encontrar el punto de equilibrio con la ciencia. «Hay que intentar que los lectores disfruten de la maravilla que suponen los avances científicos sin romper el embrujo de la ficción» asegura Gómez Cadenas. Eso es, precisamente, lo más complicado.

La divulgación científica

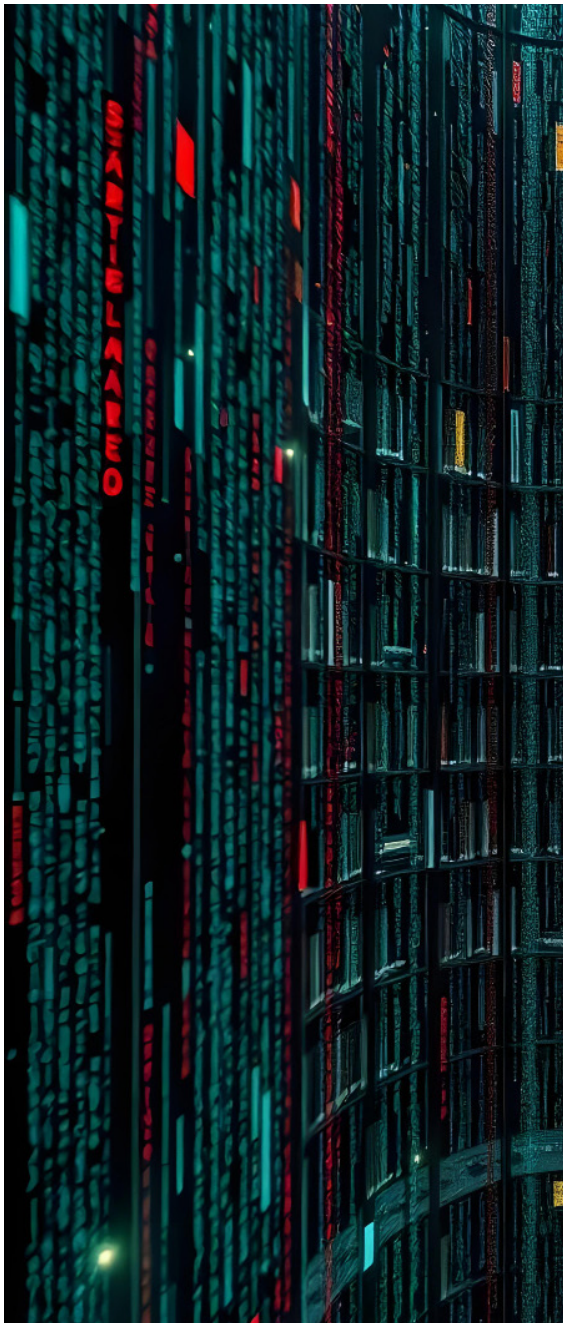
No toda la literatura es ficción. La denominada divulgación científica busca difundir el conocimiento científico en la sociedad. En palabras de Carmen Estrada, autora de *La herencia de Eva* e investigadora









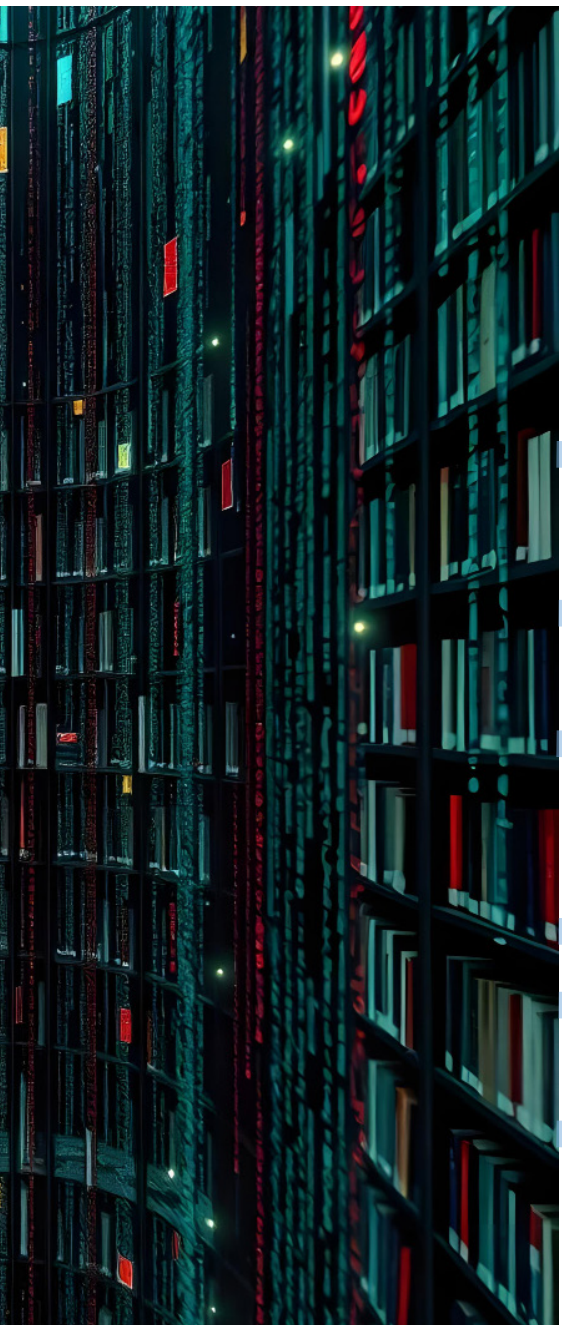


Una novela es, ante todo, una obra de ficción, por lo que es necesario encontrar el punto de equilibrio con la ciencia

neurocientífica, «la ciencia es una actividad humana básica que existe desde el principio de la especie y todo el mundo puede acercarse a ella»; esa es la función de la divulgación científica.

Revistas, artículos y ensayos sobre todas las ramas de la ciencia permiten explicar a los lectores temas complejos de un modo sencillo, como la física cuántica que, a lo largo de las páginas de *Desayuno con partículas*, de Fernández-Vidal, se revela como inteligible. No obstante, su recepción varía no solo dependiendo de lo que traten, sino también del momento en el que se presenten. Un ejemplo se encuentra en *El ecologista nuclear. Alternativas al cambio climático*, que provocó una gran polarización entre el público, mientras que *Virus: La guerra de los mil millones de años*, también de Gómez Cadenas, «tuvo una recepción fría, quizás porque la gente estaba harta del tema».

Conscientes de la necesaria interacción entre literatura y ciencia, algunos autores han dedicado sus



Interacciones más comunes entre literatura y ciencia





John Slater y María Luz López-Terrada[1] relacionan las seis interacciones más comunes entre literatura y ciencia:

1. Las representaciones literarias de fenómenos naturales o representaciones imaginarias de tecnologías aún no descubiertas (ciencia ficción) pueden inspirar la investigación científica; la ciencia puede tomar como objeto las ideas difundidas en la literatura para corregir errores o explorar posibilidades imaginadas.
2. La escritura científica puede basarse en el lenguaje figurado asociado con la representación literaria, como cuando «editamos» un gen o pensamos que un gen posee cualidades humanas (por ejemplo, el egoísmo genético).
3. La literatura puede representar aspectos de la actividad científica no incorporados a la escritura técnica, por el asombro o la emoción que rodean a un resultado positivo en el proceso experimental o la decepción de los resultados negativos, por ejemplo, y en las ciencias médicas, la angustia asociada con la muerte de un paciente o participante en un ensayo clínico.
4. La literatura puede difundir o popularizar ideas científicas y ayudar a su aceptación.
5. La literatura puede criticar los problemas éticos de la comunidad científica, la calidad de su escritura o la destrucción de las formas de vida a la que se puede llegar por las consecuencias no previstas de los descubrimientos científicos.
6. Los científicos pueden satirizar a sus rivales profesionales con la pretensión de minimizar la aceptación de sus ideas.

1. John Slater es profesor de la Colorado State University y María Luz López-Terrada es doctora en Historia por la Universitat de València e investigadora científica del CSIC. Slater, J. y López-Terrada, ML (2021). «Literatura y Ciencia». Saberes en Acción. Disponible en: https://sabersenaccio.iec.cat/es/literatura-y-ciencia/

obras a estudiarla, como Marta Macho y su *Matemáticas y literatura* o Xavier Durán, escritor de *La ciencia en la literatura*, donde propone un viaje en el tiempo para comprender el nexo entre ambas disciplinas a lo largo de la historia.

