



CSN

ALFA

Revista de seguridad
nuclear y protección
radiológica

Consejo de
Seguridad Nuclear

Número 64
Diciembre 2025

Combustibles de tecnología avanzada: nuevo campo en la investigación nuclear

Radioisótopos
contra la caza furtiva,
un experimento sudafricano
con rinocerontes

Nuevos desafíos
de la seguridad nuclear:
protección y prevención
en zonas de conflicto

Entrevista a
Isabel Fariñas Gómez,
catedrática de Biología Celular
de la Universidad de Valencia



¡Conecta con nosotros!



https://twitter.com/CSN_es



[https://www.youtube.com/c/
ConsejoSeguridadNuclear](https://www.youtube.com/c/ConsejoSeguridadNuclear)



[https://www.linkedin.com/company/
consejo-de-seguridad-nuclear/](https://www.linkedin.com/company/consejo-de-seguridad-nuclear/)



<http://www.csn.es>

TRANSPARENCIA > COMUNICACIÓN > DIVULGACIÓN

La seguridad y la protección radiológica sirven de hilo conductor para este nuevo número de *Alfa*, a través de tres reportajes. El primero se centra en los combustibles de tecnología avanzada, una de las líneas de innovación más activas en el ámbito nuclear internacional. El texto recorre el camino desde el combustible convencional a nuevos diseños basados en recubrimientos y materiales mejorados, capaces de ofrecer un comportamiento más robusto tanto en operación normal como en situaciones de accidente.

El segundo traslada al escenario de la conservación de la fauna amenazada. El Proyecto Risótomo muestra cómo el uso controlado de radioisótopos puede convertirse en una herramienta innovadora para combatir la caza furtiva de rinocerontes, permitiendo trazar el origen de los cuernos incautados y la persecución de estos delitos.

El tercero aborda el papel de las instalaciones nucleares en contextos de conflicto armado. A partir de experiencias recientes, se analizan riesgos específicos que afrontan estas instalaciones, la necesidad de garantizar la integridad de las barreras de seguridad y la respuesta del sistema internacional para reforzar los marcos de protección física y los mecanismos de verificación. El consenso técnico y jurídico construido durante décadas debe adaptarse a escenarios geopolíticos más

complejos, sin perder de vista el principio de que la seguridad nuclear no puede verse comprometida.

La entrevista a Isabel Fariñas reflexiona sobre el valor de la ciencia básica, el peso de la evidencia experimental en la toma de decisiones y la importancia de sostener proyectos de largo recorrido para que el conocimiento acabe traducándose en beneficios clínicos y sociales. La investigadora recuerda que la confianza en la ciencia se construye a partir de rigor, transparencia y tiempo, y que la formación de nuevas generaciones de investigadores es tan esencial como la obtención de resultados.

Los dos artículos técnicos profundizan en cuestiones estrechamente vinculadas a la misión del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). El primero se centra en el uso de herramientas avanzadas de simulación para el estudio de incendios en centrales nucleares, fruto de años de colaboración entre el CSN y la Universidad de Cantabria. El segundo artículo revisa la experiencia acumulada en vigilancia radiológica ambiental, describiendo las redes de medida, los criterios de evaluación y la forma en que estos datos sostienen la confianza de la población en la explotación segura de las instalaciones.

La sección Ciencia y Arte se detiene en esta ocasión en la aplicación de técnicas científicas al estudio y conservación del patrimonio. A través de ejemplos concretos, se

muestra cómo la caracterización físico-química de materiales, las técnicas de imagen no destructivas y los métodos de datación contribuyen a diagnosticar el estado de obras y edificios históricos y a orientar intervenciones respetuosas con su integridad.

En la sección de I+D, el protagonismo recae en un trabajo dedicado al Proyecto Karst y al estudio del radón en entornos kársticos. Se analiza cómo la compleja geometría de estos sistemas condiciona la generación, el transporte y la acumulación del gas radiactivo, y qué implicaciones tiene para la evaluación de dosis y la gestión del riesgo.

El apartado Entidades está dedicado al Observatorio de Calar Alto, infraestructura científica singular que ha contribuido de forma decisiva al desarrollo de la astrofísica moderna en España y en Europa.

La sección Ciencia con Nombre Propio recupera la figura de Rosalind Franklin, cuyo dominio de la cristalografía de rayos X fue decisivo para desvelar la estructura de doble hélice del ADN.

Cierra este número, un *in memoriam* dedicado a Lola Aguado, fallecida el pasado 9 de octubre. Bióloga de formación, desarrolló una larga carrera en el CSN, ocupando responsabilidades clave en protección radiológica, inspección de instalaciones radiactivas industriales y coordinación técnica en el control de fuentes. DEP.

ALFA

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN

Número 64
Diciembre 2025



Comité Editorial

Juan Carlos Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Silvia Calzón Fernández
Teresa Vázquez Mateos
Isabel Villanueva Delgado
Ignacio Martín Granados
J. Pedro Marfil Medina
Manuel Luis 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 I. 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, BSC, CEFGA,
CNA, Envato, Freepick,
istockphoto

Producción e impresión

Editorial MIC
Pol. Ind. Trabajo del Camino
24010 León

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 **Combustibles de tecnología avanzada: nuevo campo en la investigación nuclear**

Los llamados combustibles de tecnología avanzada buscan ampliar los márgenes operativos, incrementar el rendimiento y mejorar la respuesta del sistema frente a situaciones extremas, sin necesidad de rediseñar los reactores actuales.



REPORTAJES

12 **Radioisótopos contra la caza furtiva, un experimento sudafricano con rinocerontes**

El Proyecto Risótomo propone insertar pequeñas cantidades de radioisótopos en los cuernos de los rinocerontes para hacerlos trazables mediante la infraestructura global de seguridad nuclear.

20 **Nuevos desafíos de la seguridad nuclear: protección y prevención en zonas de conflicto**

Distintos acontecimientos en el actual contexto internacional de crisis están normalizando peligrosamente la implicación de instalaciones nucleares civiles en conflictos armados.



ENTREVISTA

28 **Isabel Fariñas Gómez**

Catedrática de Biología Celular de la Universidad de Valencia.



ARTÍCULOS TÉCNICOS

32 **Colaboración CSN-UC: diez años impulsando la simulación CFD de incendios en centrales nucleares**

38 **Vigilancia de la radiactividad ambiental en España: el papel del CSN**

CIENCIA Y ARTE

45 **Lo que el arte oculta**

Ciencia al servicio de la conservación del patrimonio: diversas metodologías permiten comprender en profundidad las obras pictóricas y asegurar su supervivencia para las generaciones futuras.



RADIOGRAFÍA

50 **Subestaciones de 400 kilovatios**

Conexión de una central nuclear española con la red de transporte eléctrico.



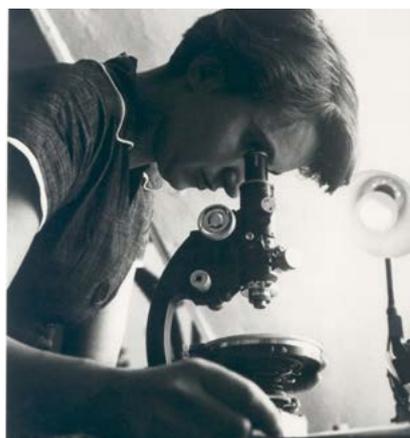
CSN I+D

52 **Caracterización radiológica de zonas kársticas y su impacto en el radón**

ENTIDADES

54 **Observatorio Astronómico de Calar Alto (CAHA)**

Cincuenta años como referente europeo en astronomía óptica e infrarroja.



CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

60 **Rosalind Franklin: la arquitecta olvidada del ADN**

Su maestría en la cristalografía de rayos X fue decisiva para desentrañar la estructura de doble hélice del ADN, piedra angular de la biología molecular moderna.



65 **Reacción en cadena**

68 **Panorama**

70 **Últimas publicaciones**



Combustibles de tecnología avanzada

Nuevo campo en la investigación nuclear

Central nuclear Trillo

La seguridad global de las instalaciones nucleares depende en gran medida del comportamiento del combustible dentro del reactor y de los sistemas que lo gestionan. Los llamados combustibles de tecnología avanzada (ATF) buscan ampliar los márgenes operativos, incrementar el rendimiento y mejorar la respuesta del sistema frente a situaciones extremas, sin necesidad de rediseñar los reactores actuales.

■ Texto: Isabel Robles

Desde los años cincuenta, con la aparición de las primeras centrales nucleares, uno de los grandes temas de investigación en los que se ha centrado la industria nuclear es el combustible empleado, no solo desde el punto de vista de la generación energética, sino también de la seguridad.

«El combustible nuclear actual es el resultado de un largo proceso de

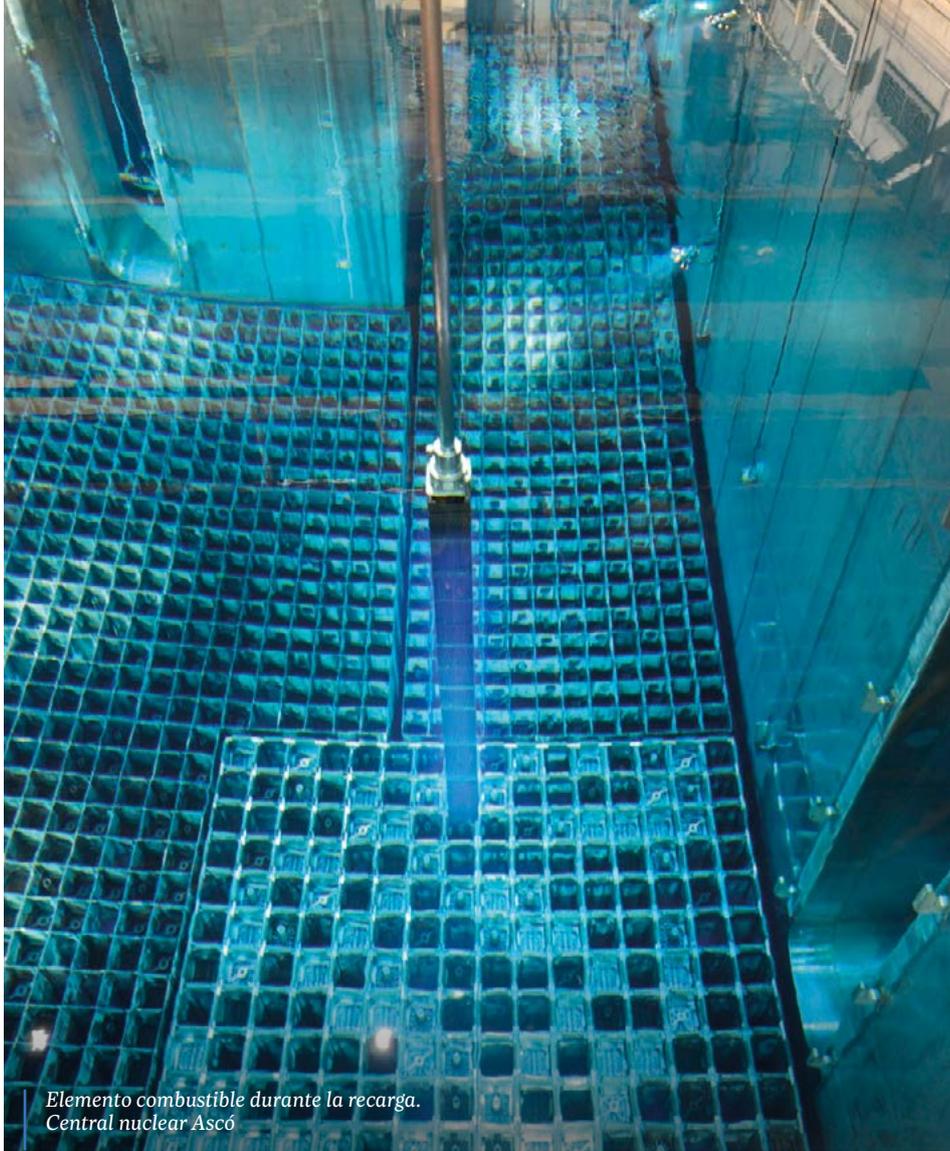
optimización orientado a mejorar su rendimiento, fiabilidad y comportamiento seguro bajo las condiciones en reactor», explica Pau Aragón, doctor en Ciencia y Tecnología Nuclear y presidente de Jóvenes Nucleares. «Esta búsqueda de la excelencia también abarca el estudio en condiciones de accidente, un ámbito que experimentó un notable impulso tras lo ocurrido en Fukushima Daiichi», afirma.

En 2011, el tsunami provocado por un terremoto a 130 km de la costa japonesa inundó los generadores diésel de emergencia que, debido al fallo de la red eléctrica por el sismo, sostenían los sistemas de refrigeración de los reactores de la central nuclear de Fukushima. Al aumentar la temperatura, el agua se evaporó y las vainas que contenían el uranio, hechas con una aleación de circonio (zircaloy), comenzaron



COMBUSTIBLE NUCLEAR

En el ámbito nuclear, el término combustible se utiliza por analogía con las centrales térmicas convencionales, aunque no sea estrictamente preciso desde el punto de vista químico. La combustión es una reacción química de oxidación (por ejemplo, la del carbón o el gasóleo con el oxígeno del aire), mientras que en un reactor nuclear la energía se libera mediante un proceso físico distinto: la fisión de núcleos pesados, como el uranio-235. Aun así, la expresión combustible nuclear está ampliamente extendida y aceptada para referirse al material fisible que alimenta el reactor y permite la generación de energía.



Elemento combustible durante la recarga.
Central nuclear Ascó

a oxidarse y liberar hidrógeno. La gran concentración de gas que se alcanzó produjo varias explosiones que destruyeron los techos de los edificios donde se encontraban los reactores 1 y 3.

Tras el accidente, la comunidad internacional reforzó la necesidad de desarrollar materiales capaces de ofrecer mayores márgenes en situaciones extremas y se acuñó el término ATF (*accident tolerant fuel* o combustible tolerante a accidentes). No obstante, para evitar que esta denominación pusiera en duda, erróneamente, la seguridad de los combustibles nucleares convencionales, el significado de las siglas ha variado: «con la promulgación en 2019 de la Nuclear Energy Innovation and Modernization Act (NEIMA), la definición oficial adoptada por la Comisión Reguladora Nuclear de los EE. UU. (USNRC) estableció que un combustible ATF debe, además, reducir

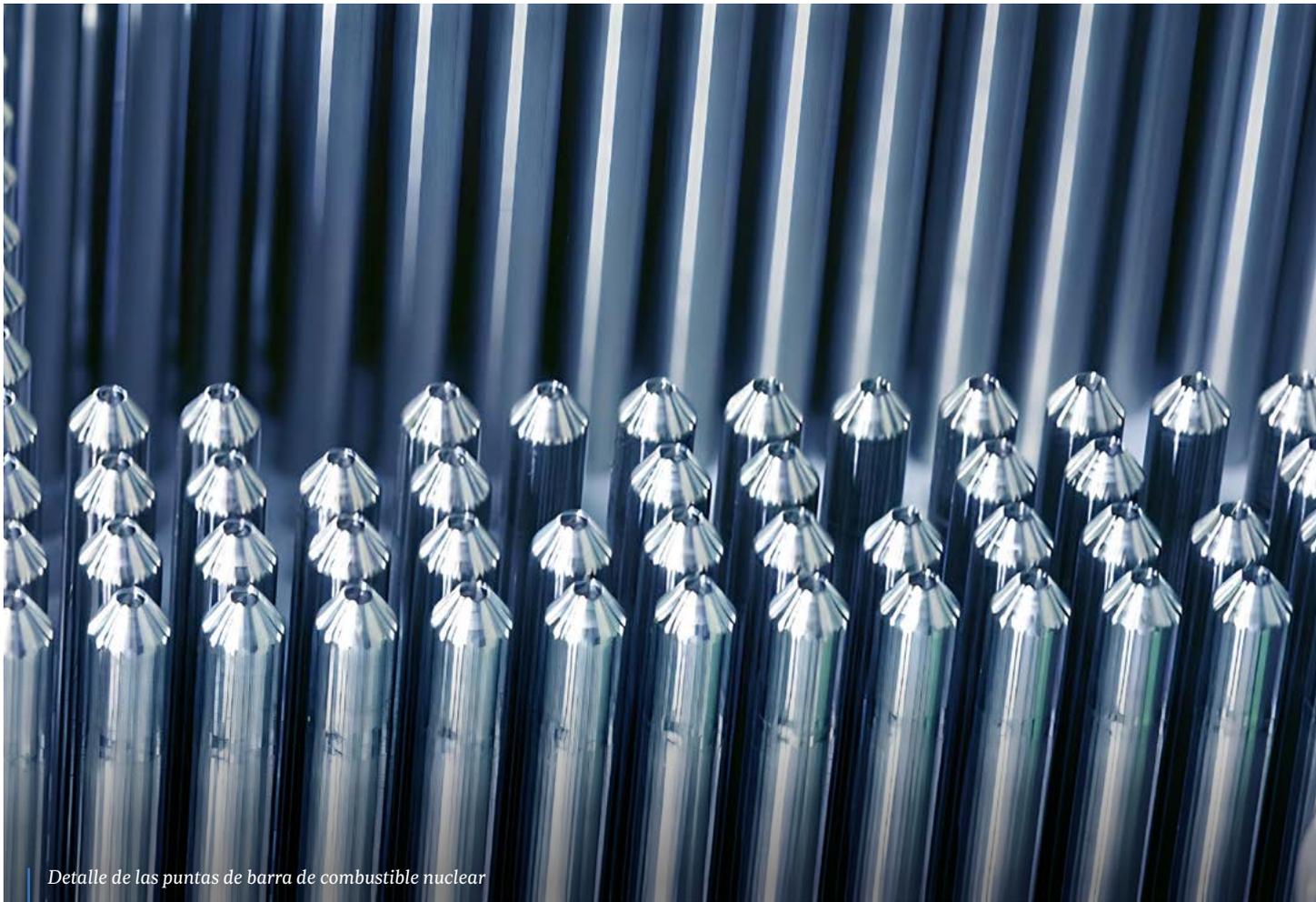
el costo de la electricidad durante la vida útil de un reactor nuclear. En consecuencia, el término *accident-tolerant fuel* ha sido progresivamente reemplazado por *advanced technology fuel* (combustible de tecnología avanzada), con el fin de reflejar un enfoque más amplio», añade Aragón.

De este modo, «el término ATF engloba a aquellos combustibles nucleares que se apartan del sistema tradicional, basado en pastillas de dióxido de uranio contenidas en tubos de aleación de circonio, e incorporan materiales y diseños avanzados que permiten una operación más exigente del núcleo sin comprometer la seguridad. Además, «ofrecen ventajas, como mayor resistencia a la corrosión, mejor retención de productos de fisión y una mayor adaptabilidad entre la pastilla y la vaina para gestionar las tensiones generadas durante la operación. En situaciones de ac-

cidente severo, los combustibles ATF mantienen la integridad y capacidad de refrigeración durante más tiempo, dando un margen adicional de seguridad que facilita la intervención de los sistemas de emergencia que frenan el accidente», explica Cristina Muñoz-Reja, directora de I+D+i en la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA), con más de treinta años de experiencia en combustible nuclear.

Evolutivos y revolucionarios

La investigación en combustibles de tecnología avanzada no se desarrolla de manera uniforme. Como explica Muñoz-Reja, «ha progresado a diferentes velocidades según la complejidad tecnológica requerida para su desarrollo e implementación». Esta diversidad de ritmos ha llevado a clasificar los ATF en dos grandes categorías: los evolutivos, que introducen mejoras sobre los materiales y diseños ya



Detalle de las puntas de barra de combustible nuclear



Los elementos combustibles son conjuntos estructurales que agrupan entre doscientas y trescientas varillas, cada una de las cuales contiene pastillas de óxido de uranio enriquecido.

consolidados en la industria, y los revolucionarios, que incorporan materiales completamente nuevos y requieren procesos de validación y homologación mucho más exigentes. «En este último caso, las lagunas de datos y las necesidades de caracterización experimental son más amplias, lo que sitúa su posible implementación comercial en un horizonte temporal más lejano», admite Aragón.

Por ese motivo, los ATF evolutivos representan la línea de desarrollo más cercana a su implantación en los reactores nucleares. Se basan en ir modificando el combustible

convencional, un marco tecnológico con décadas de experiencia operativa y un comportamiento bien conocido. «Se han realizado irradiaciones en reactores experimentales y desarrollado modelos y códigos específicos que permiten simular su respuesta tanto en operación normal como en situaciones accidentales. Gracias a estos avances, junto con la evidencia experimental acumulada, los organismos reguladores han autorizado su uso en configuraciones de barras o de elementos de demostración en varios países. Sin embargo, aún no se han realizado recargas completas equivalentes a un tercio del núcleo, es decir, a una tercera parte de los elementos combustibles que lo componen», indica Muñoz-Reja.

Principalmente, las modificaciones introducidas en los combustibles para crear ATF evolutivos se centran en dos grandes líneas de investigación. Por un lado, se pretende mejorar la pastilla de

dióxido de uranio mediante técnicas como el dopado con óxidos de aluminio, silicio o cromo, que aumentan la retención de productos de fisión, mejoran la plasticidad del material y facilitan la acomodación de tensiones durante la operación; por otro, se busca reducir la oxidación de la vaina – que compromete su resistencia y produce hidrógeno, con el consiguiente riesgo de explosión– gracias a diferentes recubrimientos. «Para resistir la oxidación por vapor a altas temperaturas, la capa de óxido formada en la superficie de la vaina debe ser estable física y químicamente en presencia de vapor, al mismo tiempo que actúa como barrera efectiva frente al transporte de compuestos químicos oxidantes hacia el material de la vaina», añade Aragón. Ya que el óxido de circonio (ZrO_2) no cumple estos requisitos, la investigación se ha centrado en otros, como el de cromo (Cr_2O_3), alu-

minio (Al₂O₃) y silicio (SiO₂), que poseen una estabilidad aceptable frente al vapor.

Para Muñoz-Reja, la estrategia más desarrollada es «la aplicación de un recubrimiento de cromo sobre tubos convencionales de aleación de circonio. Este recubrimiento, aplicado mediante diversas tecnologías (deposición física de vapor, pulverización térmica o galvanización), actúa como barrera frente a la corrosión y reduce la generación de hidrógeno tanto en condiciones normales como en accidentes. Ciertos diseños incluyen, además, capas intermedias para optimizar la adherencia y la compatibilidad entre el recubrimiento y el sustrato de circonio».

En concreto, como destaca Aragón, «los estudios postirradiación de los ensayos que se han llevado a cabo con pastillas de UO₂ dopadas con cromo y vainas de aleación de circonio (Zircaloy) recubiertas con cromo han mostrado un comportamiento mejorado, con un grado de oxidación muy reducido y baja adherencia de depósitos superficiales (*crud*), incluso a altos quemados próximos a 75 MWd/kgU».

No obstante, el cromo no es la única solución que se está implementando, sino que también se utilizan materiales cerámicos basados en carburo de silicio (SiC) o las aleaciones FeCrAl, que no generan hidrógeno y destacan por su «excelente resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Sin

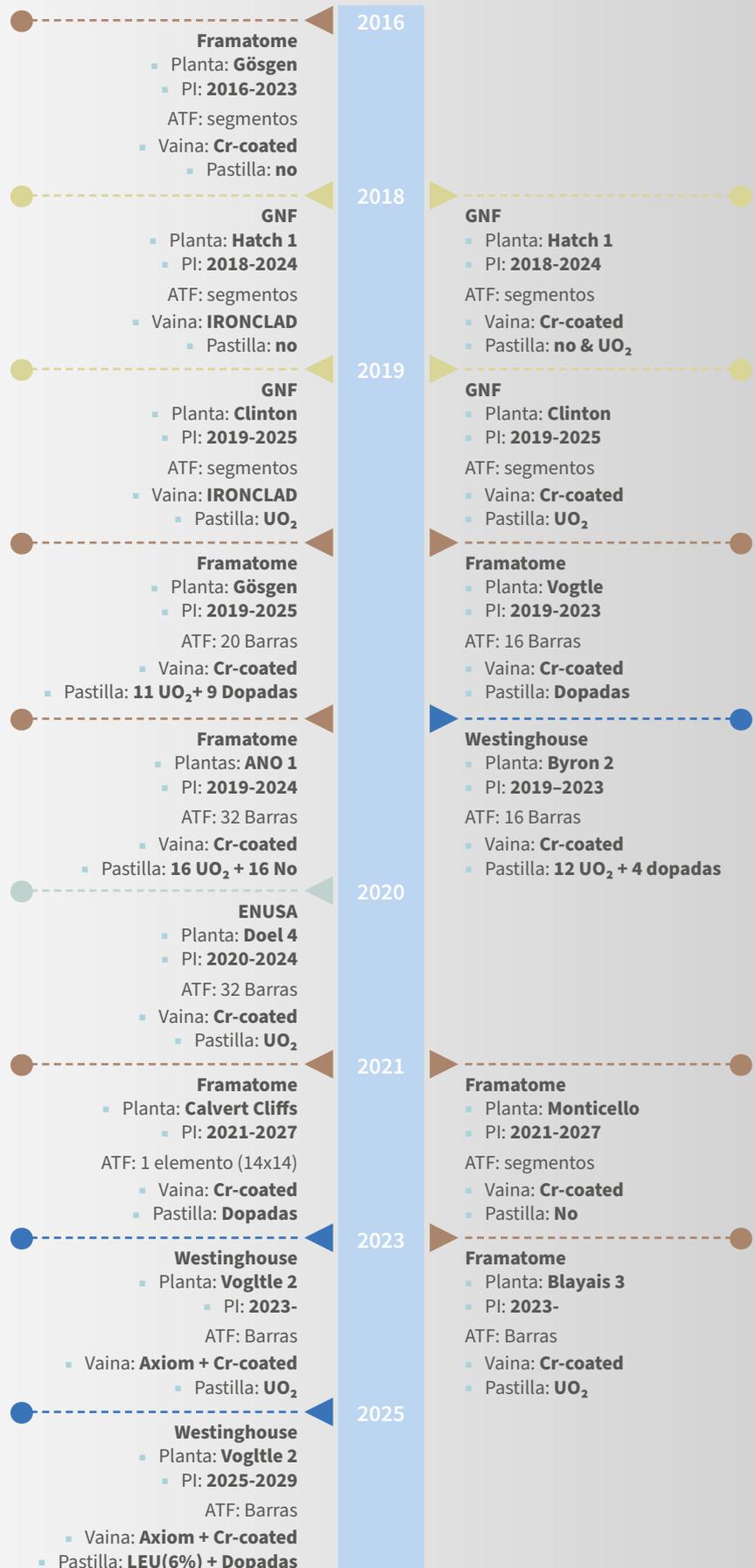
Legenda / Tecnologías

FRAMATOME-PROtect EATF
 Vaina con recubrimiento de cromo sobre M5Framatome
 Pastillas mejoradas con cromia

GNF-ARMOR
 Vaina de circonio recubierto con blindaje para aumentar la seguridad
 Mayor enriquecimiento hasta 8 % y mayor quemado

Westinghouse-EnCore
 Vaina de Zirlo recubierta de cromo y vaina AXIOM.
 Pastillas de UO₂ dopadas con cromia (Cr2O3) y alúmina (Al2O3), conocidas como pastillas ADOPT

Figura 1. Línea del tiempo E-ATF (Combustibles de Tecnología Avanzada)



El papel de España en los ATF

Para Muñoz-Reja, directora de I+D+i en ENUSA, «el sector nuclear español –centros de investigación, universidades e industria– participa activamente en el desarrollo de ATF, trabajando en ensayos de materiales y recubrimientos y en simulaciones del comportamiento en operación normal y escenarios de accidente. Además, colabora en programas internacionales europeos y estadounidenses».

El Grupo ATF, coordinado por el CEIDEN, reúne a las principales instituciones españolas implicadas en el estudio y desarrollo de ATF, encargadas de la difusión del conocimiento, la puesta en común de resultados y la cooperación público-privada.

ENUSA, empresa que fabrica y aprovisiona de combustible nuclear a cinco de los siete reactores españoles y a diecisiete europeos, también cuenta con un papel destacado en la investigación de este tipo de combustibles que se inició en el marco del programa EnCore de desarrollo de ATF. Asimismo, ha participado en otros proyectos, como «la revisión de diseño del programa de demostración en el reactor comercial Byron (Estados Unidos), donde se irradiaron combustibles con vainas recubiertas y pastillas ATF revolucionarias de siliciuro de uranio. Además, fue el primer fabricante europeo en producir barras de demostración con uranio enriquecido y vaina cromada ATF que operan en la central belga Doel 4», recuerda Muñoz-Reja.

Gracias a esto, España se encuentra posicionada dentro del desarrollo global de combustibles ATF, que no solo abarca la investigación, sino también la industrialización y el seguimiento de los resultados.



Fabricación de elementos combustibles en Juzbado (ENUSA)

embargo, su madurez tecnológica y la base de datos experimentales disponibles son aún más limitadas que las de las soluciones de vaina cromada», reconoce Muñoz-Reja.

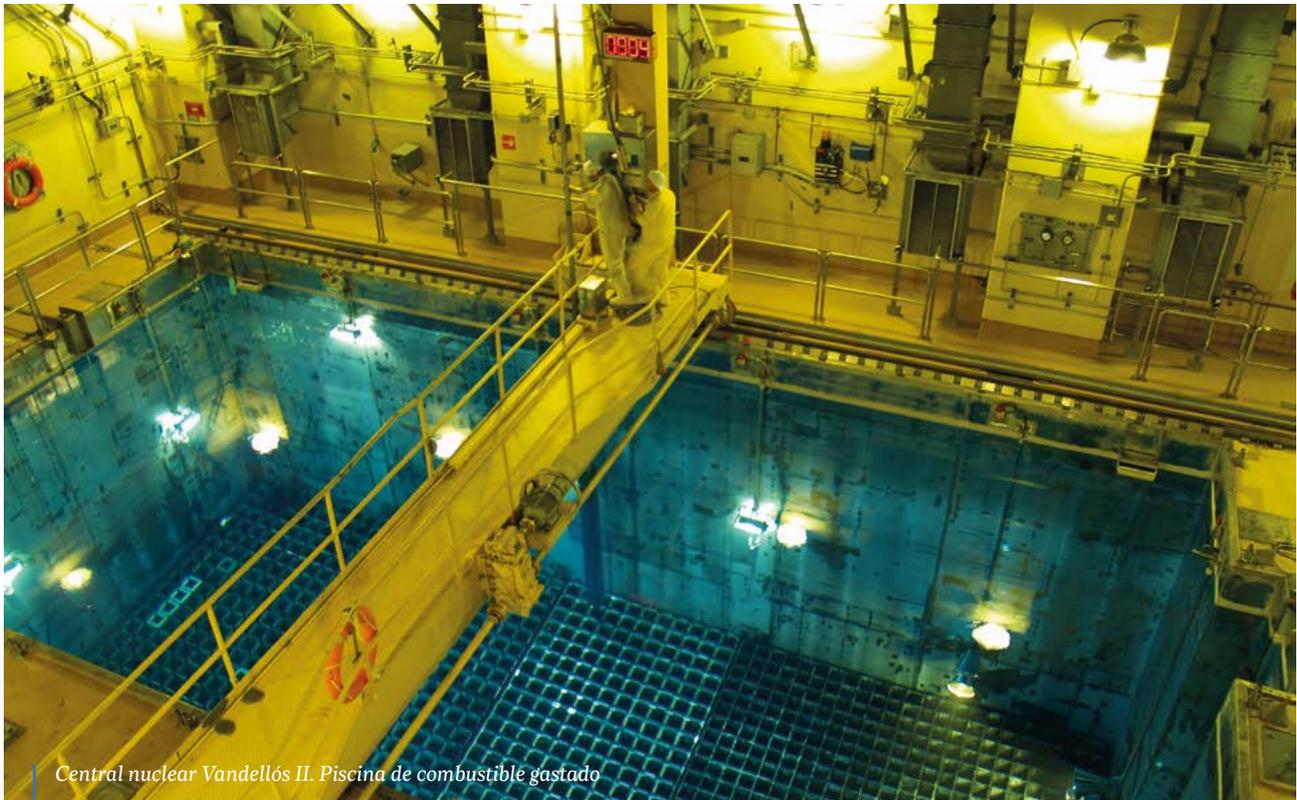
Por su parte, los ATF revolucionarios presentan un horizonte temporal más lejano y su grado de madurez es menor. Se basan en el uso de nuevos materiales tanto para el combustible como para las vainas. En concreto, para las pastillas, se investigan compuestos avanzados de uranio, como los siliciuros (en particular, U_3Si_2) y los nitruros de uranio (UN), que poseen una mayor densidad de uranio y mejor conductividad térmica que el UO_2 convencional.