Sin embargo, divulgar ciencia es una tarea ardua. «La irracionalidad y la superstición [son] dos fantasmas contra los que la ciencia ha estado luchando desde sus inicios», asegura Fernández-Vidal, y es una batalla que aún no ha terminado. Son muy difíciles de combatir porque, como afirma Gómez Cadenas, «una buena parte de las actitudes anticientíficas son ideológicas o emocionales». En este contexto, «quizás la literatura pueda ser de más ayuda. No tanto porque la usemos como "divulgación encubierta", sino porque cuánto más se lee más cultura se adquiere, más sentido crítico, más empatía, y todos esos elementos son útiles para formar ciudadanos ilustrados que no se dejen embaucar fácilmente». ■

> *La irracionalidad y la superstición [son] dos fantasmas contra los que la ciencia ha estado luchando desde sus inicios*

PORTAL EDUCATIVO DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

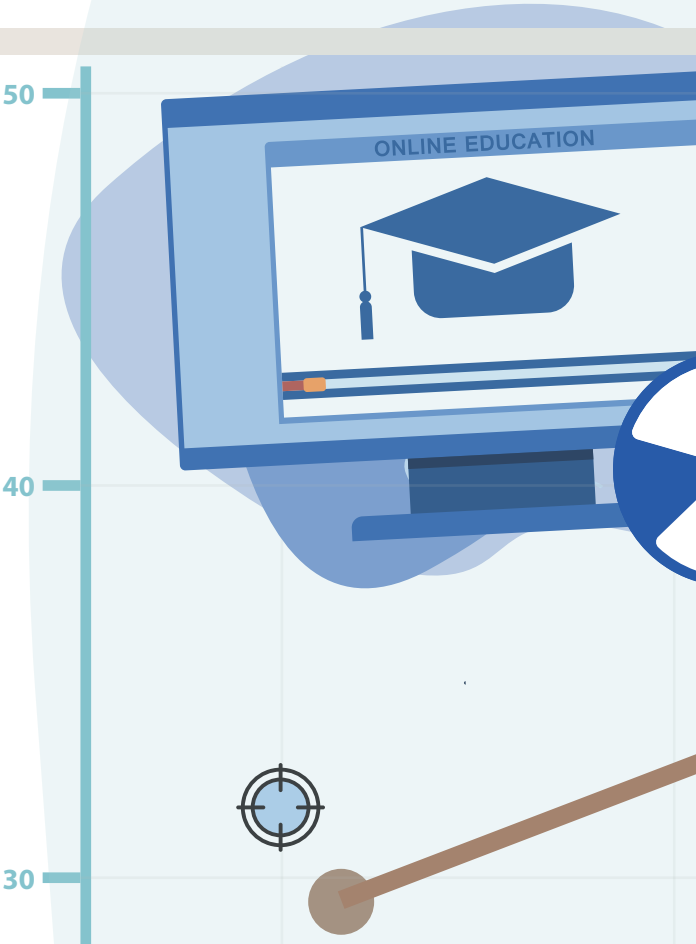
Texto: **Mª Jesús Pinos Cabezas**
SUBDIRECCIÓN DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA OPERACIONAL

En el marco del convenio de colaboración suscrito en 2003 por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), se crea el Portal Educativo de Protección Radiológica (PR), que coadyuva el cumplimiento de funciones encomendadas al CSN por el artículo 2 de su ley de creación.

En el ámbito de la protección radiológica se encomienda al CSN la concesión y renovación –mediante la realización de las pruebas que el regulador establezca– de licencias de operador y supervisor para instalaciones radiactivas, así como de las acreditaciones para dirigir u operar las instalaciones de rayos X con fines de diagnóstico médico. También le compete la homologación de programas y cursos de formación para la obtención de las correspondientes licencias y acreditaciones en materia de protección radiológica y la homologación de las entidades o instituciones responsables de su impartición.

La contribución del Portal Educativo de Protección Radiológica se concreta en la puesta a disposición –a través de la web https://csn.ciemat.es/– de materiales para la enseñanza y estudio en el ámbito de la protección radiológica, orientados a obtener las correspondientes licencias y acreditaciones. La última renovación del convenio tuvo lugar el 15 de diciembre de 2022.

Estos datos han sido obtenidos a través de Google Analytics. Un elevado número de entidades formadoras utilizan el portal para descargar materiales formativos que emplean en la impartición de sus cursos.
La formación constituye una herramienta clave para garantizar que el trabajo se realiza de forma segura y eficiente en cualquier ámbito. En el caso de la PR, el Portal Educativo de Protección Radiológica contribuye eficazmente a la consecución de este objetivo.



Objetivos del Portal Educativo de Protección Radiológica

- Facilitar material docente actualizado para la formación de personal en instalaciones radiactivas y de radiodiagnóstico médico, adecuado a su nivel de responsabilidad y campo de aplicación o modalidad.
- Facilitar recursos didácticos de calidad, convenientemente actualizados por expertos en las materias correspondientes.
- Avanzar en la armonización de los programas de formación.
- Integrar a profesionales de diferentes ámbitos con competencias en materia de PR, facilitando la cooperación y el intercambio de información.



Mejoras del nuevo Portal Educativo de Protección Radiológica

- Actualización de los materiales docentes y recursos didácticos existentes, adaptándolos a la normativa vigente y a las nuevas técnicas, con mejores prácticas de trabajo.
- Ampliación de la base de datos de autoevaluaciones *online*: https://avformacion.ciemat.es/
- Contacto más ágil entre usuarios y responsables del portal a través de una cuenta de correo: formacioncsn@ciemat.es
- Nueva interfaz que unifica la aplicación de las autoevaluaciones con los contenidos didácticos, con diseño responsive, adaptable a todos los dispositivos.
- Funcionalidad mediante tecnología Moodle, versión 4.1, accesible, responsive y bilingüe (español/inglés), que permite la conexión con Google Analytics y unifica la aplicación de las autoevaluaciones con los contenidos didácticos.

Estadísticas de uso del Portal Educativo de PR desde junio 2010 hasta diciembre de 2023

- Más de dos millones de páginas visitadas a través de 350 000 sesiones (se entiende por sesión el período durante el cual un usuario interactúa con el sitio web).
- Número medio de páginas del portal visitadas por sesión (5,6 páginas/sesión).
- Las visitas proceden de 108 países diferentes:
  - España: 94,4 %
  - Países de habla hispana: 3,31 %
    - México: 0,66 %
    - Colombia: 0,57 %
    - Chile-0,47 %
    - Argentina-0,47 %
    - Perú-0,35%
    - Ecuador-0,35 %
    - El Salvador-0,19 %
    - República Dominicana 0,13 %
    - Venezuela-0,12 %
  - Estados Unidos–0,30 %
  - Reino Unido- 0,21 %
  - Alemania-0,17 %
  - Francia-0,13 %
  - Portugal-0,13 %.
- La duración media de las visitas es de 4:40 minutos/sesión (las visitas se realizan de forma deliberada, no por casualidad).
- El promedio de visitas es de 57/día.
- El valor medio de nuevos visitantes es igual a 56,8 %, es decir, casi la mitad de los usuarios que lo visitan una vez, vuelven a hacerlo periódicamente.
- El número de autoevaluaciones completadas es de 148 106.

Contenido del Portal Educativo de protección radiológica

Ocho cursos de protección radiológica en instalaciones de radiodiagnóstico médico:

- Curso de PR para dirigir u operar instalaciones de rayos X con fines diagnósticos en las siguientes modalidades: general, podología y dental.
- Curso de PR en radiología intervencionista: niveles 1 y 2.
- Curso de técnico experto en PR - Instalaciones de radiodiagnóstico.

Diez cursos de PR en instalaciones radiactivas (cada curso consta de un módulo básico + campo de aplicación):

- Curso de PR para supervisores u operadores de instalaciones radiactivas en los siguientes campos de aplicación: medicina nuclear, fuentes no encapsuladas, radioterapia, radiografía industrial y control de procesos y técnicas analíticas.

Cada curso contiene: programa, objetivos didácticos, lecciones de los temas teóricos, cuaderno para sesiones prácticas, autoevaluaciones en línea y material de ayuda al profesorado (presentaciones de las lecciones y bibliografía).

Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible tolerante a accidentes (ATF)

Proyecto iniciado en diciembre de 2021, realizado por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en colaboración con la Universitat Politècnica de València (UPV) y subvencionado por el Consejo de Seguridad Nuclear

César Queral Salazar
Universidad Politécnica de Madrid ▪ Dpto. de Energía y Combustibles – Escuela Tca. Sup. Ing. de Minas

El Proyecto «Aumento de márgenes de seguridad en centrales LWR mediante combustible tolerante a accidentes (ATF)» pretende desarrollar una metodología que permita cuantificar la variación de los márgenes de seguridad en distintos tipos de reactores nucleares (PWR-W y BWR) ante un hipotético cambio del actual combustible convencional a combustible tolerante a accidentes (ATF). Para ello, se propuso realizar distintos tipos de análisis enfocados a diferentes objetivos:

- Cuantificación de incremento de márgenes de tiempo para actuaciones del operador en secuencias dominantes del análisis probabilista de seguridad (APS).
- Cuantificación del incremento de los márgenes de seguridad en análisis deterministas de centrales PWR y BWR, secuencias de LBLOCA.
- Cuantificación del incremento de los márgenes de tiempo en secuencias de accidente severo en centrales PWR y BWR.
- Análisis del impacto del uso de los combustibles ATF en operación flexible con reactores PWR.
- La organización de seminarios y cursos relacionados con el análisis de márgenes de seguridad y el combustible ATF.

Para ello se plantearon un conjunto de actividades y, de las realizadas hasta este momento, cabe destacar las siguientes: Primero se realizó un extenso análisis bibliográfico sobre los combustibles ATF desde el punto de vista de la modelización, del comportamiento en secuencias accidentales y de su impacto en la reducción del riesgo. Posteriormente, se realizó la selección de las secuencias más importantes desde el punto de vista del riesgo de los PWR diseño Westinghouse para analizar el impacto de distintos combustibles ATF, siendo las secuencias seleccionadas: TLFW, SBO, SBLOCA, MBLOCA, LBLOCA.

En paralelo a la actividad anterior, se realizó el modelado de vainas con recubrimiento de Cr y de vainas tipo FeCrAl en el código termo-hidráulico TRACE. Una vez se dispuso de modelos de PWR con distintos tipos de vaina se inició el análisis de secuencias en reactores PWR con combustible convencional y ATF mediante el código TRACE: TLFW con estrategia de aporte y purga (feed and bleed); SBLOCA con fallo del sistema HPSI; SBO; LBLOCA aplicando metodología BEPU y realizando el análisis de sensibilidad para obtener los parámetros más importantes en esta secuencia. Esta actividad se complementó con la simulación del test IFA 650.10 con vaina de Zry y con vaina tipo FeCrAl con el código TRACE en la que también se aplicó la metodología BEPU y se realizó el análisis de sensibilidad para obtener los parámetros más importantes para diversos materiales de vainas ATF.