En cuanto a las vainas, «las líneas de trabajo más prometedoras se centran en materiales cerámicos, especialmente el carburo de silicio (SiC), utilizado en configuraciones monocapa o en composites SiC/SiC. Su resistencia a la oxidación y su estabilidad estructural frente a temperaturas extremas los convierten en candidatos idóneos para entornos severos», indica Muñoz-Reja. En su opinión, su desarrollo se ve limitado por la complejidad técnica asociada a su

fabricación, la falta de experiencia previa en tecnologías comparables, la dificultad de obtener materiales de la calidad y en la cantidad necesaria para ensayos representativos y la amplia diversidad de conceptos actualmente en estudio. «Por el momento, ninguno de estos diseños ha operado en reactores comerciales. Solo se han irradiado materiales de forma aislada, en configuraciones experimentales muy alejadas de lo que podría considerarse una barra o elemento de demostración», explica.

Otra línea prometedoras dentro de los diseños revolucionarios es la de los combustibles integrales o compuestos, en los que el uranio se embebe directamente en una matriz de circonio, formando una estructura que posteriormente se encapsula en una vaina de aleación de circonio.

Además, «en los reactores refrigerados por gas o de alta temperatura se desarrollan conceptos de combustible diferentes a los de los reactores de agua ligera. Entre ellos destaca el combustible tipo TRISO (*Tri-structural isotropic particle fuel*), formado por diminutas partículas en las



Central nuclear Vandellós II. Piscina de combustible gastado

que el material físil queda confinado dentro de sucesivas capas cerámicas que actúan como contención de los productos de fisión y refuerzo estructural frente a procesos de irradiación y oxidación», matiza Muñoz-Reja.

El camino de la investigación

Comparados con los combustibles convencionales, los ATF presentan un rendimiento superior tanto a la hora de producir energía como de adaptarse a la demanda. «Pastillas más densas, con mayor conductividad térmica y con más capacidad de acomodar los esfuerzos mecánicos en seguimiento de carga permiten un uso más eficiente del combustible. A esto se suma una vaina capaz de resistir durante más tiempo las duras condiciones de temperatura, presión y fluencia neutrónica que se dan en el reactor, lo que garantiza un rendimiento óptimo», indica Muñoz-Reja.

Además, presentan la ventaja de que están diseñados para utilizarse en los reactores comerciales actuales, aunque todavía persisten limitaciones importantes derivadas, en gran medida, de su evolución y desarrollo más reciente.

La más relevante es la falta de experiencia operacional: «los ATF no cuentan con la extensa experiencia acumulada durante décadas por los combustibles convencionales», recuerda Muñoz-Reja. Para evaluar el comportamiento termo-mecánico de los ATF, «es necesario un enfoque complementario que combine estudios experimentales y analíticos, desarrollando herramientas fiables capaces de predecir su comportamiento tanto en operación normal como en condiciones de accidente», añade Aragón. «En el contexto de la investigación en ATF, es imperativo disponer de datos experimentales representativos, incluyendo mediciones de materiales irradiados bajo condiciones que se extiendan más allá de los criterios de seguridad actuales», puntualiza.

También la industria ha de adaptarse para afrontar su producción, ya que los procesos y los materiales son más avanzados que los utilizados en la actualidad para combustibles convencionales y requieren un alto grado de especialización.

Otro de los retos a los que se enfrentan los ATF es la gestión de re-

siduos. La presencia de elementos como el cromo requiere estudiar con precisión su comportamiento durante la etapa de enfriamiento, teniendo en cuenta los posibles cambios químicos y radiológicos. Además, como indica Muñoz-Reja, «su capacidad para permitir ciclos de irradiación más largos y alcanzar quemados de descarga más altos impacta directamente en la cantidad y composición isotópica del combustible gastado, afectando la radiotoxicidad. Francia, único país europeo con capacidad para el reprocesado y reutilización del combustible, ha identificado la presencia de cromo como un desafío que requiere una investigación exhaustiva para cuantificar exactamente cómo se comportan el cromo y sus compuestos durante el reprocesado».

En conjunto, para implantar los ATF en los reactores actuales es necesario acumular experiencia operacional, fomentar la investigación y el análisis de los resultados, y consolidar una base de datos que permita conocer su comportamiento a largo plazo. ■



**Radioisótopos
contra la
caza furtiva:
experimento sudafricano
con rinocerontes**



Sudáfrica concentra la mayor población de rinocerontes del mundo y es uno de los frentes más críticos de caza furtiva. En la última década se han perdido más de 10 000 ejemplares, a pesar de los esfuerzos de conservación. Frente a este escenario, el Proyecto Risótomo propone una estrategia inédita: insertar pequeñas cantidades de radioisótopos en los cuernos de los rinocerontes para hacerlos trazables mediante la infraestructura global de seguridad nuclear. Tras seis años de desarrollo y ensayos, la iniciativa entró en fase operativa en agosto de 2025, con el objetivo de desactivar el valor del cuerno en el mercado ilegal sin comprometer el bienestar ni la biología animal.

■ Texto: M^a José Prieto

Fotos: OIEA. Reserva de la Biosfera de Waterberg, Sudáfrica 2025

El Proyecto Risótomo, impulsado por la Universidad de Witwatersrand (Johannesburgo, Sudáfrica) en colaboración con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), ha alcanzado su fase operativa tras seis años de desarrollo, ensayos piloto, simulaciones digitales y análisis basados en dosimetría biológica. Su propuesta pasa por insertar radioisótopos de baja actividad en los cuernos de los rinocerontes para convertirlos en objetos fácilmente detectables por los sistemas de seguridad nuclear existentes en fronteras, puertos y aeropuertos de todo el mundo.

Este método, que combina biología, física nuclear y conservación, no daña al animal, sino que convierte su cuerno en un objeto rastreado y, por tanto, inútil para el comercio ilegal. El mecanismo disuasorio es directo: si los traficantes temen que los cuernos marquen las alarmas de radiación o, simplemente, si dudan de su inocuidad, el producto pierde valor. Si el riesgo percibido aumenta, el valor del producto disminuye y, con él, el incentivo económico para su comercio ilegal.

Lo que está en juego es crucial: Sudáfrica alberga la mayor población de rinocerontes del mundo, y aun así ha perdido más de 10 000 ejemplares en una década. En 2025, solo en el primer trimestre, el Ministerio de Silvicultura, Pesca y Medio Ambiente reportó 103 animales abatidos. En este contexto, proyectos como Risótomo no son una alternativa marginal, sino una respuesta urgente dentro del repertorio de medidas de conservación.

Ciencia detrás del cuerno

Para comprender por qué este método no implica daños para los rinocerontes, es necesario conocer la anatomía del cuerno. A diferencia de otras estructuras, el cuerno de rinoceronte se compone casi exclusivamente de queratina, la misma proteína presente en uñas y cabello humanos. No está irrigado por vasos sanguíneos ni conectado directamente a sistemas metabólicos internos.

Germán Orizaola, profesor titular de Zoología en la Universidad de Oviedo, resalta precisamente que «el cuerno no es una zona especialmente sensible ni debería alte-



Orfanato de Rinocerontes de Limpopo
(Reserva de Waterberg, Sudáfrica)



GERMÁN ORIZAOLA,
PROFESOR DE ZOOLOGÍA DE
LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO

En el relato ético, Orizaola pone el énfasis en la proporcionalidad: «El beneficio de este tipo de técnicas, que es claramente reducir el mercado ilegal de especies amenazadas, supera con creces a las molestias derivadas del estrés que pueda provocar en el animal la implantación».

rar ninguna otra parte del animal». La baja irradiación utilizada en este proyecto se distribuye únicamente dentro de una estructura inerte. «Para verificarlo, se realizaron análisis de sangre y heces después de las inserciones. Los resultados fueron concluyentes. El cuerno no es una zona irrigada, así que era esperable que no se encontrara movilización de material radiactivo en otras partes del animal», explica Orizaola.

Pedro Luis Lorenzo, catedrático de Fisiología Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), detalla que «aunque el cuerno del rinoceronte está formado principalmente por queratina compacta, sin irrigación en la parte distal, ni inervación funcional ni intercambios de sustancias que puedan considerarse metabólicamente activas, la base del cuerno sí que tiene un lecho vascularizado e inervado. Por eso, cualquier técnica que se utilice para perforar el cuerno

debe asegurar que no interfiere en la zona viva, ya que, de lo contrario, podría producir dolor, inflamación, sangrado y, por supuesto, la diseminación del material radiactivo por el resto del organismo del animal. Si la técnica está contrastada y comprobada, la inyección de este tipo de material en lugares distales del cuerno podría disminuir mucho o completamente la exposición sistémica, siempre que las inserciones sean poco profundas y el material inyectado esté sellado convenientemente para evitar fugas».

Desde una perspectiva radiológica, Almudena Real, investigadora de la Unidad de Protección Radiológica del Público y del Medio Ambiente del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), confirma la seguridad del procedimiento: «en las distintas fases del Proyecto Risótomo, se ha demostrado que no hay transferencia del compuesto incorporado en el cuerno al resto

Cálculos dosimétricos

La dosis absorbida en radioprotección, se expresa en grays (Gy). Un gray se define como la absorción de un julio de energía de radiación por kilogramo de materia (1 Gy = 1 J/kg), según el Sistema Internacional de Unidades y las recomendaciones de los organismos de referencia en dosimetría (BIPM, ICRU, OIEA). En humanos, las guías del Organismo Internacional de Energía Atómica indican que una irradiación aguda y homogénea de todo el cuerpo de alrededor de 3,5 Gy suele ser mortal para aproximadamente el 50 % de las personas en los sesenta días siguientes si no se dispone de tratamiento médico (LD50/60); revisiones clínicas sitúan ese intervalo típico en torno a 3-4 Gy. Es decir, una dosis única

cercana a 5 Gy al cuerpo entero se considera muy probablemente letal en pocas semanas incluso con cuidados intensivos. En el Proyecto Risótomo, los cálculos dosimétricos muestran que la dosis absorbida en la cabeza del rinoceronte por llevar radioisótopos en el cuerno es aproximadamente una décima parte de la «dosis de referencia» que la Comisión Internacional de Protección Radiológica propone para grandes mamíferos silvestres (0,1-1 mGy/d para el ciervo de referencia), lo que se traduce en tasas del orden de 0,01-0,1 mGy por día: varios centenares de veces por debajo de las dosis del orden de 1-4 Gy que se asocian a mortalidad significativa en mamíferos de gran tamaño. ■

Orizaola, para enfatizar que los métodos tradicionales de protección –el corte preventivo del cuerno– sí alteran la fisiología del animal y su comportamiento social.

Lorenzo matiza que «si la técnica se realiza una o pocas veces, con anestesia y sin complicaciones orgánicas, no es previsible que existan complicaciones a medio o largo plazo. Sin embargo, si la técnica no se realiza correctamente, cabe la posibilidad que estos defectos corneales (rotura, debilidad, dolor) puedan traducirse en una modificación del comportamiento del animal, influyendo en la capacidad de defensa, la consecución de alimento o causando problemas de jerarquización social».

Del laboratorio al campo

La innovación de Risótomo no reside únicamente en el marcado radiactivo, sino en aprovechar la tecnología ya existente. Existen miles de pórticos detectores de radiación instalados en fronteras, terminales de transporte y sistemas logísticos. Su función habitual es detectar materiales radiactivos no autorizados. Se trata ahora de aprovechar esa infraestructura como herramienta para frenar el tráfico de fauna.

Durante las pruebas, los investigadores utilizaron cuernos impresos en 3D con propiedades equivalentes

a la queratina que fueron introducidos en equipajes de mano, contenedores de 40 pies (12 m) y envíos de carga aérea. Todos activaron los sistemas de alarma, incluso con cantidades mucho menores a las que serán usadas en el proyecto final.

La apuesta no es solo tecnológica. Los responsables del proyecto entienden que la detección física se complementa con un factor psicológico: la aversión al riesgo. «Lo que sí veo efectivo es que la implantación de isótopos radiactivos genera dudas a la hora de manejar los cuernos en el mercado ilegal, no solo porque puede detectarse en aduanas y aeropuertos, sino porque la radiactividad en sí misma genera miedo. Me inclino a pensar que esta técnica tiene más un efecto disuasorio, detectable y preventivo», explica Orizaola.

Almudena Real coincide, aunque subraya la necesidad de integrar otras medidas sociales y legales: «creo que este proyecto pionero sí puede tener un efecto disuasorio, si bien ha de ir acompañado de otras medidas, como leyes que sancionen el tráfico de cuernos de rinocerontes».

Temor a los cambios evolutivos

Los métodos de conservación suelen despertar preguntas sobre sus posibles consecuencias evolutivas.



del animal y que la dosis de radiación en la cabeza del rinoceronte es muy baja. Los responsables del proyecto han afirmado que estas son aproximadamente una décima parte del valor de referencia recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) para la biota. En este sentido, es muy improbable que se puedan detectar alteraciones debidas a la radiación en los parámetros biológicos que son relevantes en animales (mortalidad, capacidad reproductora o morbilidad)».

Además, la técnica de inserción es mínimamente invasiva: se practica un pequeño orificio en el cuerno que se sella posteriormente con una masilla y no produce dolor, porque la queratina, como las uñas, no contiene terminaciones nerviosas. «En todo caso, es menos perjudicial que cortar el cuerno al rinoceronte, que sí es un elemento necesario de su fisiología e interviene en su selección sexual y de territorio», destaca



ALMUDENA REAL,
INVESTIGADORA DE LA
UNIDAD DE PROTECCIÓN
RADIOLÓGICA DEL CIEMAT

«El OIEA ha analizado las consideraciones éticas para la protección del medio ambiente frente a los efectos de la radiación ionizante, concluyendo que un marco ético único y universalmente prescrito no es factible. Sin embargo, se han identificado cinco principios generales (sostenibilidad, mantenimiento de la biodiversidad, conservación, justicia ambiental y dignidad humana) que se incorporan en instrumentos jurídicos internacionales y que, por lo tanto, están consensuados y proporcionan una base sólida y práctica para desarrollar un marco internacional de protección ambiental contra la radiación ionizante».



En este caso, sin embargo, los expertos coinciden en que el impacto sería mínimo o inexistente.

«Con la técnica de los isótopos no veo efectos negativos. Es más, lo que se viene haciendo hasta ahora con los rinocerontes es cortarles el cuerno para que no sean víctimas del mercado ilegal, y esta medida sí podría tener efectos a largo plazo porque el cuerno es una señal del estado fisiológico del animal e interviene en procesos de selección sexual. Por tanto, cortar el cuerno sí podría generar un problema evolutivo, aunque sea necesario en la actualidad para prevenir la caza furtiva», sostiene Orizaola.

La investigadora del CIEMAT insiste en que las dosis utilizadas son demasiado bajas para provocar mutaciones o daños hereditarios: «es muy improbable, por no decir imposible, que la dosis de radiación recibida por el rinoceronte, como consecuencia de portar isótopos radiactivos en su cuerno, produzca efectos en su reproducción o en su supervivencia. Se ha observado que las dosis de radiación en la cabeza del rinoceronte, al portar un isótopo radiactivo en su cuerno, son muy bajas y, por tanto, las dosis que pudieran recibir sus órganos reproductores serían mínimas. Para alterar la supervivencia hacen fal-

ta dosis medias-altas de radiación, habiéndose descrito un valor de LD_{50/30} (dosis letal para el 50 % de los individuos en 30 días) para mamíferos de gran tamaño de 1,6-2,5 Gy (irradiación de todo el cuerpo)».

El catedrático de la UCM argumenta que «deben considerarse dos factores: la alteración de las pautas en los fenómenos reproductivos y si estos efectos se van a aplicar al conjunto de la población de rinocerontes o solo a unos pocos individuos. Si todos o casi todos los animales van a recibir el tratamiento, los déficits reproductivos afectarán a toda la población por igual y se minimiza el efecto grupal del tratamiento. Sin embargo, si los tratamientos se aplicaran solo a individuos o grupos seleccionados, serían los no marcados los que seguirían sufriendo la presión de la caza furtiva, disminuiría su reproducción y se realizaría una especie de selección solo de los grupos o individuos marcados, sin afectar a toda la población por igual. En principio, para evitar todo este tipo de sesgos sería importante intentar la aplicación masiva de la técnica junto con estudios de genética de poblaciones que permitan predecir características de las generaciones futuras de manera anticipada».



El equipo científico del Proyecto Risótomo insertando los isótopos radiactivos en el cuerno del rinoceronte

Radioisótopos de baja actividad

En las primeras fases del proyecto se utilizaron compuestos marcados con isótopos estables (no radiactivos) para demostrar que el material no migra del cuerno al organismo del rinoceronte. Solo cuando esos ensayos y los modelos dosimétricos confirmaron la seguridad del procedimiento se pasó a insertar en el cuerno pequeñas cantidades de radioisótopos de baja actividad, del mismo tipo que los que se emplean habitualmente en medicina nuclear y en aplicaciones industriales: lo bastante intensos como para disparar los detectores de radiación ya instalados en puertos y aeropuertos, pero con una energía y una vida media que no representan riesgo para el animal ni para su entorno. ■



Real incorpora además la visión complementaria de la biología evolutiva: «en la evolución de las especies juegan un papel importante las mutaciones (alteraciones en el material genético). Muchos científicos apoyan la idea de que los cambios genéticos sean considerados una adaptación beneficiosa de los organismos al estrés o a la presencia de agentes contaminantes químicos y físicos. Es importante tener en cuenta que un cambio genético no siempre es negativo para el individuo que lo sufre».

Equilibrio ético

El uso de la tecnología nuclear en la fauna salvaje plantea dilemas filosóficos y éticos. ¿Debe intervenir el ser humano? Dada la situación crítica, ¿la intervención está justificada? Para Almudena Real, «los principios éticos están influenciados por factores específicos de cada país (culturales, religiosos, entre otros), por lo que es difícil contestar a esta pregunta desde el punto de vista ético. Sin embargo, uno de los tres principios básicos de la protección radiológica es la justificación. Cualquier decisión que altera la situación de exposición a radiación ionizante deberá ocasionar más beneficio que daño». Antes de ponerse en

marcha, el Proyecto Risótomo incluyó una fase piloto, durante dos años, que analizó las posibles consecuencias de la incorporación de isótopos radiactivos en los cuernos de los rinocerontes. «Se observó que el método no causa efectos nocivos en la salud de los animales, de acuerdo con estudios realizados en la Universidad de Gante (Bélgica). El beneficio de reducir o incluso acabar con la caza furtiva de rinocerontes, lo que está poniendo a esta especie en peligro, parece evidente», explica la investigadora del CIEMAT.

Pedro Luis Lorenzo aclara que «el equilibrio ético se articula alrededor de varios principios: proporcionalidad (el grado de invasividad debe ser proporcional a la gravedad de la amenaza), minimización del daño (reducir al máximo el sufrimiento individual), precaución (no aplicar masivamente técnicas con riesgos desconocidos) y justicia intergeneracional (proteger a la especie para el futuro). Si se demuestra que el marcaje isotópico reduce significativamente la probabilidad de caza furtiva, y se realiza bajo estrictos estándares de bienestar, podría argumentarse que la intervención es moralmente justificada. Aun así, es esencial que estas decisiones se tomen de forma transparente, con participación de



Momento en el que se realiza un agujero en el cuerno para introducir el isótopo. (Universidad de Wits)



expertos en ética, representantes locales y autoridades de conservación. El objetivo no es normalizar la manipulación invasiva como primera opción, sino considerarla una herramienta excepcional dentro de un paquete más amplio de medidas que incluyan prevención, educación y cambios legales».

Un esfuerzo internacional que redefine la conservación

Lo singular del Proyecto Risótopo no es solo la tecnología, sino su enfoque multidisciplinar. Colaboran instituciones de distintos continentes: las universidades de Wits y Gante, el OIEA, la Corporación de Energía Nuclear de Sudáfrica, la Reserva de la Biosfera de Waterberg y organizaciones de conservación como el Orfanato de Rinocerontes de Limpopo.

Orizaola destaca que esta coordinación es imprescindible. «Todas las técnicas que implican el manejo de especies animales tienen que

coordinar a varias disciplinas científicas. Están muy bien hechas, con modelización en el ordenador del cuerno con dosis y zonas; un primer estudio piloto de rinocerontes en cautividad que escala a la siguiente fase, con ejemplares ya dentro de la reserva natural, y cuando se comprueba que no genera problemas, se amplía a otra fase».

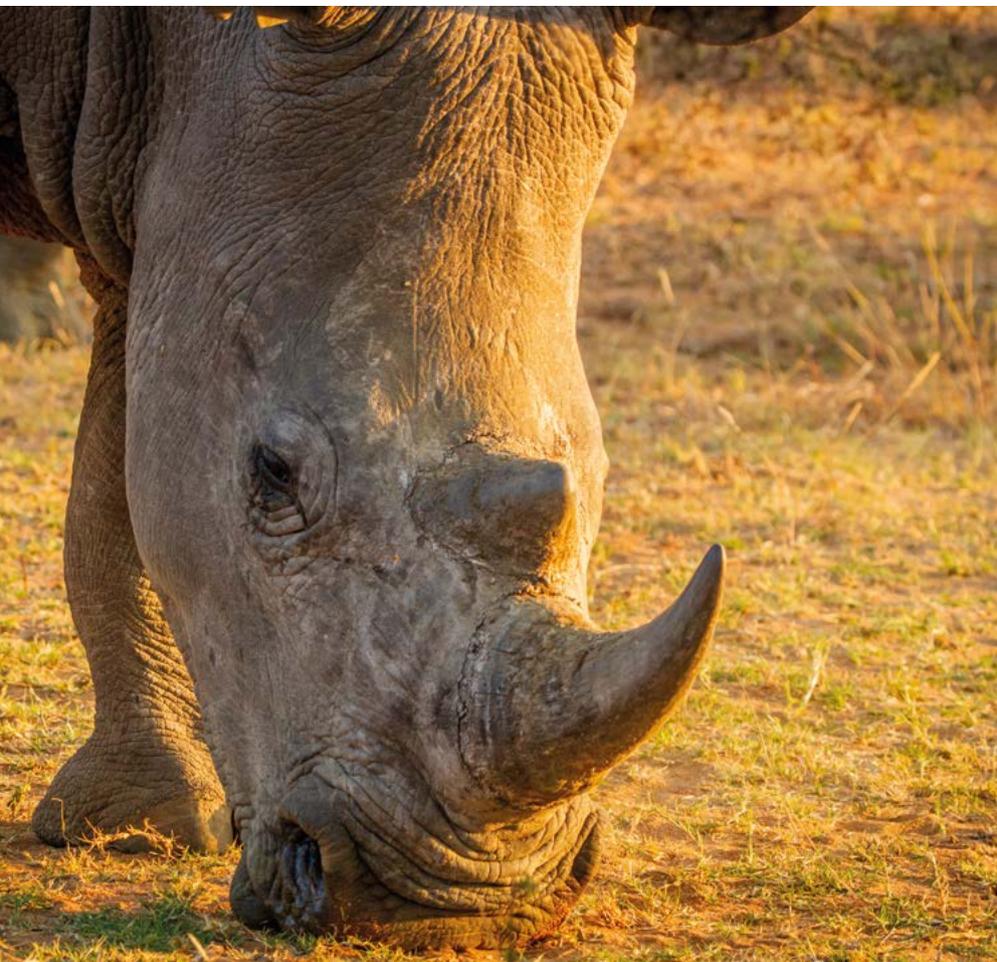
Para Almudena Real, «además de biólogos, veterinarios y físicos, sería importante que en el proyecto participaran expertos en ciencias sociales y humanidades, ya que contribuirían a mejorar la comunicación de los objetivos, resultados y conclusiones del proyecto a la sociedad y podrían aportar información muy valiosa sobre la percepción que las comunidades locales y otras partes interesadas tendrían sobre proyectos de este tipo».

Pedro Luis Lorenzo hace hincapié en el objetivo: «en teoría, si los cuernos marcados pueden identificarse con facilidad en los pun-

tos de tráfico y la probabilidad de condena aumenta, el coste percibido del delito también lo hará. Pese a ello, la historia del comercio ilegal de fauna muestra que las redes de tráfico se adaptan con rapidez: podrían intentar acceder a poblaciones no marcadas, falsificar documentación o mezclar cuernos marcados con no marcados. Un proyecto como Risótopo puede ser una pieza importante en el rompecabezas de la disuasión, pero no puede, por sí solo, revertir el tráfico si no se acompaña de cambios legales, culturales y económicos en los países de origen y de destino».

¿Un modelo para otras especies?

El proyecto abre la puerta a proteger a otras especies sometidas a la presión del tráfico ilegal. Los propios responsables del OIEA mencionan a elefantes y pangolines como candidatos potenciales.



Orizaola, sin embargo, se muestra prudente. «El rinoceronte vive en unas condiciones muy concretas, muy controlado en refugios y reservas, por eso no sé si podría ser aplicable a gran escala y en otras especies que se encuentran en otras condiciones». No obstante, reconoce que esta «técnica de conservación da un paso más avanzado a la hora de acabar con un delito. Ante mercados invasivos, como el de la medicina tradicional asiática, hay que tomar soluciones casi desesperadas».

Real coincide en que las enseñanzas de Risótopo serán esenciales para proyectos análogos. «La aproximación científica ha sido cuidadosamente diseñada, realizándose un gran número de estudios para demostrar la inocuidad de la técnica, antes de aplicarla en los rinocerontes. Si bien cada especie animal tiene sus peculiaridades (incluyendo diferencias en su radiosensibilidad), las leccio-

nes aprendidas en Risótopo serán de gran utilidad para futuros proyectos que pretendan utilizar una aproximación similar».

Mientras los rinocerontes marcados recorren Waterberg, monitorizados día y noche, el Proyecto Risótopo se prepara para ampliarse. La directora ejecutiva del proyecto, Jessica Babich, sintetiza su misión: «Nuestro objetivo es implementar la tecnología Risótopo a gran escala para ayudar a proteger una de las especies más emblemáticas y amenazadas de África. De esta manera, salvaguardamos no solo a los rinocerontes, sino también una parte vital de nuestro patrimonio natural».

Si la técnica logra reducir la caza furtiva, podría redefinir cómo entendemos la conservación en el siglo XXI. Convertir la radiación –tradicionalmente un símbolo de peligro– en una herramienta para proteger la vida salvaje es, en sí misma, una paradoja hermosa. ■



PEDRO LUIS LORENZO,
CATEDRÁTICO DE FISIOLÓGIA
VETERINARIA DE LA UCM

«El principio de no intervención en conservación parte de la idea de respetar al máximo los procesos naturales y evitar manipular a los animales más allá de lo estrictamente necesario. Sin embargo, en el caso de los rinocerontes, la principal amenaza no es natural, sino antropogénica: la caza furtiva impulsada por un mercado ilegal global. En este contexto, el dilema ético se reformula: no se trata de intervenir frente a un proceso natural, sino de decidir hasta qué punto estamos dispuestos a intervenir para contrarrestar daños causados por los humanos».

Nuevos desafíos de la seguridad nuclear

Protección y prevención en zonas de conflicto

Febrero de 2022. Por primera vez en la historia moderna, una central nuclear fue atacada y ocupada como objetivo por una fuerza militar extranjera. La central ucraniana Zaporiyia, la mayor de Europa, es ocupada militarmente y sufre numerosas pérdidas de suministro eléctrico, daños en infraestructuras esenciales y episodios de ataque. Nunca antes una instalación diseñada para operar bajo estrictos márgenes de seguridad civil había sido sometida a presiones bélicas de esta magnitud.

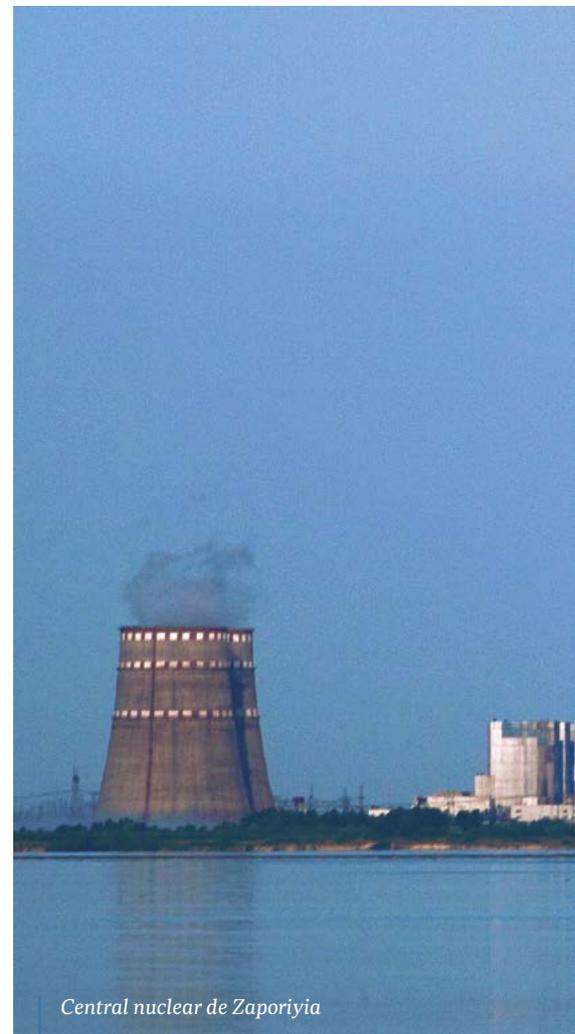
■ Texto: **Pablo Santamarta**

Hasta entonces, precedentes como el ataque israelí al reactor sirio de Osirak (1981), el iraquí sobre la central iraní en construcción en Bushehr (1987) o los incidentes en la de Krško durante la guerra de Eslovenia (1991), habían sido operaciones bélicas puntuales y de corta duración. La situación en Zaporiyia, en cambio, ilustró cómo una infraestructura nuclear civil pasó a convertirse en desafortunada pieza de un tablero de juego militar. Tras el comienzo del conflicto en Ucrania en febrero de 2022, dos instalaciones nucleares quedaron bajo control de las fuerzas armadas rusas: el emplazamiento de la accidentada central nuclear Chernóbil (temporalmente) y, desde el 4 de marzo de 2022, la central nuclear de Zaporiyia (ZNPP). Por primera vez, una central con seis reactores comerciales se encuentra sin capacidad plena

de cumplir con los compromisos de seguridad nuclear que emanan de la Convención sobre seguridad nuclear y de la Convención Conjunta de seguridad del combustible gastado y de la seguridad de la gestión de los residuos radiactivos. Aunque la situación dista de ser ideal, la central nuclear sigue cumpliendo la normativa emitida por un regulador nuclear y, además, su funcionamiento es monitorizado por una misión de un organismo internacional como el OIEA.