A su vez, el grupo investigador de la UPV, realizó el análisis de secuencias de LBLOCA en reactores BWR con el código TRACE, realizándose una comparativa entre combustibles con vainas de Zircaloy y vainas ATF (FeCrAl) y aplicando metodología BEPU y con los correspondientes análisis de sensibilidad, en concreto aplicando metodologías Wilks y PCE (Polynomial Chaos Expansion).

Por otra parte, y dentro del contexto de las secuencias de accidente severo, el grupo de la UPM ha realizado dos tareas: La simulación y análisis del experimento QUENCH-19 con vaina tipo FeCrAl y el análisis de secuencias de SBO con accidente severo en PWR y BWR con el código MELCOR.

Finalmente, dentro del conjunto de tareas relacionadas con la cuantificación de la reducción del riesgo al

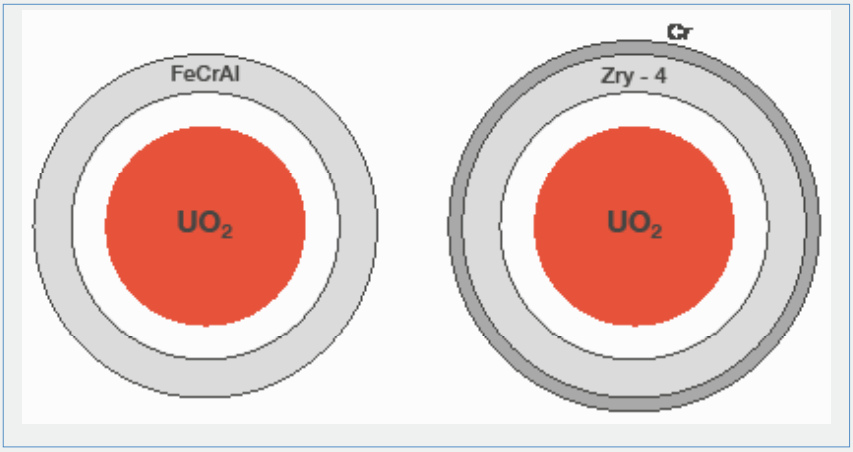


Figura1. *Combustibles con vainas ATF (FeCrAl y Zry con recubrimiento de Cr)*

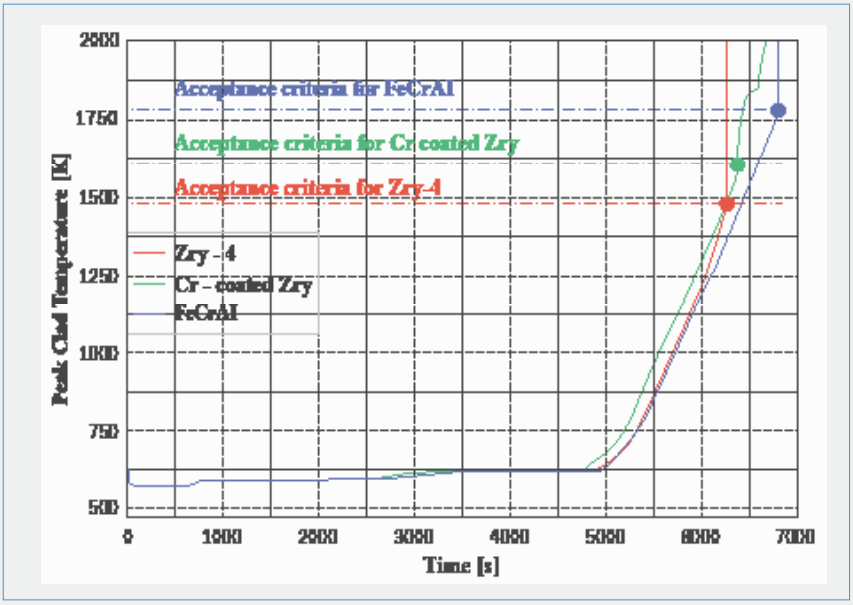


Figura 2. *Temperatura máxima de vaina para distintos combustibles ATF (secuencia de pérdida total de agua de alimentación)*

incorporar vainas ATF, se decidió utilizar los incrementos de tiempos disponibles para las actuaciones del grupo de operación de la sala de control obtenidos en el análisis de secuencias accidentales en reactores PWR mediante los códigos TRACE y MELCOR, junto con la información encontrada en la literatura técnica, a un modelo de APS de nivel 1 realizado en RiskSpectrum. Este análisis permitió obtener reducciones de la frecuencia de daño al núcleo de hasta el 30% en algunas secuencias y del 5%-10% en promedio de los distintos materiales de vaina ATF (Zry con recubrimiento de Cr y FeCrAl). Estos resultados, similares en orden de magnitud a otros encontrados en la literatura, indican la conveniencia de seguir investigado en otros materiales de combustible y vaina para reducir más el riesgo en condiciones accidentales, como son el combustible TRISO, las pastillas de combustible de alta densidad y materiales de vaina como SiC o aleaciones con Mo con recubrimientos externos.

Además de las tareas relacionadas al impacto del ATF en el análisis del riesgo y los márgenes de seguridad, se realizó otra actividad relacionada con el impacto del combustible ATF en la operación flexible de una planta PWR. Dicha actividad ha consistido a la simulación de un núcleo de reactor PWR con distintas vainas ATF en condiciones de operación flexible mediante el sistema SEANAP (ETSI Industriales de la UPM).

Junto a estas tareas de carácter técnico, se han realizado diversas actividades de formación y divulgación. Por una parte, se organizó un curso *online* (26 horas) sobre ATF, termomecánica del combustible y códigos de modelado del comportamiento del combustible en el que han participado como ponentes personal del CIEMAT, ENSO, IDOM, KIT y UPM. Por otra parte, para divulgar las actividades realizadas, se han realizado un conjunto de quince artículos, ponencias, workshops, presentaciones y seminarios relacionados con la temática del combustible ATF.

Por otro lado, fuera del alcance de este proyecto, el grupo de la UPM ha participado en colaboración con la empresa NFoque Advisory Services S.L. (NFQ) en el proyecto coordinado IAEA CRP "Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (ATF-TS)", 2020-2024, en el que el grupo UPM-NFQ ha realizado diversos análisis de ATF con los códigos TRACE, TRANSURANUS y MELCOR. Finalmente, y gracias a la experiencia previa en ATF y el reactor modular diseño NuScale (proyecto H2020 McSafer), se ha iniciado la participación en el proyecto INERI "Modeling of Small Modular Reactors with Accident Tolerant Fuels", recientemente aprobado en 2024 por el DOE y la UE, y en el que colaboran BNL, INL, NFQ y la UPM. De manera complementaria, el grupo de la UPM participa en las reuniones de los grupos de ATF y SMRs del CEIDEN en los que se aúnan, e intercambian ideas, sobre las actividades realizadas por las entidades españolas en estos dos campos.

Cabe finalmente mencionar que el presente proyecto finaliza en diciembre de 2025 y todavía se están realizando diversas actividades relacionadas con el combustible ATF y su impacto en la reducción del riesgo, el aumento de los márgenes de seguridad y la operación flexible. ■

Centro Común de Investigación de Karlsruhe

Eje central de la investigación nuclear europea



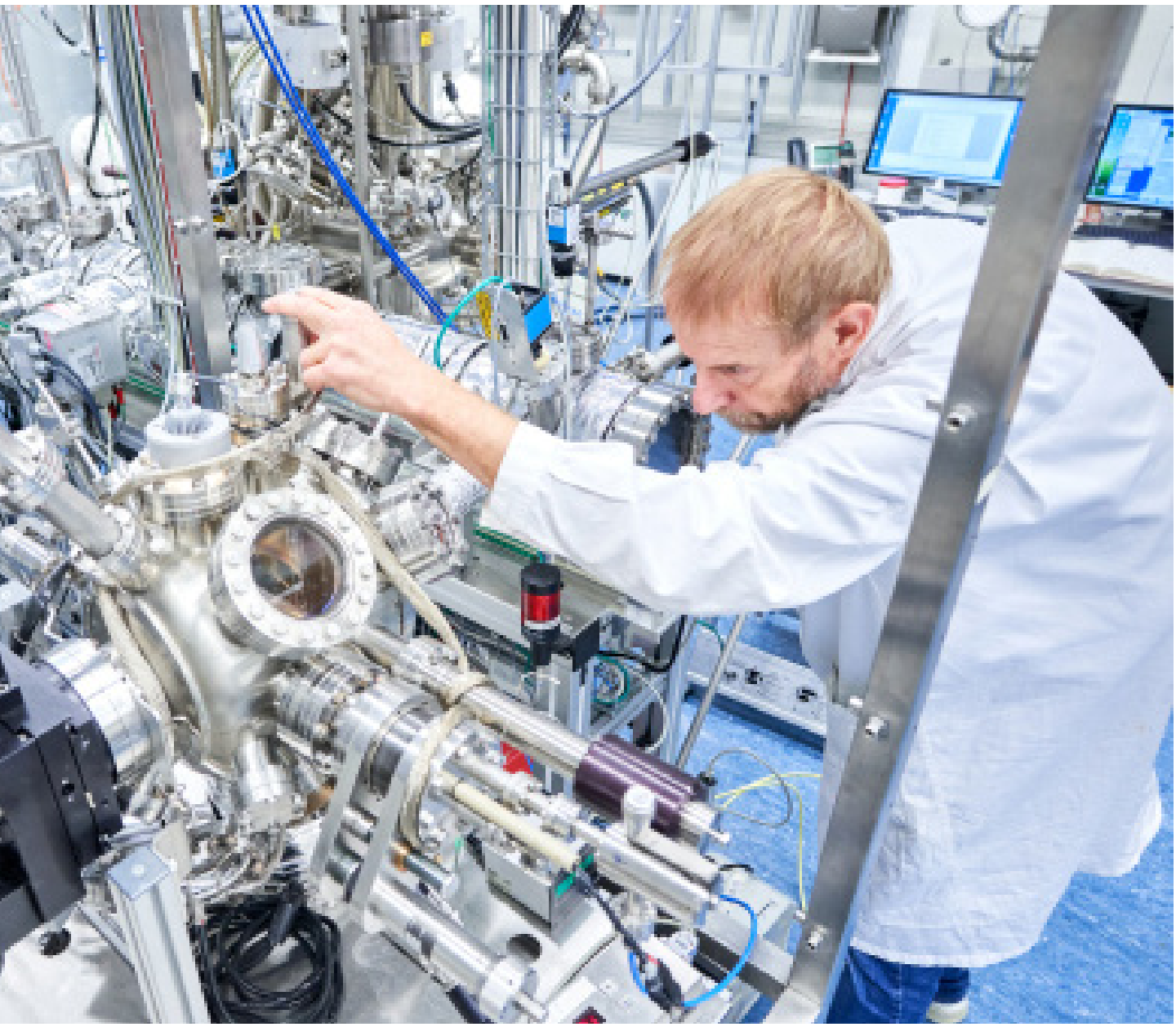


La coordinación entre los Estados miembros de la Unión Europea en el ámbito de la seguridad nuclear resulta esencial. El Centro Común de Investigación (JRC, por sus siglas en inglés) respalda esta cooperación a nivel continental al establecer un planteamiento de investigación unificado en ámbitos como el control de seguridad, la seguridad nuclear, la excelencia científica para la normalización, el apoyo a las políticas de la UE sobre temas nucleares y la colaboración en la gestión del conocimiento, educación y formación nuclear.

Texto: **Pilar Serrano** | Fotos: **JRC**

El JRC es una Dirección General de la Comisión Europea cuya misión es aportar pruebas científicas y contribuir al desarrollo de las políticas de la UE para que tengan un impacto positivo en la sociedad. Los investigadores son independientes y realizan su trabajo de forma neutral, libres de intereses comerciales, privados y nacionales. Creado como Centro Común de Investigación Nuclear en 1957, en virtud del artículo octavo del Tratado EURATOM, en la actualidad abarca prácticamente todas las políticas de la UE, como sanidad, energía, datos, ciencia y tecnología nucleares, industria, consumo y gestión de crisis. Dispone de seis sedes en cinco países europeos: Karlsruhe (Alemania), Ispra (Italia), Petten (Países Bajos), Sevilla (España), Geel y Bruselas (Bélgica), donde se encuentran las oficinas centrales.

La investigación nuclear se reparte entre las sedes de Karlsruhe, Ispra, Petten y Geel. Karlsruhe, el mayor laboratorio nuclear del JRC, se centra en salvaguardias, seguridad del combustible nuclear, residuos radiactivos y aplicaciones de radioisótopos, gracias a sus veinticuatro celdas calientes de gran capacidad, cajas de guantes y otros laboratorios y equipos científicos de carácter único. Por su parte, Ispra alberga una unidad de seguridad física y no proliferación, así como un programa de desmantelamiento. Mientras tanto, Petten se centra en la investigación de materiales estructurales y respuesta a emergencias. Por último, Geel se encuentra especializada en datos nucleares y mediciones de radiactividad, gracias a sus dos aceleradores, su laboratorio subterráneo y sus instalaciones de referencia



para producir materiales nucleares de gran pureza.

El JRC de Karlsruhe actúa como eje central de la investigación nuclear del JRC, en colaboración con los demás centros. Todos ellos ejecutan el Programa EURATOM de Investigación y Formación del JRC, así como el mantenimiento y la difusión de los conocimientos nucleares en Europa al servicio de todos los Estados miembros, al margen de las decisiones de estos en materia energética. Por lo tanto, resulta de vital importancia promover sinergias estrechas y complementarias con las organizaciones nacionales de seguridad nuclear.

Según datos de la Comisión Europea, en la sede alemana del JRC trabajan trescientas treinta personas. Unas doscientas treinta son personal permanente, entre ellos quince españoles, y en torno a un centenar son contratistas externos. La investigación que llevan a cabo sirve para avalar las políticas continentales en materia de seguridad nuclear, dando a estas un soporte científico y técnico.

El centro mantiene una colaboración intensa con universidades e

La investigación que lleva a cabo sirve para avalar las políticas continentales en materia de seguridad nuclear, dando soporte científico y técnico







El JRC estudia el comportamiento de los combustibles en un reactor nuclear, en condiciones normales, anormales y de accidente

instituciones científicas y técnicas de España. En 2025 renovarán el acuerdo de colaboración con ENRESA para los próximos cinco años, con lo que esta fructífera colaboración alcanzará casi un cuarto de siglo. Esta asociación se ha traducido en importantes contribuciones a la evaluación de la seguridad en la parte final del ciclo del combustible nuclear, en aportaciones significativas al proyecto de almacenamiento geológico profundo, con numerosas publicaciones científicas y la oferta de oportunidades de formación para jóvenes científicos e investigadores españoles en Karlsruhe. Además, la asociación con el CIEMAT también ha sido una constante a lo largo de los años dentro del JRC y se está preparando un nuevo acuerdo de colaboración.

Por su parte, los programas de colaboración de estudios de doctorado con universidades españolas han permitido a los estudiantes realizar la labor experimental de sus tesis doctorales en el JRC de Karlsruhe, lo que contribuye a la educación y formación de nuevas generaciones de científicos. De igual forma, investigadores de diversos centros españoles han accedido a las infraestructuras del JRC dentro del programa «Open Access», por el que el JRC abre sus instalaciones y laboratorios al ámbito académico, organizaciones de investigación, industria, pymes y, en general, al sector público y privado. Compartir a escala europea estas instalaciones de vanguardia es una forma de llevar a cabo una investigación rentable y de alta calidad.

Áreas de investigación

Entre las actividades más habituales del JRC, destacan estudios experimentales y de modelización que abarcan la seguridad de los reactores nucleares y del ciclo del combustible. Los trabajos también se dirigen, dentro de un espectro mucho más amplio, a prepararse ante posibles emergencias, la vigilancia ambiental de la radiactividad, las salvaguardias para evitar la proliferación, la gestión de los residuos nucleares o investigaciones en radioisótopos de uso médico.

Por ejemplo, el JRC de Karlsruhe estudia el comportamiento de los combustibles en un reactor nuclear, en condiciones normales, anormales y de accidente, o analiza





Sede del Centro Común de Investigación de Karlsruhe

las propiedades físicas y químicas de actínidos como el plutonio y otros elementos. Del mismo modo, en Karlsruhe se investiga sobre métodos de separación para soluciones de residuos nucleares, se utiliza la espectrometría de masas de plasma para medir los niveles de radiactividad en el medioambiente y se estudia el comportamiento del combustible nuclear gastado mientras se almacena o se elimina a largo plazo.

Las tareas realizadas por el personal del JRC de Karlsruhe contribuyen a la definición y aplicación de las políticas nucleares de los miembros de la Unión Europea. Un trabajo que no es muy conocido por el público, pero que contribuye a la seguridad de todos y a una mejor preparación ante posibles emergencias. ■

Programa EURATOM

En la actualidad, el Centro Común de Investigación de Karlsruhe contribuye a la ejecución del Programa de Investigación y Formación de EURATOM 2021-2025 para enfrentar los retos más acuciantes de la energía nuclear en Europa. El JRC trata de complementar las contribuciones de los Estados miembros de la UE a través de su plan de formación e investigación.

Según el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, aunque la fecha de finalización es 2025, el programa se prorrogará dos años más, hasta 2027. En línea con el trabajo que se está llevando a cabo en el JRC, esta ampliación pondrá en marcha nuevas actividades de investigación en radioprotección, seguridad nuclear y gestión de residuos, al tiempo que contribuirá al desarrollo de aplicaciones como los radioisótopos para uso médico y otras destinadas a la exploración espacial. En este sentido, la razón de ser de este programa comunitario es aportar esfuerzos a largo plazo para reducir los riesgos de seguridad y apoyar el desarrollo de tecnologías nucleares más seguras, mientras que se optimiza la protección contra las radiaciones.

A este respecto, EURATOM persigue un doble objetivo general: desplegar actividades de investigación y formación para apoyar la protección radiológica y la mejora continua de la seguridad nuclear y, de modo paralelo, contribuir a la descarbonización a largo plazo del sistema energético de la Unión Europea de manera segura, eficiente y protegida. En cuanto a los fines de carácter específico del programa, se persigue mejorar el uso de la energía nuclear y las aplicaciones no energéticas de las radiaciones ionizantes, mantener y aumentar los conocimientos técnicos, fomentar el desarrollo de la energía de fusión y apoyar la política comunitaria en materia de controles de seguridad nuclear. ■



Lise Meitner , investigando en su laboratorio en 1930

Lise Meitner y la fisión nuclear

Considerada por Einstein como la «Curie alemana», Lise Meitner fue la primera persona en describir el proceso de fisión nuclear y una de las pioneras en el estudio de la radiactividad.