Alejandro Zurita, exjefe de Seguridad Nuclear de la Comunidad Europea de la Energía Atómica (Euratom), alerta sobre la precaria situación en la que se encuentra la central. Desde su ocupación, y aunque los componentes esenciales de la central no han sufrido ataques directos significativos, sus sistemas de suministro o sistemas auxiliares han sido escenario

de explosiones, fuego de artillería y ataques con drones, lo que ha provocado numerosas pérdidas completas del suministro eléctrico exterior –momentos en los que pasó a depender exclusivamente de sus generadores de emergencia–. Además, tras la destrucción de la presa de Kajovka, en junio de 2023, sustenta la refrigeración de combustibles de forma precaria por medio de once pozos perforados en su emplazamiento. El cambio de control sobre la central ha alterado profundamente las condiciones del personal y de funcionamiento y regulación. Muchos supervisores de turno y mandos con licencia ucraniana abandonaron el emplazamiento y otros, para poder continuar, debieron firmar contratos con la estatal rusa Rosatom y, posteriormente, adquirir la nacionalidad rusa. La supervisión reguladora pasó a



Central nuclear de Zaporiyia



Los hechos de los últimos años en el actual contexto internacional de crisis están normalizando peligrosamente la implicación de instalaciones nucleares civiles en conflictos armados



dependen del organismo ruso Rostekhnadzor (Servicio Federal de Supervisión Ambiental, Tecnológica y Nuclear), que ha ido licenciando operadores, mientras se reducía la plantilla global de la central. La empresa estatal Rosatom tuvo que formar nuevo personal, al tiempo que se sustituían proveedores ucranianos por suministradores rusos para mantener, siquiera parcialmente, los programas de mantenimiento.

Aunque todos los reactores de Zaporíyia, salvo uno (que se mantiene en parada caliente para proporcionar vapor para el calentamiento de sistemas y el suministro de calefacción), permanecen en estado de parada fría desde septiembre de 2022, el riesgo de accidente, según Zurita, no ha desaparecido. «El combustible irradiado sigue generando calor residual y necesita sistemas de refrigeración y alimentación eléctrica fiables», afirma. Convencido de que un accidente de reactividad tipo Chernóbil es físicamente imposible en el estado actual de la central, considera que una pérdida prolongada de refrigeración podría llevar a la fusión de combustibles con liberación de productos radioactivos y, en el peor de los casos, un posible impacto transfronterizo. Se trataría, cualitativamente, de un escenario



Alejandro Zurita es ingeniero nuclear y doctor en Seguridad Nuclear (TU Hannover). Fue inspector del CSN para el licenciamiento de Trillo y jefe de sección en Siemens-Kraftwerk Union. En Euratom, ejerció como jefe de Seguridad Nuclear del reactor HFR y jefe de cooperación internacional en investigación nuclear (fisión y fusión) entre 2008-2016. Durante su etapa se logró la primera asociación de Ucrania al programa de investigación nuclear de Euratom y se desarrollaron sendos programas de investigación nuclear con STCU de Kiev e ISTC de Moscú. Además, formó parte de misiones técnicas UE-Irán sobre investigación nuclear. En 2016-2020, sirvió en Brasilia como ministro consejero del Servicio Exterior de la UE en ciencia, tecnología e innovación para Brasil y países CELAC.

LOS SIETE PILARES INDISPENSABLES

PARA GARANTIZAR LA SEGURIDAD NUCLEAR TECNOLÓGICA Y FÍSICA DURANTE UN CONFLICTO ARMADO



1 INTEGRIDAD FÍSICA

Se debe mantener la integridad física de las instalaciones, ya sean los reactores, las piscinas de combustible o los almacenes de desechos radiactivos.



2 SISTEMAS Y EQUIPOS DE SEGURIDAD TECNOLÓGICA Y FÍSICA

Todos los sistemas y equipos de seguridad tecnológica y física deben permanecer en pleno funcionamiento en todo momento.



3 PERSONAL DE OPERACIÓN

El personal de operación tiene que poder desempeñar sus funciones en materia de seguridad tecnológica y física y tener la capacidad de tomar decisiones sin presiones indebidas.



4 SUMINISTRO ELÉCTRICO DESDE EL EXTERIOR DEL EMPLAZAMIENTO

Se debe garantizar el suministro eléctrico externo a partir de la red para todos los emplazamientos nucleares.



5 CADENA DE SUMINISTRO LOGÍSTICO

Debe haber cadenas y transporte ininterrumpidos de suministro logístico hacia y desde los emplazamientos.



6 MONITORIZACIÓN RADIOLÓGICA Y PREPARACIÓN Y RESPUESTA PARA CASOS DE EMERGENCIA

Deben existir sistemas eficaces de monitorización radiológica dentro y fuera del emplazamiento, así como medidas de preparación y respuesta para casos de emergencia.



7 COMUNICACIÓN

Debe haber una comunicación fiable con el regulador y otras entidades.

comparable al de Fukushima, aunque atenuado por la menor potencia residual térmica acumulada tras más de tres años con los reactores parados.

En este sentido, Zurita argumenta que «los hechos de los últimos años en el actual contexto internacional de crisis están normalizando peligrosamente la implicación de instalaciones nucleares civiles en conflictos armados. Esto indica que no estarían exentas del riesgo de sufrir ataques en escenarios bélicos. En el marco de un conflicto híbrido global entre bloques, se podrían aplicar planes hostiles contra instalaciones nucleares».

Siete pilares y cinco principios

Ante un contexto sin precedentes, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) reaccionó, el mismo mes de marzo de 2022, definiendo un marco de referencia claro: siete pilares imprescindibles para garantizar la seguridad nuclear tecnológica y física durante situaciones de guerra, además del establecimiento

urgente de una zona de protección desmilitarizada alrededor de ZNPP. Estos pilares permiten evaluar con eficiencia los aspectos más importantes que deben mantenerse para el funcionamiento seguro de las instalaciones nucleares ucranianas.

En relación con los indicadores que permiten detectar una pérdida de márgenes de seguridad —ya sea en recursos humanos, repuestos, comunicación o suministro eléctrico—, Pedro Lardiez, jefe de área de Seguridad Física en el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y presidente del Comité de Orientación sobre Seguridad Física Nuclear, señala que «cualquier pérdida o deterioro de uno de los siete pilares imprescindibles supone una indicación de pérdida proporcional del correspondiente margen de seguridad».

En septiembre de 2022, tras la primera misión del OIEA en ZNPP para observar las condiciones bajo las que operaba, la agencia concluyó que parte de los siete pilares podrían verse comprometidos y estableció una rotación permanente de inspectores.



El equipo del OIEA observa los daños causados por los bombardeos en el techo del edificio especial de la central nuclear de ZNPP que alberga, entre otros elementos, el combustible nuclear

LOS CINCO PRINCIPIOS CONCRETOS PARA PROTEGER LA CENTRAL NUCLEAR DE ZAPORIYIA

1

No debería producirse ningún tipo de ataque desde o contra la central, en particular contra los reactores, el almacenamiento de combustible gastado, otras infraestructuras críticas o el personal.

2

No debería utilizarse la central nuclear de Zaporíyia como almacén ni como base para armas pesadas (es decir, lanzacohetes múltiples, sistemas de artillería y municiones, y tanques) o personal militar que puedan ser utilizados para un ataque desde la central.

3

No debería ponerse en peligro el suministro eléctrico externo de la central. Para ello, debería hacerse todo lo posible por garantizar en todo momento la disponibilidad y la seguridad del suministro eléctrico externo.

4

Deberían protegerse de ataques o actos de sabotaje todas las estructuras, los sistemas y los componentes esenciales para el funcionamiento tecnológica y físicamente seguro de la central nuclear de Zaporíyia.

5

No debería adoptarse ninguna medida en detrimento de estos principios.

Posteriormente, tras constatar la presencia de zonas de combate activas y el fracaso en la creación de una zona de protección, el director general del OIEA, Rafael Mariano Grossi, inició conversaciones diplomáticas con funcionarios de alto nivel de distintos países, para culminar con la formulación de cinco

principios básicos de protección, presentados en mayo de 2023 ante el Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas.

Desde su aprobación, los equipos del OIEA desplegados en Zaporíyia supervisan de forma continua que los cinco principios se respeten en todas las instalaciones

para proteger al personal y asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y sistemas. Como señala Lardiez, «todas las líneas de decisión tanto en el entorno civil como en el de defensa deben ir orientadas a la consecución de estos principios». En definitiva, los pilares y principios elaborados para el caso de Ucrania sirven ahora como referencia mundial.

La presencia constante de inspectores del OIEA, además de aportar supervisión técnica en la central con pérdida de márgenes de seguridad, cumple una función de estabilización política: ayuda a clarificar la situación real de la central en un momento de acusaciones cruzadas y narrativas no verificadas. No obstante, la intervención de los inspectores sigue siendo parcial. Por ejemplo, no tienen acceso a determinadas zonas de las salas de turbinas, lo que limita su capacidad para confirmar plenamente la observancia de los cinco principios, en particular el que prohíbe utilizar la central como asentamiento para armamento pesado o personal militar. Además de esta restricción, como apunta Lardiez, «existen dudas, dado que no se ha podido verificar totalmente, de que el principio básico número dos se haya mantenido durante todo este tiempo».

Amenazas emergentes

Para Lardiez, «en el contexto de la seguridad física, todas las amenazas evolucionan constantemente, es algo intrínseco a la amenaza en sí misma». Si bien es cierto que en los últimos años ha aumentado la preocupación sobre las denominadas «amenazas emergentes», como vehículos aéreos no tripulados (UAV, según su sigla en inglés), ciberseguridad de instalaciones o el impacto del uso de inteligencia artificial, «el diseño de un sistema de seguridad física nuclear debe estar basado en todas aquellas amenazas que estén reflejadas en una amenaza base de diseño (ABD o DBT en inglés) constantemente actualizada». En el caso concreto de Zaporíyia, los ataques de UAV registrados desde



El reactor 2 durante una inspección del OIEA en septiembre 2022



Una vista con la nueva estructura de confinamiento seguro que cubre la central nuclear de Chernobyl

2023 y, en particular, los episodios de abril 2024 (OIEA, 2024), no dañaron directamente ninguno de los sistemas de seguridad de la central ZNPP, pero sí constituyeron, según Zurita, «una primera violación clara de los principios básicos» establecidos por el director general del OIEA ante el Consejo de Seguridad de la ONU, al suponer un ataque deliberado al emplazamiento de la central aun cuando parte de los reactores permanecen temporalmente en parada fría. El problema, como advierte Zurita, no se limita al daño material: cada nuevo ataque aumenta la probabilidad de error humano, saturación del perso-

nal y, por lo tanto, se trata de una degradación acumulativa de los márgenes de seguridad.

En paralelo, la ciberseguridad se ha convertido en un eje central de la seguridad física. Pedro Lardiez explica cómo, en el modelo español, la ciberseguridad está plenamente integrada en los planes específicos de protección física de las instalaciones, y su evaluación se realiza de forma coordinada entre el Ministerio de Interior, el Centro Nacional para la Protección de Infraestructuras Críticas y el Consejo de Seguridad Nuclear: «en la actualidad, el CSN está trabajando en la elaboración de un nuevo proyecto de Instruc-

ción del que establecerá los criterios técnicos a los que han de responder los sistemas y programas de seguridad informática de este tipo de instalaciones».

En este sentido, la posición del OIEA adquiere una doble dimensión. Por un lado, ha reforzado su papel como monitor técnico en emplazamientos de alto riesgo: en Zaporíyia, la presencia continua de equipos del OIEA, en permanente rotación sobre el terreno desde septiembre de 2022, permite verificar –aunque parcialmente, debido a las restricciones impuestas– el cumplimiento de los siete pilares y los cinco principios básicos, así como informar al



El diseño de un sistema de seguridad física nuclear debe estar basado en todas aquellas amenazas que estén reflejadas en una amenaza base de diseño (ABD o DBT en inglés) constantemente actualizada



Una ABD, o amenaza base de diseño, describe el conjunto de atributos y características de posibles agentes internos o adversarios externos que pudieran intentar una retirada no autorizada o un acto de sabotaje, utilizado como referencia (base) a la hora de diseñar y evaluar un sistema de protección física (OIEA, 2022).

Consejo de Seguridad de la ONU sobre cualquier degradación significativa. Por otro lado, el organismo ha impulsado una revisión de su marco de orientaciones de seguridad física —motivada por la necesidad de actualizar dichas normas y aumentar su consistencia, coherencia y facilidad de manejo sin que, dentro de dichas normas, se esté considerando la publicación inmediata ni a medio plazo de alguna publicación específica relativa a la preservación de la seguridad física nuclear durante un conflicto armado— con la participación activa de todos los Comités de Normas del OIEA: el Comité de Estándares de Seguridad

Nuclear (NUSSC), el Comité de Normas de Seguridad Radiológica (RASSC), el Comité de Normas de Seguridad para la Gestión de Residuos (WASSC), el Comité de Normas de Seguridad del Transporte (TRANSCC), el Comité de Normas de Preparación y Respuesta ante Emergencias (EPREsC) y el Comité de Orientaciones de Seguridad Física Nuclear (NSGC).

Espacios de colaboración internacional

A pesar de los conflictos y rivalidades que hoy pueda atravesar el panorama internacional, la energía nuclear civil ha generado, a lo largo de décadas, espacios estables

de colaboración entre países con intereses, sistemas políticos e incluso alianzas militares dispares. Estos marcos cooperativos no solo han permitido avances científicos y tecnológicos, sino que han funcionado también como instrumentos de confianza mutua que ayudan a mitigar riesgos de proliferación y reducir tensiones en contextos sensibles.