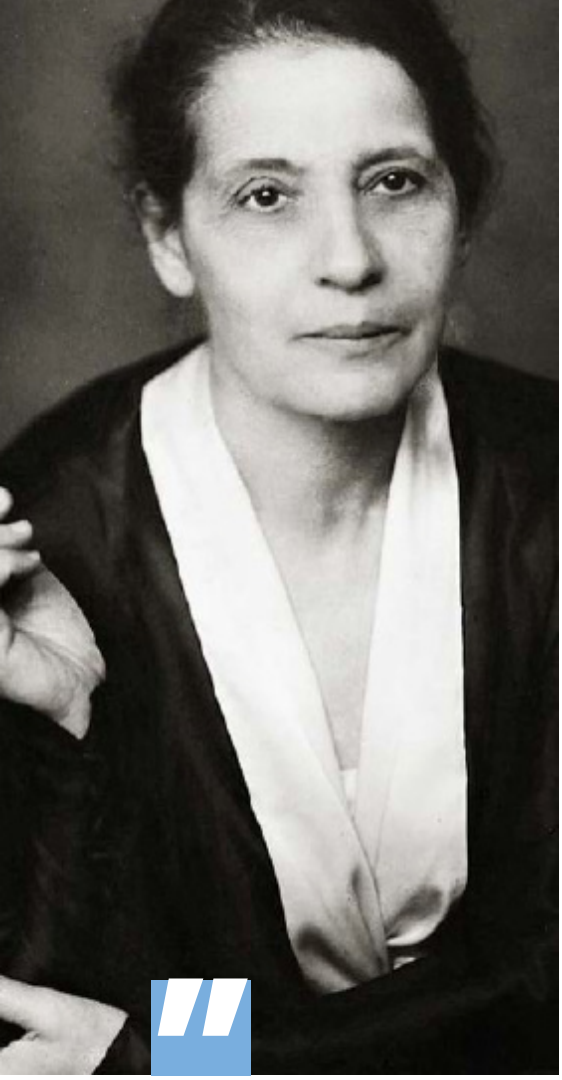
Texto: **Isabel Alonso** | Fotos: **Archivo**

Lise Meitner nació en 1878 en una familia judía de clase media. Su padre, un abogado más interesado por la política y el progreso que por la religión, convirtió su casa en un lugar de reunión para juristas, legisladores y escritores, lo que permitió que sus hijos crecieran en el ambiente intelectual de la Viena de finales del siglo XIX, uno de los centros culturales y científicos más importantes de Europa.

Cuatro años después de que Austria permitiera a las mujeres entrar a la universidad, Meitner aprobó el examen de ingreso y, en 1905, gracias a una disertación sobre la conducción de calor en materiales heterogéneos, obtuvo su doctorado en Física. Fue la segunda mujer en Viena que lo logró.

Sus años en Berlín

En 1907 se mudó a Berlín y conoció al químico Otto Hahn, con quien estableció una amistad y una colaboración que duró varias décadas. Juntos realizaron mediciones de la radiación de diferentes elementos en una antigua carpintería que habían acondicionado como laboratorio. En 1912, cuando se permitió a las mujeres acceder a las instituciones educativas, Meitner continuó su trabajo con Hahn como invitada en el Kaiser-Wilhelm Institut für Chemie, donde permanecería veinticinco años.

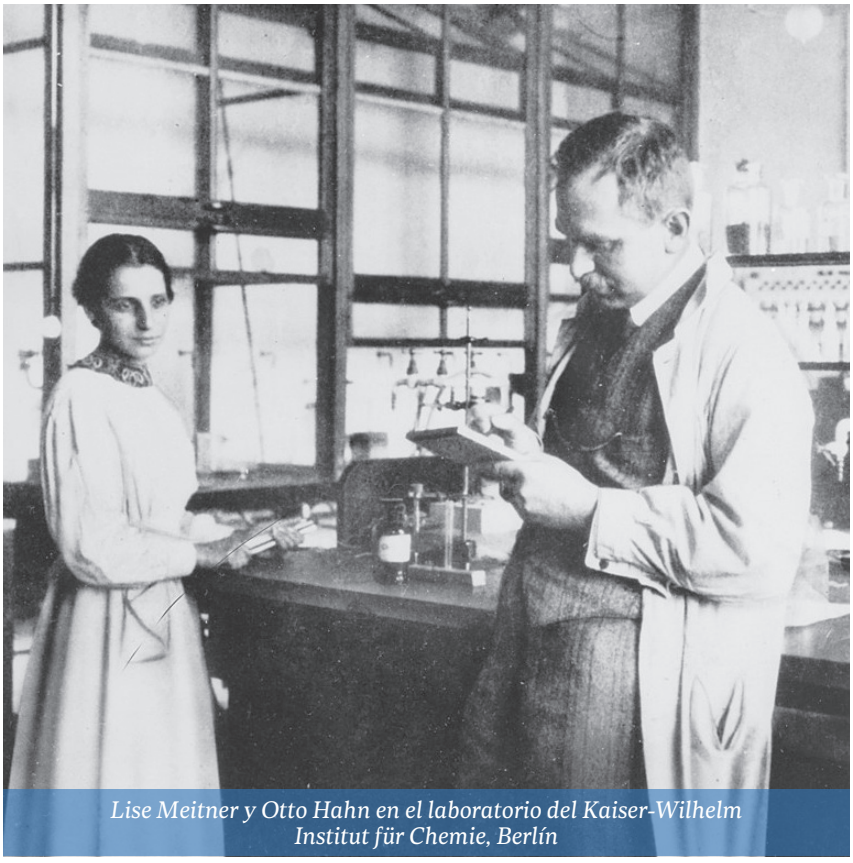




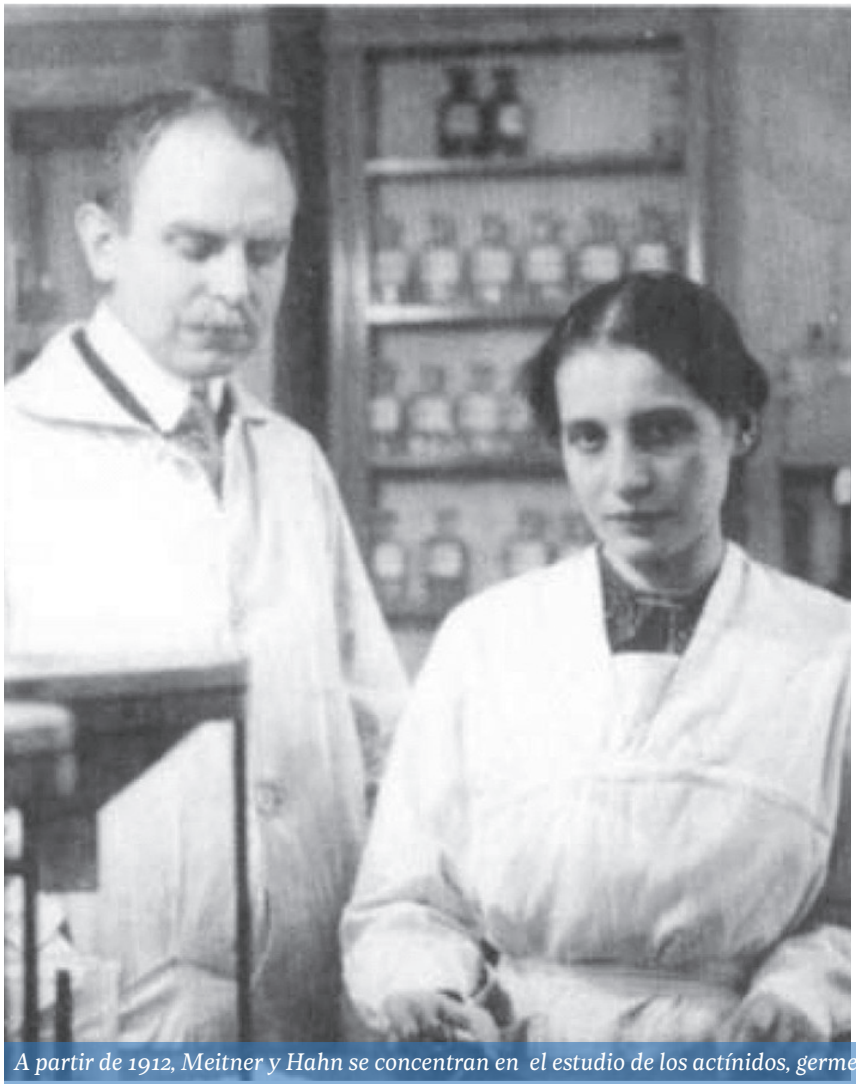
Lise Meitner, en torno a 1906. Fuente: Churchill College, Cambridge

Meitner y Hahn confirmaron la existencia de un isótopo del elemento ubicado entre el torio y el uranio en la tabla periódica: el protactinio, precursor del actinio

Al estallar la Primera Guerra Mundial, Hahn puso sus conocimientos en química al servicio del ejército alemán y Meitner se presentó como enfermera voluntaria en el departamento de radiología de un hospital austriaco. Sin embargo, ambos intentaban coordinar sus permisos para coincidir en Berlín y continuar con su trabajo, que les permitió descubrir el protactinio y darlo a conocer una vez acabada la guerra.



Lise Meitner y Otto Hahn en el laboratorio del Kaiser-Wilhelm Institut für Chemie, Berlín





A partir de 1912, Meitner y Hahn se concentran en el estudio de los actínidos, germen del descubrimiento del protactinio

Protactinio, el elemento 91

Al comienzo de su colaboración, el trabajo de Meitner y Hahn consistió en estudiar los rayos β, tanto su absorción y dispersión como su curvatura al aplicar un campo magnético. A partir de 1912, ambos se centraron en la serie de los actínidos, donde habían detectado emisiones de rayos α y β de un precursor aún desconocido. Interrumpidos por la Primera Guerra Mundial, cada vez que podían regresar a Berlín realizaban nuevas mediciones, en especial de actinio, un elemento radiactivo presente en proporción muy pequeña en minerales de uranio. En 1913, el químico inglés Soddy y el polaco Fajans llegaron a la conclusión, de forma independiente, de que durante la desintegración radiactiva la liberación de una partícula α daba lugar a un elemento dos lugares hacia atrás en la tabla periódica, mientras que la de una partícula β creaba un elemento un lugar hacia delante. A partir de aquí y tras procesar pechblenda, Meitner y Hahn confirmaron la existencia de un isótopo del elemento ubicado entre el torio y el uranio en la tabla periódica: el protactinio, precursor del actinio (al emitir una partícula α) y el elemento número 91.