Un ejemplo de colaboración internacional es ITER, el gran proyecto de fusión nuclear. Integrado por la Unión Europea, Estados Unidos, Rusia, China, Japón, India y Corea del Sur. ITER nació en 1985, en plena Guerra Fría, como una propuesta política impulsada por Ronald Reagan y Mijaíl Gorbachov. Desde entonces, el proyecto ha sobrevivido a cambios de régimen, sanciones económicas y crisis diplomáticas, manteniendo una cooperación técnica diaria entre



Pedro Lardiez es jefe del Área de Seguridad Física del CSN y presidente del Comité de Orientaciones de Seguridad Física Nuclear (NSGC) del OIEA. En sus casi cuarenta años de carrera en el CSN, ha desempeñado diferentes puestos de responsabilidad, destacando como jefe de la Unidad de Emergencias, jefe de área de Gestión de Emergencias y Redes, y jefe de área de Seguridad Física. Ha sido representante de España en varias convenciones internacionales del OIEA, así como miembro del grupo asesor AdSec. Participó como experto o líder en diversas misiones IPPAS (Servicio Internacional de Asesoramiento sobre Protección Física) en varios países y ha sido instructor en múltiples cursos sobre seguridad física nuclear.

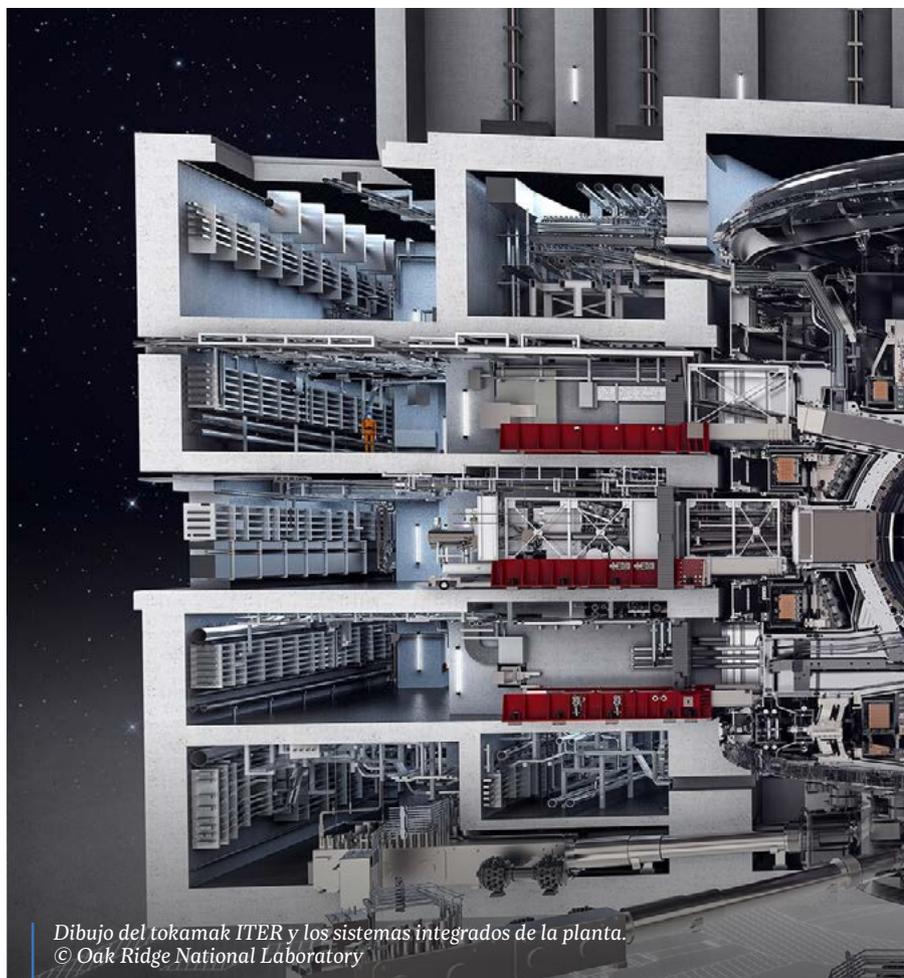
La seguridad física nuclear en España

España ofrece un ejemplo de cómo se construye, de forma progresiva, un sistema de seguridad física nuclear robusto, apoyado en normativa internacional, verificado por los organismos y adaptado a la realidad global.

La seguridad nuclear en España ha experimentado una transformación profunda en las últimas décadas. El punto de inflexión se sitúa en 2004, año en el que el CSN crea una unidad específicamente dedicada a la materia. Desde entonces, según Pedro Lardiez, jefe del Área de Seguridad Física del CSN, se han producido «avances tremendamente significativos, pasando de un embrión preocupado por la evolución, inicialmente no prevista, de la amenaza –tras los atentados del 11S y 11M– hasta llegar a un sistema totalmente desarrollado y maduro» que abarca protección física, seguridad de la información, amenazas internas y control y contabilidad de materiales nucleares.

Uno de los pilares reguladores de este modelo fue la aprobación del Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares, y de las fuentes radiactivas. Este marco normativo permite que España cumpla con la Enmienda de 2005 a la Convención de Protección Física y articula la determinación de la ABD, elaborada por Interior con la colaboración del CSN. En cuanto a la coordinación institucional, asegura que el régimen nacional define con precisión las funciones de cada autoridad implicada y se apoya en «varios grupos de trabajo permanentes o semipermanentes» para gestionar la definición de amenaza, normativa, respuesta interna y relaciones internacionales.

Para comprobar la eficacia de los sistemas planificados de respuesta se realizan ejercicios anuales de simulacros de emergencia. El último ejercicio realizado, de carácter internacional, ha demostrado las «altas capacidades de los cuerpos de seguridad españoles para responder a sucesos de tráfico ilícito de material radiactivo» y generó lecciones prácticas de gran valor.



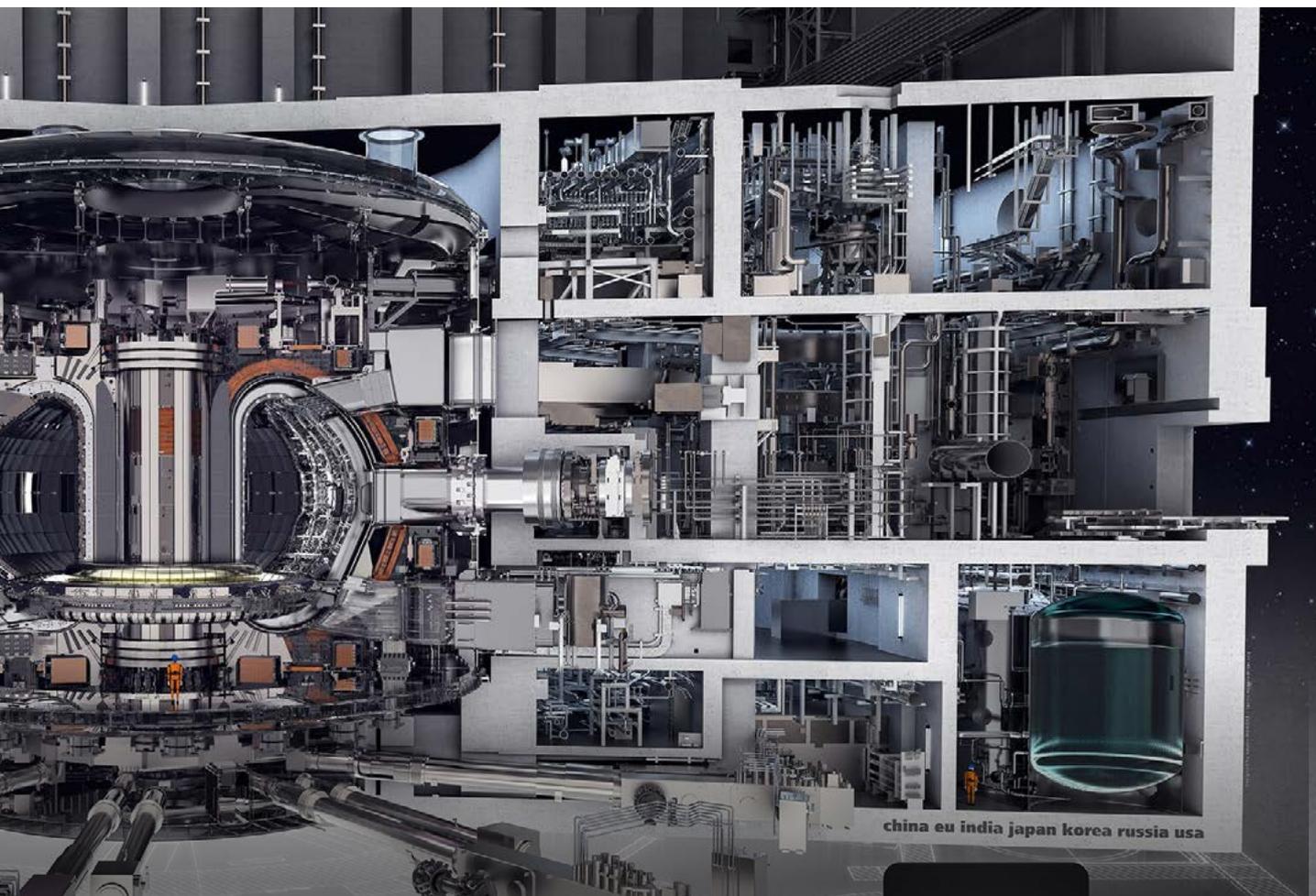
países que, en otros ámbitos, compiten abiertamente.

En América Latina, el caso de la ABACC (Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares) constituye un ejemplo singular. Argentina y Brasil, antiguos rivales regionales con ambiciones nucleares propias, crearon en 1991 un sistema binacional de salvaguardias único en el mundo. A través de inspecciones conjuntas y verificación mutua, ambos países lograron transformar la desconfianza estratégica en cooperación institucionalizada, reduciendo de forma efectiva el riesgo de proliferación y reforzando la estabilidad regional.

En Europa, Euratom ha desempeñado un papel fundamental como marco supranacional de cooperación nuclear. Desde hace décadas, los Estados

miembros comparten normas de seguridad nuclear, investigación conjunta, formación técnica y un sistema común de salvaguardias civiles. Euratom ha permitido armonizar criterios reguladores entre países con parques nucleares muy diferentes y ha facilitado la circulación de conocimiento y buenas prácticas en salvaguardias, seguridad radiológica y cooperación técnica.

A escala global, el Proyecto Internacional sobre Reactores Nucleares Innovadores y Ciclos del Combustible (INPRO, por sus siglas en inglés) del OIEA reúne a países con visiones divergentes sobre el futuro de la energía nuclear –incluidos Estados Unidos, Rusia, China y varios Estados europeos– para trabajar conjuntamente en reactores avanzados, ciclos de combustible



sostenibles y gestión de residuos. Aunque sus resultados son principalmente analíticos y conceptuales, INPRO actúa como foro técnico donde se discuten soluciones comunes a desafíos compartidos, al margen de disputas geopolíticas. Otro instrumento de cooperación son las misiones Servicio Internacional de Asesoramiento sobre Protección Física (IPPAS, en inglés) del OIEA, en las que expertos internacionales evalúan los sistemas de protección física de un país anfitrión. En estas misiones participan especialistas de Estados aliados, neutrales o incluso con relaciones tensas, que colaboran bajo un marco técnico común. España, por ejemplo, ha participado tanto como país anfitrión como enviando expertos a otros Estados, reforzando la confianza y la transparencia internacional en materia de seguridad física nuclear.

Finalmente, la cooperación internacional en la gestión de residuos nucleares, como los proyectos conjuntos sobre repositorios geológicos profundos en países europeos, muestra que incluso los aspectos más sensibles del ciclo nuclear pueden abordarse mediante intercambio de conocimiento, experiencias reguladoras y desarrollo tecnológico compartido.

En conjunto, estos ejemplos muestran que, frente a tensiones o escenarios de conflicto, existen espacios consolidados donde la energía nuclear civil ha funcionado como puente y no como frontera. La lección es clara: cuando se dota a la cooperación nuclear de reglas claras y marcos institucionales sólidos, la ciencia y la tecnología pueden convertirse en herramientas eficaces para reducir riesgos, generar confianza y mantener abiertas vías de diálogo incluso en los contextos internacionales más complejos. ■

Bibliografía

- OIEA. (2022). *Glosario de seguridad nuclear tecnológica y física del OIEA*. [iaea.org](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/23-01464S_SSGlossaryI_web.pdf). Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/23-01464S_SSGlossaryI_web.pdf
- OIEA. (2024). *Update 221 - IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine*. [iaea.org](https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-221-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine). Disponible en: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-221-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>
- Zurita, A. (2023). Nuclear facilities as military targets - The Zaporizhzhia case. *Reflection Paper*, agosto 2023, FOGGS. Disponible en: <https://www.foggs.org/wp-content/uploads/2023/08/FOGGS-Paper-20231-Reflection-Paper.pdf>
- Zurita, A. (2024a). Global challenges emerged from Zaporizhzhia NPP in the war context. *Nuclear España*, 464, mayo 2024. Disponible en: <https://www.revistanuclear.es/wp-content/uploads/2024/05/SAFETY-1.pdf>
- Zurita, A. (2024b). The missed opportunity of the multi-state nuclear deal with Iran. *Nuclear España*, 464, Enero 2025. Disponible en: <https://www.revistanuclear.es/wp-content/uploads/2024/12/Acuerdo-nuclear-Iran.pdf> ■

Isabel Fariñas Gómez

Catedrática de Biología Celular de la Universidad de Valencia

«Somos lo que es nuestro cerebro, en él reside nuestra identidad»

Reconocida con el Premio Nacional de Investigación Santiago Ramón y Cajal 2024, Isabel Fariñas reflexiona sobre el cerebro con la paciencia de quien ha dedicado años a estudiar su complejidad. Tras una dilatada trayectoria científica, analiza los avances en el estudio de las células madre neurales, la influencia de la actividad intelectual en la salud cerebral y la necesidad de sostener la investigación a largo plazo.

■ Texto: **Luis Tejedor**

¿Qué ha supuesto para usted recibir el Premio Nacional de Investigación?

Ha sido algo abrumador, porque es el máximo galardón que puede recibir un investigador en nuestro país. En España hay ciencia muy buena y muchos colegas que lo merecen tanto como yo.

Lleva décadas investigando las células madre neurales. ¿Empezamos a entenderlas?

El estudio de las células madre adultas comenzó tras los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki, cuando se observó que el organismo debía producir miles de millones de células sanguíneas nuevas cada día, a partir de pequeñas poblaciones en la médula ósea. Hoy sabemos que existen células madre en todos los tejidos, encargadas de reemplazar las que mueren por desgaste.

Desde los años noventa, conocemos que hay células madre, llamadas neurales, en los cerebros adultos. Hasta entonces se creía que nacíamos con un número fijo

de neuronas para toda la vida. Ahora sabemos que se generan nuevas neuronas, aunque todavía se debate durante cuántas décadas se mantiene esa capacidad. Estas células madre neurales no solo producen nuevas neuronas, sino que se integran eficazmente en los circuitos existentes, lo que abre la posibilidad de que, en un contexto neurodegenerativo, las neuronas trasplantadas puedan incorporarse al tejido cerebral. Todo ello convierte a las células madre en un material muy prometedor para la reparación del cerebro y el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas.

¿Qué significado real tiene la neurogénesis adulta para la memoria, el aprendizaje e incluso la formación del carácter?

El carácter es una cuestión extremadamente compleja, influida tanto por la biología como por la experiencia. En humanos aún no podemos evaluar con precisión qué hacen las nuevas neuronas, pero en modelos animales se han

observado funciones concretas. En los ratones, por ejemplo, las células madre neurales se localizan en dos zonas del cerebro. Una produce nuevas neuronas para los circuitos olfativos –esenciales para su comportamiento y percepción del entorno– y la otra genera neuronas en el hipocampo, relacionadas con la memoria espacial y a corto plazo. En humanos, esa función podría equivaler a las memorias recientes, como recordar dónde dejamos el coche hoy.

Usted apuesta por reprogramar astrocitos para convertirlos en neuronas. ¿Cómo imagina su evolución futura?