En 1918, Meitner ya era jefa del departamento de física del instituto y, en 1922, obtuvo la habilitación para impartir clases en la Universidad de Berlín, donde dio coloquios y supervisó las investigaciones que llevaban a cabo los estudiantes de su área hasta 1933.

La situación del país se fue deteriorando con las políticas del partido nazi, que ocupaba el Gobierno. Cuando en 1938 Alemania invadió Austria, Meitner, que no negaba su ascendencia judía, dejó de estar protegida por su nacionalidad y su pasaporte perdió validez. Una orden de Himmler prohibía a los profesores universitarios, fueran o no judíos, abandonar Alemania, por lo que Meitner no obtuvo permiso para salir del país ni con la intercesión de amigos tan influyentes





Meitner, en 1946, durante su estancia en EE. UU. Fuente: Smithsonian

como Carl Bosch ante el ministro del Interior.

Sin embargo, Dirk Coster, un profesor de la Universidad de Groninga –Países Bajos– al que habían avisado amigos en común, accedió a ayudarla. Tras obtener permiso de las autoridades holandesas, viajó a Berlín y se reunió en secreto con Meitner y Hahn para preparar su huida. Al día siguiente, Meitner acudió a trabajar como era habitual y permaneció hasta tarde corrigiendo trabajos de sus alumnos. Después, en apenas hora y media, Hahn ayudó a Meitner a preparar dos pequeñas maletas y la llevó a su casa, donde pasó la noche. Al amanecer, sin saber que uno de sus vecinos había informado a la policía de su huida, se reunió con Coster, que la estaba esperando en uno de los trenes que cruzaban la frontera por una línea no demasiado concurrida. Los oficiales de aduanas, con los que Coster ya había hablado durante su viaje de ida, los dejaron pasar. Con casi sesenta años y diez marcos en la cartera, Meitner logró abandonar Alemania.

Una nueva vida en Suecia

Tras una breve estancia en Groninga, las autoridades suecas le permitieron la entrada en el país a pesar de que solo contaba con su –inválido– pasaporte austriaco. Fue allí donde hizo la primera interpretación teórica del proceso de fisión nuclear. Después, comenzó a trabajar en el Nobel Institute for Physics, en Estocolmo, con medios muy limitados y un salario mínimo. El mundo estaba en guerra y el presupuesto para la ciencia era exiguo.

> *Meitner y Frisch calcularon que la carga de un núcleo de uranio era tal, que el impacto de un neutrón podría volverlo inestable y dividirlo en dos fragmentos nucleares*

Permaneció veintidós años en Suecia. En 1946 se reconocieron sus aportaciones para entender la fisión nuclear y pasó seis meses en Estados Unidos dando conferencias como profesora visitante de la Catholic University de Washington. En 1947 se trasladó al laboratorio de la Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, donde se estaba construyendo un reactor nuclear experimental. En 1960 se retiró y se estableció en Cambridge para estar más cerca de su familia, en especial de su sobrino, el también físico Otto Robert Frisch.

Distinguida con numerosos reconocimientos y nominada varias veces al premio Nobel tanto de física como de química –que Hahn recibió en solitario por el descubrimiento de la fisión nuclear–, la importancia de su trabajo fue minimizada e invisibilizada por su condición de mujer con ascendencia judía, hasta tal punto que, durante treinta y cinco años, el Deutsches Museum de Munich expuso los instrumentos de su trabajo en Berlín como si fueran los de Hahn. Lise Meitner murió en 1968 en Cambridge tras haber dedicado su vida a la ciencia, pero sin obtener el reconocimiento que merecía el trabajo que llevó a cabo, incluso en las condiciones más adversas. En 1997, el elemento 109 de



Lise Meitner conversa con unos estudiantes, poco antes de retirarse, en 1959

la tabla periódica fue nombrado meitnerio en su honor. ■

Bibliografía

Castelo Torras, J. (2015). *Lise Meitner y la energía del uranio*. Sociedad Nuclear Española.

Frisch, O. R. (1970). *Lise Meitner, 1878-1968* [en línea]. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 16, pp. 405-420. The Royal Society. Disponible en: https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsbm.1970.0016

Kubbinga, H. (2019). *A Tribute to Lise Meitner (1878-1968)* [en línea].

Europhysics News, 50 (4), pp. 22-26. Disponible en: https://www.europhysicsnews.org/articles/epn/pdf/2019/04/epn2019504p22.pdf

Le Naour, C., Maloubier, M. y Aupiais, J. (2022). *The speciation of protactinium since its discovery: a nightmare or a path of resilience* [en línea]. Radiochimica Acta, 110, pp. 481-493. Disponible en: https://hal.science/hal-03655084/document

Meitner, L. y Frisch, O. R. (1939). Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction. *Nature*, 143, pp. 239-240.

Sime, R. L. (1996). *Lise Meitner: A Life in Physics*. Berkeley: University of California Press.

La fisión nuclear

El descubrimiento del neutrón y de la radiactividad artificial hizo pensar que era posible crear nuevos elementos transuránicos mediante el bombardeo de átomos de uranio con neutrones. Meitner y Hahn se sumaron a esta línea de investigación, pero la situación de Alemania obligó a Meitner a huir de Berlín y abandonar sus experimentos. Sin embargo, ambos siguieron en contacto y, en diciembre de 1938, cuando Meitner se encontraba con su sobrino Frisch pasando las navidades en casa de su amiga Eva von Bahr-Bergius, llegó una carta de Hahn. En la misiva aseguraba que al bombardear un núcleo de uranio con neutrones no solo no se creaba un nuevo elemento, sino que se formaba bario, para lo que no tenía explicación. Meitner y Frisch utilizaron el modelo de Bohr de «gota líquida» para calcular que la carga de un núcleo de uranio era tal, que el impacto de un neutrón podría volverlo inestable y, en vez de formar un elemento transuránico, dividirlo en dos fragmentos nucleares alejados por repulsión eléctrica a gran velocidad. Esto generaba una energía de aproximadamente 200 MeV. Meitner calculó que la masa de los núcleos que se habían formado era, en conjunto, menor a la del núcleo de uranio, con una diferencia de 1/5 de la masa de un protón. Al aplicar la fórmula de la teoría de la relatividad de Einstein –$E=mc^2$–, Meitner descubrió que 1/5 de la masa de un protón eran precisamente 200 MeV. Todo encajaba; acababan de describir lo que, ya en febrero de 1939, denominarían «fisión nuclear». ■



Chernóbil: simulan el accidente para medir daños en la biodiversidad

Treinta y ocho años después, el desastre de la central de Chernóbil continúa sirviendo para analizar los efectos de un posible accidente nuclear y minimizar los riesgos de que se produzca. Un estudio español recrea el trágico suceso de Prípiat para medir los daños de la radiación en la biodiversidad.

Científicos de la Universidad de Oviedo y de la Estación Biológica de Doñana han simulado el histórico accidente para cuantificar los daños que podrían tener sucesos similares para la flora y la fauna, especialmente en anfibios por tratarse de modelos de estudio adecuados. Los trabajos llevan ocho años en marcha y buscan recrear un accidente nuclear para comprobar si la melanina puede ejercer como factor de protección contra la radiación.

Después de varios años recogiendo muestras en Chernóbil, estos científicos españoles comprobaron cómo la coloración de las ranas había cambiado. Aquellas que subsistían dentro de la zona de exclusión presentaban una pigmentación más oscura que las que estaban fuera del área evacuada tras el desastre. Algunos ejemplares lucían incluso tonos completamente negros, en contraposición con el característico verde de la especie, que pudieron influir en su supervivencia.

Dejando a un lado los estudios observacionales, el grupo de expertos ha reproducido el accidente de Chernóbil a escala de laboratorio para medir cómo afectan a larvas de una misma puesta de sapo de espuelas, muy común en Doñana. En el experimento actual, estos pequeños animales están siendo sometidos a altos niveles de radiación en un corto periodo de tiempo para medir cómo sucesos nucleares de este tipo pueden afectar a organismos vivos. ■

Metales tóxicos en los tampones, ¿un peligro para la salud?

La revista Environment International ha publicado recientemente un estudio de científicos estadounidenses sobre la presencia de metales tóxicos en los tampones, un producto utilizado por millones de mujeres en todo el mundo. Los resultados confirmaron la presencia de plomo, arsénico o cadmio, entre otros, aunque no analizan si pueden escapar del tampón y ser absorbidos por el cuerpo.

El principal problema surge por el hecho de que la vagina tiene una mayor capacidad de absorción que otras partes del cuerpo. De este modo, serán futuras investigaciones las que traten de demostrar si los tampones son seguros y la presencia de estos metales tóxicos no supone un peligro real para la salud de las mujeres.

El análisis de sesenta muestras de catorce marcas de tampones confirmó la presencia de hasta dieciséis metales. Los científicos del estudio, que acudieron también a productos del mercado europeo para sus investigaciones, consideran que debe existir una regulación más estricta y más controles que garanticen que este bien de primera necesidad no implica riesgos para la salud. ■

EFEMÉRIDES

Cuarenta años buscando extraterrestres

El Instituto SETI, acrónimo en inglés de «búsqueda de inteligencia extraterrestre», cumple cuarenta años rastreando el cosmos para dar con signos de vida más allá del planeta Tierra. En un sentido más amplio, este organismo con sede en California pretende explorar, comprender y explicar el origen y la naturaleza de la vida en el universo.

Fundado en 1984 con el patrocinio y apoyo de figuras clave en la astronomía, como el divulgador Carl Sagan, el Instituto SETI no ceja en su empeño y recientemente ha anunciado la primera búsqueda de señales de tecnología extraterrestre en otras galaxias que no sean la Vía Láctea. Para ello, empleará frecuencias bajas, en torno a un centenar de megahercios, extendiendo la búsqueda de señales inteligentes a un radio de 2800 galaxias. La apuesta constituye todo un hito en las infructuosas búsquedas a lo largo de estas cuatro décadas.

Se trata de una organización científica que monitoriza el espacio en búsqueda de señales de radio de civilizaciones que pudieran considerarse tecnológicamente avanzadas. De su trayectoria destaca que fue una de las pioneras en el desarrollar la computación distribuida, de gran importancia en programas de calado como el del gran colisionador de hadrones del CERN para encontrar el bosón de Higgs. En este sentido, se trata de aprovechar la capacidad de millones de computadores personales o de potencia media que estén interconectados a través de Internet para poner al alcance del proyecto la supercomputación extrema



en momentos en que esos ordenadores no se utilizan. Tampoco han faltado proyectos llamativos, como el estudio del lenguaje de las ballenas para identificar posibles comunicaciones inteligentes no humanas o la red colaborativa SETI@home en la que hasta cinco millones de internautas ayudaron a procesar datos en los que hallar algún rastro alienígena.

Uno de sus resultados más célebres fue la conocida como «señal WOW!», que duró poco más de un minuto y llegó procedente de la constelación de Sagitario una noche de agosto de 1977. La señal nunca volvió a repetirse y, medio siglo más tarde, continúa levantando especulaciones de todo tipo. Fuese una pista extraterrestre o no, lo que está claro es que el Instituto SETI seguirá escudriñando la inmensidad del firmamento en busca de alguna señal que pruebe que no estamos solos en el universo. ■

LIBROS



El magnetismo continúa siendo un asombroso desconocido entre el gran público. *Un mundo magnético. La omnipresencia de los imanes* es un volumen del investigador y catedrático Francesc Lloret Pastor, que explora las fronteras de este fascinante cosmos, analizando sus aplicaciones y su presencia permanente en el día a día para lograr que el lector lo comprenda un poco mejor. Se trata de un libro de divulgación científica ameno que persigue aclarar, de forma sencilla y entretenida, algunos de los aspectos de estas fuerzas que todo lo mueven. ¿Tienen los imanes capacidades curativas?, ¿cómo se constituye el campo magnético terrestre y hasta qué punto es importante? o ¿qué consecuencias tendría una inversión de los polos magnéticos? son solo algunas de las preguntas a las que esta obra trata de dar respuesta. Esta novedad editorial cuenta con el aval de un referente como Lloret Pastor para abordar estos asuntos y acercar un ámbito que, como no podría ser de otra manera, siempre genera una fuerte atracción. ■

Lloret Pastor, F. (2024).
Un mundo magnético. La omnipresencia de los imanes.
Publicacions de la Universitat de València, 210 pp.

EN RED

Descubierto en España un gen que podría ser el causante de la ELA



Los investigadores del estudio-HOSPITAL SANT PAU

Investigadores del Instituto de Investigación Sant Pau han identificado una nueva mutación en el gen ARPP21, hasta ahora no vinculada con la esclerosis lateral amiotrófica (ELA), que podría estar relacionada con su etiología. Este descubrimiento se produjo al observar una incidencia inusualmente alta de la enfermedad en la región sudeste de La Rioja, donde el número de casos superaba las expectativas. El estudio reveló que la mutación afecta a una proteína de unión a ARN. Este hallazgo no solo tiene el potencial de mejorar el diagnóstico de la enfermedad, sino que también abre la puerta al desarrollo de tratamientos personalizados y permite una investigación más detallada sobre el papel de esta proteína en la ELA.

Más información: https://www.recercasantpau.cat/es/actualidad/investigadors-de-sant-pau-descobreixen-un-nou-gen-que-causa-ela/ ■

Detección precoz del Parkinson gracias a la IA

Un innovador estudio del University College de Londres y el Centro Médico de Gotinga, en Alemania, ha desarrollado un análisis de sangre que, con la ayuda de inteligencia artificial (IA), puede prever la aparición del Parkinson hasta siete años antes de que se presenten los síntomas. Publicado en la revista *Nature Communications*, este modelo utiliza un aprendizaje automático para identificar y analizar ocho biomarcadores en el plasma sanguíneo, calculando las probabilidades de desarrollar la enfermedad. A pesar de que la naturaleza del Parkinson aún no se entiende en su totalidad, y



no existe un tratamiento curativo definitivo, la detección temprana de la enfermedad ya se considera un avance crucial para la intervención precoz. ■

Más información: https://www.nature.com/articles/s41467-024-48961-3

REDES

CienciaDeSofa

Busca despertar la curiosidad de los espectadores sobre el mundo que les rodea, con explicaciones detalladas y rigurosas sin dejar de ser entretenidas. Plantea temas científicos variados, utilizando un lenguaje claro y sencillo, a menudo acompañado de ilustraciones, gráficos y un toque de humor.

Un Minuto de Ciencia

Publica contenido breve, conciso y fácil de entender sobre variedad de temas científicos, desde biología, física y química, hasta astronomía y tecnología. El grupo fomenta la interacción entre sus miembros, siempre orientada a fomentar el interés por la ciencia y la educación científica en el público general.

@boticariagarcia

Trata temas de nutrición, medicamentos, hábitos saludables y prevención de enfermedades, a la vez que desmiente mitos de salud y combate la desinformación. En ocasiones inicia debates sobre temas de salud y ciencia en la actualidad, siempre en tono desenfadado y con estilo comprensible para el público general.

@soyalvarobilbao

Neuropsicólogo, psicoterapeuta y autor español con más de un millón de seguidores en Instagram. Aunque aborda temas de neurociencia y psicología, su enfoque principal está en el bienestar familiar y en comprender y fomentar el desarrollo cerebral de los niños. Ofrece consejos prácticos sobre educación emocional, técnicas de crianza respetuosa y estrategias para estimular el desarrollo cognitivo y emocional infantil.

@doctorfision

Con un estilo humorístico y dinámico característico, explora temas de física, astronomía, tecnología y otras ramas científicas, y los explica de forma sencilla. Responde a preguntas de sus seguidores, desmiente mitos y aclara conceptos erróneos comunes, promoviendo el interés por la ciencia y el desarrollo del pensamiento crítico en su audiencia.

Audiencia real al Consejo de Seguridad Nuclear en Zarzuela



El rey Felipe VI recibió en audiencia a una representación del Consejo de Seguridad Nuclear en el Palacio de la Zarzuela. Durante el encuentro institucional, el presidente del CSN, Juan Carlos Lentijo, trasladó al monarca los principales hitos del regulador durante los últimos años y sus retos actuales. Acompañaron al presidente los consejeros Javier Dies, Francisco Castejón, Pilar Lucio y Elvira Romera; el secretario general, Pablo Martín; y los directores técnicos de Seguridad Nuclear y de Protección Radiológica, Teresa Vázquez y Javier Zarzuela. Lentijo significó ante el Jefe del Estado el desempeño diario de los más de cuatrocientos profesionales del CSN, «comprometidos con la excelencia y conscientes del deber con la sociedad actual y con las futuras generaciones».

Esta es la segunda audiencia real en la que participa el CSN, después de la concedida por Juan Carlos I en julio de 2010. En aquella ocasión, la presidencia del organismo era ostentada por Carmen Martínez Ten y la recepción se enmarcó en los actos con motivo del trigésimo aniversario del regulador.

Segunda convocatoria de ayudas de la Cátedra Argos

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), encabezada por la consejera Pilar Lucio, se reunió con los responsables de la Cátedra Argos, perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), para aprobar la segunda convocatoria de ayudas en 2024. El objetivo de la comisión es el seguimiento periódico de las actividades realizadas por la UPC en el marco de la Cátedra, en cumplimiento de las bases que estipulan la colaboración entre el regulador y la institución académica.

Los responsables de la Cátedra Argos presentaron las principales actividades y proyectos de formación e investigación realizados el pasado año, así como los previstos para lo que queda de ejercicio. Entre ellos, destacaron la concesión de becas para realizar trabajos fin de grado y máster, así como para el apoyo al doctorado y otras actividades.

El presidente del CSN comparece en el Congreso de los Diputados y rinde cuentas del organismo regulador

El presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Juan Carlos Lentijo, compareció en la Comisión de Transición Ecológica y Reto Demográfico del Congreso de los Diputados para informar sobre la actividad del organismo regulador durante los ejercicios de 2021 y 2022. Acompañado por el pleno del CSN y los directores técnicos de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, abordó las actividades de los últimos dos años y respondió a las preguntas formuladas por los miembros de la comisión. El responsable del regulador repasó el estado de la seguridad nuclear y la protección radiológica, destacando el desarrollo del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología (Inveat). Aprobado en abril de 2021, Inveat supuso la renovación o la ampliación de 851 equipos del sistema sanitario y está orientado a reducir la obsolescencia de los mismos. Por su parte, según los datos presentados en el Congreso de los Diputados, el número de personas expuestas a radiaciones ionizantes asciende a 114 444 ciudadanos.



El CSN continúa avanzando en materia de transparencia



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebró la vigesimoséptima reunión de su Comité Asesor para la información y participación pública, en la que fueron presentados los seis nuevos miembros que formarán parte del mismo durante los próximos cuatro años. El encuentro sirvió para repasar los principales retos del regulador relacionados con la transparencia y comunicación con el público, para seguir avanzando en este ámbito. Además se presentaron las conclusiones y oportunidades de mejora identificadas en la evaluación interna desarrollada por una consultora independiente. A este respecto, el presidente del CSN, Juan Carlos Lentijo, reiteró el compromiso del organismo con la mejora continua y la transparencia, situando al informe como punto de partida para lograr que el funcionamiento del Comité sea más eficiente y mejore su percepción y notoriedad. ■

Cita en Bruselas de los reguladores nucleares europeos

El Grupo Europeo de Reguladores Nucleares (ENSREG, por sus siglas en inglés), presidido por el máximo responsable del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Juan Carlos Lentijo, celebró en Bruselas la séptima edición de la Conferencia Reguladora Internacional. El evento, organizado entre ENSREG y la Comisión Europea, contó con la participación de más de doscientos profesionales del sector nuclear en la Unión Europea, con invitaciones a expertos de terceros países.