Es una línea muy prometedora. En las últimas décadas, la biología celular ha avanzado de forma espectacular gracias al concepto de reprogramación. Tradicionalmente, creíamos que las células diferenciadas –como las neuronas– habían alcanzado un punto irreversible de especialización. Pero los experimentos de Shinya Yamanaka, en 2006, demostraron



que bastaban cuatro genes para devolver una célula a un estado similar al del embrión temprano, con capacidad para generar cualquier tipo celular. Ese hallazgo, premiado con el Nobel, cambió la biología moderna. Desde entonces, se ha visto que podemos transformar una célula diferenciada, como un adipocito, en otra completamente distinta, como una neurona. Sabemos que podemos introducir genes específicos en astrocitos –células gliales del sistema nervioso central– y convertirlos en neuronas, y esto tiene un gran potencial: en muchas enfermedades neurodegenerativas, los astrocitos sobreviven mientras las neuronas mueren; si logramos reprogramarlos en las zonas afectadas, podríamos generar nuevas neuronas funcionales. Esta metodología ya funciona en modelos animales, aunque falta un largo camino para aplicarla en humanos. No se plantea aún como terapia clínica, pero en investigación básica está abriendo puertas muy importantes.

¿Estamos más cerca del sueño de regenerar el cerebro o hay que limitar las expectativas?

Hay que ser prudentes. El cerebro es el órgano más complejo del cuerpo humano y aún no comprendemos del todo su funcionamiento normal. En los años ochenta se realizaron trasplantes de neuronas fetales en pacientes con párkinson y, aunque demostraron que era posible, el método resultó inviable: cada paciente requería varios fetos y, poco después, apareció la levodopa, una medicación que paliaba los síntomas.

El verdadero salto llegó con el cultivo de células madre embrionarias capaces de generar cualquier tipo celular. Al principio, las agencias reguladoras temían su uso por el riesgo de tumores, pero, tras décadas de trabajo, la FDA ha aprobado ya una docena de investigaciones con trasplantes neuronales para el párkinson. La terapia celular en el cerebro no está tan lejos: ya se está probando en humanos dentro de ensayos clínicos.

Lo ideal sería prevenir las enfermedades neurodegenerativas a

través del diagnóstico precoz. Para ello, la investigación avanza en tres frentes: la búsqueda de biomarcadores en sangre que detecten la enfermedad de forma temprana, la mejora de las técnicas de imagen para identificar cambios sutiles en el cerebro y el estudio de síntomas iniciales, como trastornos del sueño o leves deterioros cognitivos, que alerten antes de su aparición. Aún estamos lejos de soluciones definitivas, pero son vías que marcarán el futuro de la prevención y el diagnóstico precoz de las enfermedades neurodegenerativas.

¿Podemos entrenar la plasticidad o está sujeta a límites estrictos?

Durante muchos años, los investigadores en neurobiología consideraban que la plasticidad neural alcanzaba su máximo justo después del nacimiento y durante las dos primeras décadas de vida. Socialmente, esa idea se asumió como cierta. Sin embargo, hoy conocemos que la plasticidad neural dura toda la vida. Estamos continuamente remodelando nuestros circuitos cerebrales. Cuanto más

constante sea nuestra actividad intelectual, mejor. Así, el cerebro se ejercita y mantiene su capacidad de respuesta plástica a lo largo de toda la vida. Es importante que las personas presten atención a aquello que les interesa, motiva y mantiene mentalmente activas. Aunque se pueda desarrollar una enfermedad neurodegenerativa, los datos epidemiológicos de salud pública indican que el alzhéimer tiene menor incidencia en colectivos con elevada actividad intelectual. No es una relación causa-efecto, pero existen correlaciones que apuntan a que ejercitar el cerebro es beneficioso.

Considera que «cuidar de los nietos o bailar en pareja» son recomendables para proteger el cerebro. ¿Tan poderosa es la motivación emocional para mantener viva la mente?

Prestamos atención cuando algo nos motiva. La primera condición para memorizar algo es precisamente la atención. Por eso recordamos las cosas a las que prestamos atención y no otras: es la ventana de entrada al sistema cerebral. Una de las claves que favorece el ejercicio mental es la sociabilidad. El hecho de tener interlocutores, interactuar con otras personas, estimula el cerebro en sociedad. Por eso hablaba de bailar o cuidar a los nietos. Estos ejemplos son una fuente enorme de motivación: hacen que las personas mayores recuerden fechas, horarios o rutinas relacionadas con su cuidado. Hay una motivación para aprender y recordar, y eso ejercita el cerebro. Si, además, se realiza en un entorno socialmente atractivo, el efecto positivo es aún mayor.

En el envejecimiento cerebral todo está conectado: el metabolismo, la microbiota, la inflamación... ¿Qué sugiere la conversación constante entre cuerpo y cerebro?

Cada día entendemos mejor que el cuerpo funciona como un todo. Cuando empecé a investigar, vivíamos la etapa del llamado reduccionismo: intentábamos ir al detalle. Pero, en las dos últimas décadas,

la investigación ha descubierto que existen muchas interacciones entre órganos. Buena parte de los estudios buscan conectar distintos sistemas, porque, al final, funcionamos como un organismo único. Todavía no tenemos datos específicos, pero estas investigaciones amplían considerablemente el número de variables. Es difícil extraer conclusiones simples, aunque observamos que existe una interacción entre el estado inflamatorio del organismo y la función cerebral. Se habla del eje intestino-cerebro, y sabemos que convivimos con un microbioma –una colección de bacterias en el intestino, la cavidad oral o la piel– que constituye nuestras bacterias personales, diferentes en cada individuo.

Actualmente, se estudia cómo esos colectivos bacterianos se relacionan con el funcionamiento del cerebro o qué microbioma tienen las personas centenarias. Son temas complejos que requieren mucha investigación para empezar a extraer pautas sólidas sobre estas interacciones. Podemos afirmar que la biomedicina aborda hoy relaciones complejas entre sistemas y esa es la vía para comprender mejor cómo funciona nuestro organismo.

Forma parte de la Organización Europea de Biología Molecular (EMBO) y del Centro de Investigación Biomédica en Red (CIBERNED). ¿Qué supone trabajar con tantos equipos y jóvenes investigadores?

Es fundamental. La ciencia no se entiende de otra manera: necesitamos equipos cada vez más multidisciplinares. Tengo colegas que, para abordar determinados objetivos, trabajan con matemáticos, ingenieros, médicos y biólogos. Además, todos necesitamos bioinformáticos, porque se generan cantidades ingentes de datos que solo pueden analizarse mediante herramientas computacionales. Los grupos de trabajo deben ser amplios y diversos para afrontar los problemas desde distintas perspectivas.

También es esencial la formación. En nuestro oficio, uno aprende a hacer ciencia de quienes ya tie-



La terapia celular en el cerebro no parece lejana: ya se está probando en humanos dentro de ensayos clínicos

nen experiencia y conocen bien el quehacer científico y, a su vez, formamos a las nuevas generaciones. Siempre hay jóvenes en proceso de aprendizaje que aportan muchísimo y se preparan para descubrir cosas importantes para la sociedad.

El tercer elemento clave es la colaboración. Como los proyectos son cada vez más complejos, resulta muy estimulante y productivo trabajar con otros equipos. Es lo que permite, por ejemplo, la red CIBERNED en enfermedades neurodegenerativas, que reúne a 55 grupos de investigación en toda España para intercambiar resultados, discutir avances y colaborar activamente.



Lo ideal sería prevenir las enfermedades neurodegenerativas a través del diagnóstico precoz



¿Qué cambiaría en el sistema de investigación en España para fomentar proyectos de largo recorrido?

La respuesta más fácil es decir que falta financiación y es cierto: no hay suficiente apoyo. Los países más desarrollados son los que más invierten en ciencia. España es un país volcado en el sector servicios y no en el tecnológico, por tanto, carece del apoyo estructural que necesitaría. Nuestras instituciones no tienen financiación estable para la investigación. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas o las universidades no disponen de programas estructurales de ese tipo. Las universidades, por ejemplo, reciben financiación en

función de su docencia, no de su investigación. Esto provoca que tengamos investigadores excelentes que, siendo funcionarios y cobrando del erario público, deban pedir dinero para poder trabajar. Eso no ocurre en ninguna otra profesión pública.

Una financiación estructural permitiría mantener activos a muchos investigadores que a veces no consiguen recursos en convocatorias cada vez más competitivas. Deberían existir fondos base para sostener la investigación cotidiana y otros, de mayor envergadura, para proyectos a largo plazo. Esa es una asignatura pendiente en nuestro país.

Después de tantos años estudiando el cerebro, ¿sigue manteniendo asombro?

¡Por supuesto! Somos lo que es nuestro cerebro; en él reside nuestra identidad. Los científicos solemos preguntarnos: ¿es posible que un cerebro se comprenda a sí mismo? El problema de su complejidad radica, por un lado, en el enorme número de células que contiene –todas conectadas entre sí– y, por otro, en su plasticidad. No es posible asignar funciones concretas a áreas determinadas del cerebro. Esa combinación de interconexión y flexibilidad genera una profundidad inmensa que aún estamos lejos de comprender plenamente. ■

COLABORACIÓN CSN-UC: DIEZ AÑOS IMPULSANDO LA SIMULACIÓN CFD DE INCENDIOS EN CENTRALES NUCLEARES

Eugenia Morgado Cañada / Técnica del Área de Riesgos Internos, Incendios e Inundaciones (ARIN) de la Subdirección de Tecnología Nuclear (STN). Coordinadora del proyecto FIRENUC.

La seguridad frente a incendios en centrales nucleares constituye un escenario de investigación crucial, tanto por la complejidad de los fenómenos implicados como por las posibles consecuencias sobre sistemas esenciales para la operación segura de la planta. En este contexto, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta fundamental para el análisis detallado de escenarios de incendio. Desde 2014, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Universidad de Cantabria (UC) mantienen una colaboración que en 2024 ha alcanzado su primera década. Actualmente, esta línea de trabajo se desarrolla bajo el convenio FIRENUC.

La unión entre el CSN y la UC ha impulsado avances en la caracterización experimental de materiales, el desarrollo de *software* especializado, la validación de modelos mediante ensayos y la participación en proyectos internacionales de referencia. El objetivo es aumentar la fiabilidad de las simulaciones y dotar a reguladores e industria de herramientas más precisas para gestionar el riesgo de incendios en instalaciones nucleares. Diez años de cooperación han fortalecido las capacidades técnicas del CSN y reforzado su presencia en la investigación aplicada a la seguridad nuclear frente a incendios.

1. INCORPORACIÓN DE CFD EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO DE INCENDIOS

Los incendios constituyen uno de los riesgos más relevantes en el análisis de seguridad de las centrales nucleares. A pesar de que su frecuencia es baja, la complejidad de los fenómenos implicados y su capacidad para afectar a sistemas y componentes esenciales hacen que su estudio sea prioritario.

El incendio de la central Browns Ferry, en 1975, supuso un punto de inflexión en la conciencia del sec-

tor: demostró que un único suceso de fuego aparentemente menor podía afectar simultáneamente a múltiples redundancias, comprometiendo los principios de defensa en profundidad y funciones de seguridad esenciales, lo que llevó a implementar normativas y a impulsar el desarrollo de metodologías más rigurosas para mejorar la protección frente a incendios en instalaciones nucleares.

Tradicionalmente, la evaluación de escenarios de incendio se había basado en metodologías simpli-

ficadas. Entre ellas, destacan los cálculos unidimensionales y los modelos de zona, que representan los compartimentos como volúmenes homogéneos o estratificados en capas, y las correlaciones empíricas obtenidas a partir de ensayos estandarizados. Sin embargo, estos métodos, aunque conservadores y útiles para obtener estimaciones rápidas, presentan limitaciones evidentes al tratar de reproducir la naturaleza tridimensional de un incendio. Por ejemplo, la propagación del fuego en bandejas de ca-



Figura 1. Ensayos experimentales de propagación del fuego en bandejas de cables

bles, la interacción con sistemas de ventilación o la estratificación térmica no pueden ser representadas adecuadamente mediante estas aproximaciones.

Además, la defensa en profundidad, principio rector de la seguridad nuclear, exige garantizar que los incendios no comprometan funciones esenciales de seguridad incluso en escenarios de baja probabilidad. En este sentido, dada la vulnerabilidad de los sistemas de seguridad ante un incendio, como se evidenció en el accidente de Browns Ferry, la aparición de Códigos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) supuso un salto cualitativo. La posibilidad de resolver con detalle espacial y temporal las ecuaciones que gobiernan el movimiento de fluidos y la transferencia de calor permitió abordar fenómenos hasta entonces inaccesibles. También posicionó los CFD como una herramienta idónea para complementar las metodologías tradicionales, de cara a lograr evaluaciones más representativas y proporcionar a reguladores e industria una base técnica más sólida en la gestión del riesgo de incendios. No obstante, su aplicación al ámbito nuclear aún requiere afrontar retos significativos, entre los que destacan la elevada demanda computacional, la necesidad de modelos de cierre adecuados y la validación experimental rigurosa de los resultados.

La publicación de la norma NFPA 805 en 2001 reconoció la posibilidad de aplicar modelos computacionales de incendio como soporte a los enfoques basados en el análisis probabilista de riesgos. En este contexto, el Fire Dynamics Simulator (FDS), desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST), se consolidó rápidamente como la herramienta más extendida en la simulación de incendios. Desde su primera versión en 2000, FDS ha evolucionado incorporando modelos de combustión, transferencia radiativa y producción de gases tóxicos, así como interfaces gráficas y otras herramientas asociadas que facilitan el trabajo del analista.

Su aceptación en el ámbito nuclear se vio reforzada por programas internacionales de validación, como el proyecto PRISME, promovido por la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE y en el que ha participado el CSN, que proporcionó datos experimentales a escala real en configuraciones comparables a las de centrales nucleares. Estos ensayos incluyeron incendios en compartimentos con ventilación controlada, incendios de cables y propagación de humo entre salas. Los resultados de FDS, comparados con las mediciones experimentales, permiten realizar ejercicios de validación que demostraron un grado de concordancia aceptable en la mayoría de parámetros, lo que reforzó su credibilidad como herramienta de análisis y facilitó su uso en escenarios de mayor complejidad: incendios en bandejas de cables, interacción entre múltiples salas a través de aberturas o efecto combinado de ventilación forzada y convección natural (figura 3).

La experiencia también puso de manifiesto las limitaciones actuales del código. FDS reproduce adecuadamente incendios de combustibles sólidos comunes, pero su desempeño es menos robusto en fenómenos como la ignición y propagación en bandejas de cables, donde intervienen procesos complejos de pirólisis y la geometría juega un papel determinante. Asimismo, la interacción con sistemas de supresión de incendios, como rociadores automáticos de agua nebulizada, no está plenamente validada. Pese a que el código incorpora modelos simplificados para simular la descarga de agua, la predicción del enfriamiento y la dinámica de las gotas de agua sigue presentando incertidumbres significativas.

Otra dificultad se relaciona con la combustión en atmósferas con bajo contenido de oxígeno, un escenario posible en centrales nucleares donde se pueden encontrar configuraciones de compartimentos confinados o en incendios de larga duración. En estas condiciones, las reacciones químicas y la producción de especies tóxicas se desvían de las aproximaciones simplificadas incorporadas en FDS, lo que

puede dar lugar a discrepancias con la realidad.