Lentijo repasó las actividades desarrolladas por ENSREG a lo largo de los últimos tres años y las tareas que actualmente están en curso dentro de sus grupos de trabajo. Entre ellas, el presidente del CSN destacó la aplicación de las medidas derivadas de las revisiones internacionales entre pares, los trabajos centrados en la gestión segura del combustible gastado y de los residuos radiactivos, así como las actividades de transparencia y comunicación de la asociación. ■

ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN



Trillo, diez años más

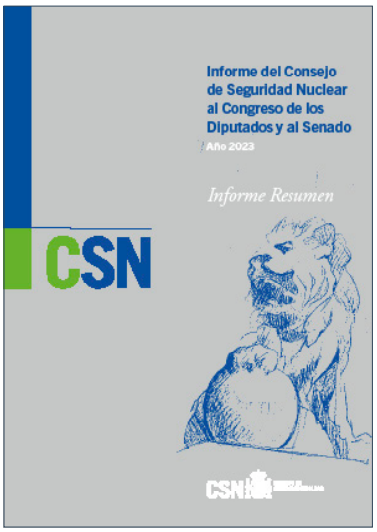
El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear informó a favor de la solicitud para renovar la autorización de explotación de la central nuclear Trillo (Guadalajara) por un periodo de diez años, hasta el 16 de noviembre de 2034. El informe, que recoge el dictamen técnico del CSN, será remitido al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y será tenido en cuenta en el proceso de autorización. ■

Informe favorable al borrador del Real Decreto sobre RINR

El borrador definitivo del Real Decreto sobre el Reglamento de instalaciones nucleares y radiactivas (RINR) y otras actividades relacionadas con la exposición a las radiaciones ionizantes cuenta ya con el informe favorable del Pleno del CSN. El Pleno también aprobó el informe nacional de cumplimiento de la Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y residuos radiactivos y dio luz verde a la firma de un convenio con el Ciemat para mejorar el sistema de calidad de la vigilancia radiológica ambiental. ■



ÚLTIMAS PUBLICACIONES

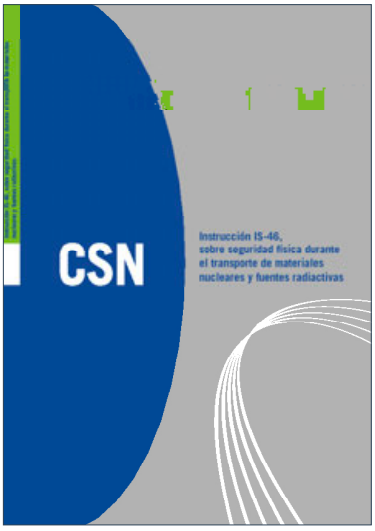


Informe del Consejo de Seguridad Nuclear al Congreso de los Diputados y al Senado

Recopila la información relevante del CSN en cuanto a su composición y funcionamiento, relaciones internacionales e institucionales y funciones de información y comunicación pública. También incluye las tareas llevadas a cabo en materia de inspección, control y supervisión de instalaciones nucleares y radiactivas, así como de elaboración de normativa específica

Edita: Consejo de Seguridad Nuclear

350 páginas.



Instrucción IS-46 sobre seguridad física durante el transporte de materiales nucleares y fuentes radiactivas. Aborda las necesidades para la eficaz implantación de medidas de protección física para el transporte de materiales nucleares de categoría II y III, así como de fuentes radiactivas de categoría I, II y III, en base a lo regulado en el Real Decreto sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas. Esta instrucción viene a complementar a la IS-41 y mantiene un enfoque gradual de las normativas en base a la peligrosidad de los materiales transportados.

Más información en: www.csn.es



CSN 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: 913460558 / peticiones@csn.es

También puede suscribirse a la edición digital de la revista ALFA a través de este formulario *online* [http://run.gob.es/xdjxkd]

La información facilitada 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.

ON THE COVER

6 > Nuclear AI, promising advantages and remaining challenges

Artificial intelligence maintains important synergies with nuclear technology. It can be applied to fields like medicine, electric power and radiation protection

REPORTS

14 > Cancer: aiming at the bullseye

The revolution in radiotherapy has given way to new techniques that offer an uncertain but hopeful future

20 > What we mean when we talk about quantum computing

An impact for society and a paradox of what's coming

INTERVIEW

26 > José María Bermúdez de Castro

"Science, no matter its development, cannot solve all of humanity's problems"

TECHNICAL ARTICLES

30 > New seismic studies at Spanish nuclear power plants' locations

A regulatory approach on risks within the facilities before these phenomena

39 > Digital radiological passbook

Digitisation of the individual radiological monitoring document used in Spain since 1990 as an instrument for data recording

SCIENCE AND CULTURE

46 > Halfway point between imagination and feasibility

Science has always been linked to literature, both in works of fiction and in essays and educational works

RADIOGRAPHY

52 > Educational Portal on Radiation Protection

Teaching and learning materials in the field of radiation protection

CSN I+D

54 > Increase of the security margins in LWR plants due to accident-tolerant fuel (ATF) project

ENTITIES

56 > The Joint Research Centre in Karlsruhe

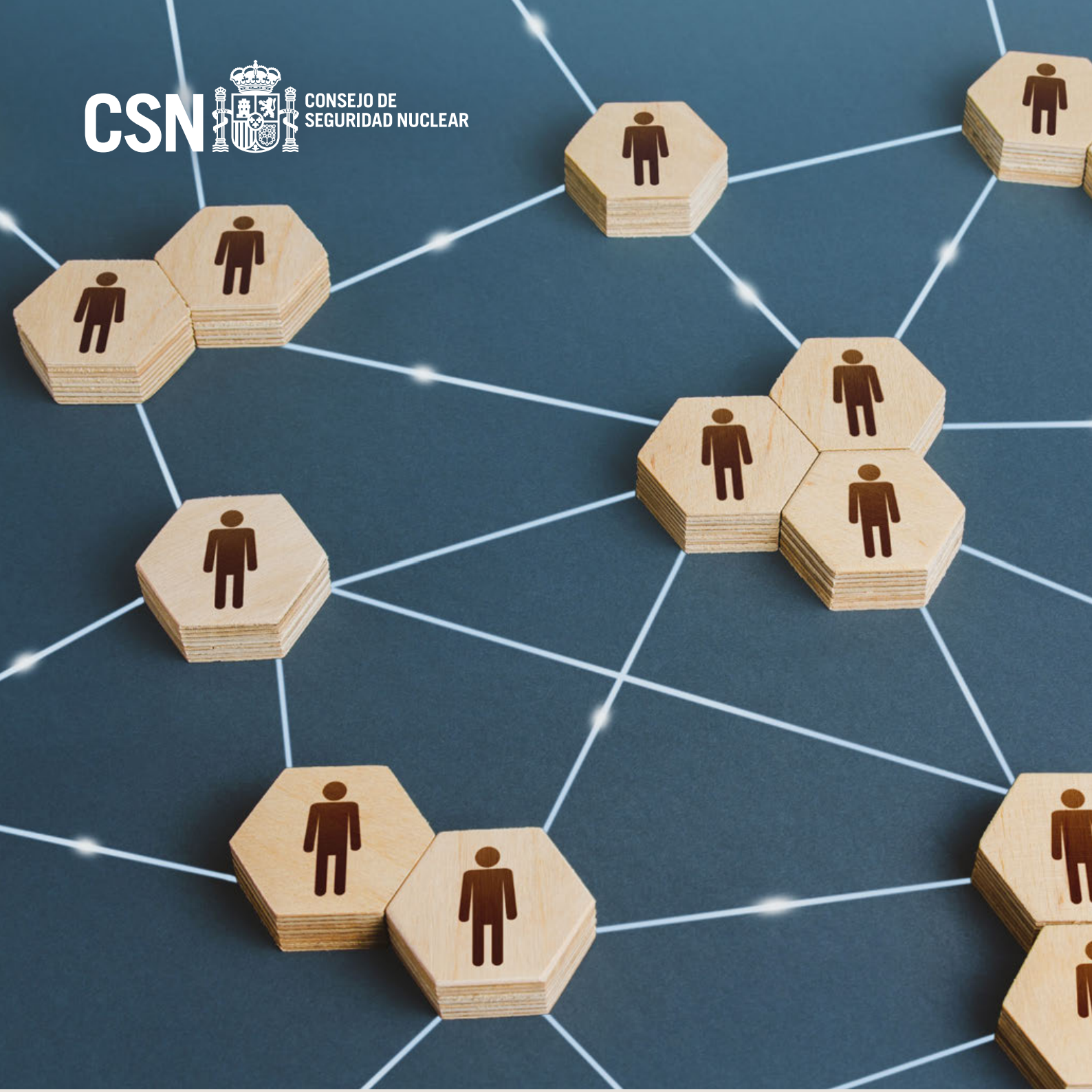
The central axis of the European nuclear research

NAMES IN SCIENCE

60 > Lise Meitner and the nuclear fission

She was the first person to describe the process of nuclear fission and a pioneer in the study of radioactivity. Together with Otto Hahn, she also discovered the element 91: protactinium

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR



¡Conecta con nosotros!

https://twitter.com/CSN_es

https://www.youtube.com/c/ConsejoSeguridadNuclear

https://www.linkedin.com/company/consejo-de-seguridad-nuclear/

http://www.csn.es

TRANSPARENCIA › COMUNICACIÓN › DIVULGACIÓN