A pesar de estas limitaciones, FDS se aplica hoy de manera habitual en tres ámbitos clave:

- 1) *Análisis de diseño y compartimentación*: enfocado a la evaluación de la eficacia de barreras físicas, diseño de sistemas de ventilación y determinación de la posible propagación de humo entre salas.
- 2) *Evaluación de escenarios de riesgo*: mediante la simulación de incendios en bandejas de cables y armarios eléctricos se pueden estimar tiempos de fallo de sistemas críticos y posibles modos de propagación.
- 3) *Apoyo a la toma de decisiones reguladoras*: haciendo uso de simulaciones como complemento a los modelos probabilistas de riesgo y como herramienta para justificar medidas compensatorias en modificaciones de planta.

2. COLABORACIÓN CSN-UC

La consolidación del uso de estas herramientas de simulación en procesos de licenciamiento y tomas de decisión reguladoras impli-



Figura 2. Ensayos experimentales de combustión en atmósfera viciada

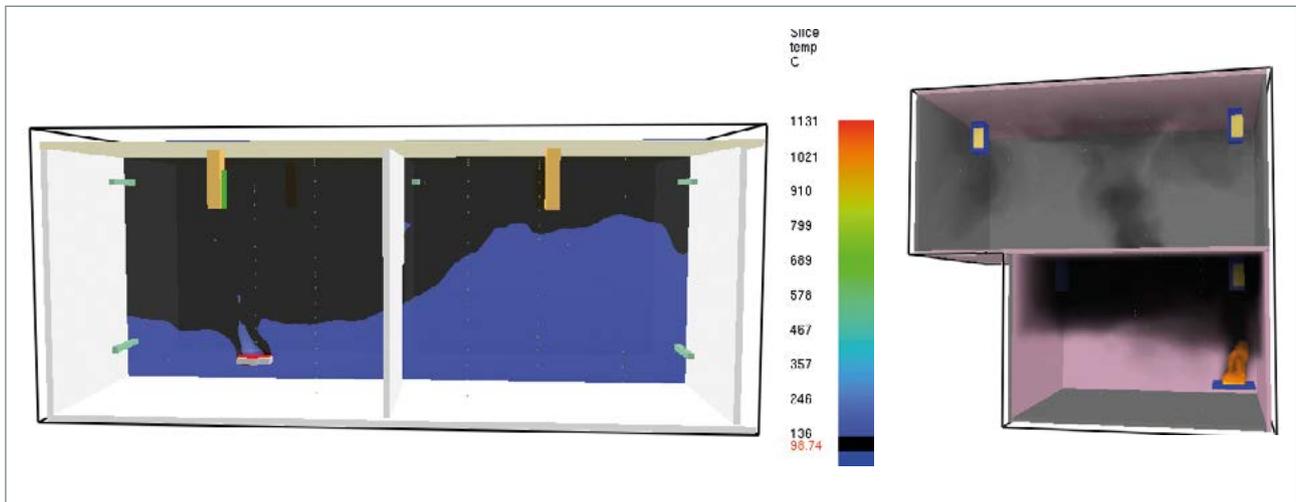


Figura 3. Simulaciones de incendios de validaciones internacionales de PRISME

ca robustecer metodologías de validación específicas ante escenarios de incendios en centrales nucleares, definir protocolos estandarizados de modelado y cuantificación de incertidumbre y continuar ampliando las bases de datos experimentales. Como respuesta a esta necesidad, surgió la colaboración entre el CSN y el grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria, reconocido por su trayectoria en investigación de incendios y seguridad.

Por un lado, el CSN identificó la necesidad de reforzar el conocimiento con metodologías específicas y contrastadas para evaluar la validez de estos análisis. En paralelo, el grupo GIDAI acumulaba ya una sólida experiencia en investigación experimental y modelización de incendios, aunque con aplicaciones más centradas en la edificación y el transporte. El potencial de unir fuerzas resultaba evidente: el regulador aportaba el conocimiento sobre el marco normativo y las necesidades de seguridad nuclear en la protección contra incendios en centrales nucleares, mientras que la universidad ofrecía capacidades técnicas y científicas en simulación avanzada de incendios.

El primer convenio entre ambas instituciones se firmó en 2014 y se extendió hasta 2018. Bajo el título de «Simulación de Incendios en Centrales Nucleares», los objetivos principales del proyecto fueron: definición de metodologías de cara a la obtención de parámetros de

entrada para definir las reacciones de los materiales en el modelo FDS; análisis de la aplicabilidad de FDS para modelar fuentes de incendio complejas, como armarios o bandejas de cables; comparación de diferentes metodologías para representar su comportamiento en FDS; simulación de escenarios reales de centrales nucleares, y definición de una metodología para definir escenarios de incendio en FDS. Durante este periodo, se participó en el proyecto internacional PRISME 2, promovido por la OCDE-NEA (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico-Agencia para la Energía Nuclear), que proporcionó datos experimentales a gran escala y permitió abordar un ejercicio de validación de FDS (figura 3). Por último, se inició el desarrollo del software gratuito NuclearFire para facilitar el modelado computacional de escenarios de incendios de centrales nucleares. Tras los buenos resultados iniciales, la colaboración se renovó mediante un segundo convenio, denominado «Metodologías avanzadas de análisis y simulación de incendios en centrales nucleares» y vigente entre 2020 y 2024, con un alcance más ambicioso. Esta etapa se centró en el desarrollo de metodologías avanzadas del modelado y el estudio de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la definición de los parámetros de entrada a FDS y disminuir el coste computacional. Se aplicaron técnicas de caracterización experimental de materiales

mediante calorimetría de cono y ensayos térmicos, así como el uso de inteligencia artificial para acelerar los cálculos CFD. Se trabajó en la generación de bases de datos experimentales específicas para cables y componentes eléctricos empleados en plantas nucleares, un aspecto crítico debido a la fuerte dependencia de los modelos CFD respecto de los parámetros de entrada. También se incluyó la modelización de los sistemas de detección y extinción y se continuó el desarrollo del software NuclearFire para definir escenarios de incendio en centrales nucleares. Además, se intensificó la participación internacional, con la inclusión en proyectos como FIRE Benchmark. Por último, como aplicación directa de esta colaboración, el grupo GIDAI ha dado apoyo al CSN en el análisis de detalle de áreas de fuego de distintas centrales nucleares españolas, cuyo estudio era de interés tanto para el regulador como para el licenciataria de las centrales.

La etapa actual, iniciada en 2024 bajo el nombre FIRENUC «Análisis de modelos numéricos y experimentales para la investigación de incendios en centrales nucleares», tiene una duración prevista de cuatro años y representa la consolidación de esta cooperación. El convenio no solo busca profundizar en los aspectos técnicos de la simulación de incendios mediante CFD, sino también enmarcar la investigación dentro de los grandes retos

de regulación. FIRENUC se centra en seis grandes líneas de trabajo:

- 1) Acometer un análisis continuo y comprensivo de los desarrollos y submodelos de FDS, orientado a dotar al CSN del criterio técnico necesario para el manejo de la herramienta de simulación y su aplicación en las tareas de evaluación y supervisión dentro la temática de la protección contra incendios.
- 2) Realizar ensayos experimentales a pequeña escala, encaminados a comprender el comportamiento del incendio ante escenarios característicos de instalaciones nucleares, tales como incendios en bandejas de cables (figura 1).
- 3) Validar los modelos de FDS mediante comparación directa con los datos obtenidos en ensayos a pequeña y gran escala, con el objetivo de cuantificar la incertidumbre asociada a las simulaciones.
- 4) Realizar simulaciones realistas de escenarios de incendios en centrales nucleares y otras tipologías de interés para el análisis de fenómenos o del impacto del fuego sobre componentes específicos, como puede ser la instrumentación o la consideración de diferentes configuraciones en los escenarios típicos en centrales nucleares, haciendo hincapié en la influencia de las condiciones ambientales u otros parámetros esenciales en la simulación del proceso de propagación de un incendio (figura 4).
- 5) Desarrollar software específico, mejorando de forma continua la herramienta NuclearFire para dotarla de instrumentos de apoyo que faciliten la introducción de parámetros de entrada, la especialización de bases de datos típicas de centrales nucleares o la visualización de resultados.
- 6) Participar en proyectos internacionales, como PRISME 3 y FAIR, que buscan armonizar las metodologías de uso de CFD en el ámbito nuclear y generar consenso entre reguladores de diferentes países. La participación

conjunta del CSN y la UC en proyectos internacionales sigue una metodología de tres pasos: 1) una fase de calibración, 2) una simulación a ciegas de un experimento de incendio de cable PRISME y 3) la simulación de evento de incendio real. La importancia de este tipo de *benchmarks* radica en la necesidad –aún existente– de validar modelos de simulación de incendios bajo ciertos fenómenos relacionados con el fuego, como la propagación del fuego por bandejas de cables (figura 1).

Uno de los aspectos más destacados de la colaboración entre el CSN y el grupo GIDAI es que no se ha limitado a aplicar herramientas existentes, sino que ha generado innovaciones propias, adaptadas a las necesidades específicas de la seguridad nuclear. A lo largo de una década de trabajo conjunto, los convenios han generado múltiples líneas de trabajo:

- 1) *Caracterización experimental de materiales.* La calidad de una simulación CFD depende de manera crítica de la fidelidad de los parámetros de entrada. Propiedades como conductividad térmica, densidad, calor específico, tasa de pérdida de masa o calor de combustión determinan cómo se comporta un material bajo condiciones de fuego. En muchos casos, los valores por defecto disponibles en bases de datos genéricas no representan adecuadamente los materiales empleados en instalaciones nucleares, sobre todo, cables eléctricos, plásticos retardantes de llama o aislamientos específicos.

Para cubrir esta laguna, la UC, bajo el marco de los convenios con el CSN, ha desarrollado una intensa actividad experimental. Se han utilizado calorímetros de cono, cámaras de pirólisis y ensayos de ignición para obtener parámetros precisos de combustión. Estos ensayos permiten, por ejemplo, conocer la tasa de liberación de calor de un cable eléctrico bajo diferentes condiciones de flujo de calor, información indispensable para modelar con realismo un incendio en bande-

jas de cables. La obtención de esta información ha sido uno de los avances más significativos, ya que proporciona al analista valores representativos y validados de entrada que posteriormente se utilizan en simulaciones CFD, reduciendo la incertidumbre asociada a las simulaciones.

- 2) *Metodologías de modelado avanzadas.* Otro logro ha sido la definición de procedimientos estandarizados de modelado de incendios para escenarios nucleares. En la práctica, modelar un incendio en una central nuclear no es una tarea trivial: exige tomar decisiones sobre la discretización de la malla, la selección de modelos de combustión, los criterios de parada de cálculo o la representación de sistemas de ventilación. La ausencia de guías específicas generaba, hasta hace pocos años, resultados heterogéneos según el analista.

Los convenios han permitido establecer protocolos comunes que aseguran coherencia y reproducibilidad. Se han definido, por ejemplo, criterios de refinamiento de malla específicos para la simulación de bandejas de cables, procedimientos para representar aberturas y compuertas de ventilación, procedimientos específicos para introducir en FDS parámetros que representen mejor la combustión de cables y estrategias de simplificación geométrica que equilibran la fidelidad del modelo con la viabilidad computacional. Estas metodologías no solo han sido documentadas en los informes y seguimiento del convenio, sino que también se han compartido en foros internacionales, contribuyendo al debate global sobre buenas prácticas para el empleo de los CFD en el ámbito nuclear.

- 3) *Validación mediante ensayos a gran escala.* La validez de cualquier simulación depende, en última instancia, de su comparación con la realidad. Por ello, la colaboración CSN-UC ha apostado por una combinación de ensayos propios y participación en programas internacionales de va-

lidación. En el ámbito nacional, se han desarrollado ensayos a escala reducida y media en instalaciones experimentales de la UC, donde se han reproducido incendios en bandejas de cables y pequeños compartimentos (figura 2). Estos ensayos han proporcionado datos valiosos de temperaturas, flujos de humo y tiempos de ignición.

A mayor escala, la participación en proyectos internacionales como PRISME y FAIR ha permitido contrastar los modelos con incendios reales en instalaciones de ensayo representativas de centrales nucleares (figura 4). La alianza con la UC favoreció la participación española en el análisis de resultados obtenidos en estos proyectos internacionales y contrastar la capacidad de los modelos de FDS para reproducir fenómenos complejos, como la propagación de humo entre salas adyacentes o la influencia de la ventilación forzada en la dinámica del fuego (figura 3). La presencia española en estos foros también ha reforzado su visibilidad internacional y facilitado el acceso a bases de datos experimentales de gran valor.

- 4) *Desarrollo de herramientas de apoyo al modelado.* Además de avances experimentales y metodológicos, la colaboración ha dado lugar al desarrollo de un software propio. NuclearFire es una herramienta de simulación de incendios creada por la UC para facilitar la preparación de modelos CFD en el ámbito nuclear, que permite al analista seleccionar materiales de una base de datos previamente caracterizada, definir escenarios de incendio con interfaces amigables y exportar automáticamente archivos compatibles con FDS.

Otra innovación es la extensión de FLASH-CAT, un modelo semiempírico diseñado para predecir la propagación de incendios en bandejas de cables. Este modelo, que combina correlaciones experimentales con algoritmos de predicción, se ha integrado con FDS para proporcionar estimaciones rápidas en etapas preliminares del análisis, antes de

realizar simulaciones tridimensionales completas, reduciendo así los costes computacionales y mejorando las predicciones.

- 5) *Incorporación de la inteligencia artificial.* En los últimos años, una línea emergente de trabajo ha sido la aplicación de técnicas de inteligencia artificial al análisis de incendios. El elevado coste computacional de las simulaciones CFD supone un obstáculo para su uso rutinario en evaluaciones reguladoras. Para superar esta barrera, el grupo GIDAI ha comenzado a entrenar redes neuronales que actúan como metamodelos: a partir de un conjunto de simulaciones CFD de referencia, son capaces de generar predicciones aproximadas de la evolución de un incendio en cuestión de segundos. Aunque aún en fase de validación, este enfoque promete reducir drásticamente los tiempos de cálculo y abrir la puerta a aplicaciones en tiempo real, como la gestión de emergencias.

Más allá de los logros técnicos que han proporcionado metodologías más robustas y resultados validados que permiten evaluar con mayor fiabilidad escenarios críticos para la seguridad nuclear, la colaboración ha tenido un impacto institucional notable. Para el CSN, ha generado un canal estable de transferencia de conocimiento entre el ámbito académico y el regulador, así como el fortalecimiento de sus capacidades internas, contribuyendo a que las decisiones de seguridad se apoyen en bases científicas más sólidas. Para la UC, los convenios han abierto un campo de investigación de alto valor añadido, situando al grupo GIDAI como referente internacional en la aplicación de CFD a incendios nucleares.

Los resultados no solo se aplican a resolver problemas inmediatos del regulador, sino que también contribuyen a generar nuevo conocimiento científico, publicable en foros internacionales y útil para otros países. De hecho, muchos desarrollos realizados en el marco de estos convenios han sido presentados en congresos especializados y han generado numerosas publicacio-

nes de artículos científicos, lo que ha permitido situar al país en una posición destacada en el ámbito internacional de la seguridad nuclear aplicada a incendios.

3. INTEGRACIÓN DE LOS CFD: RETOS FUTUROS

El empleo de los CFD para la simulación de incendios en el ámbito nuclear y su integración real en la práctica reguladora y operativa constituye un reto presente. La razón es sencilla: las decisiones reguladoras que afectan a la seguridad nuclear requieren un alto grado de rigor, trazabilidad y reproducibilidad. No obstante, la experiencia acumulada tanto en proyectos internacionales como a través de los convenios entre el CSN y la UC han demostrado que es posible alcanzar un nivel de madurez técnica suficiente para aportar confianza ante escenarios concretos de incendios, existiendo aún retos que afrontar en los próximos años.

El primer desafío radica en la naturaleza misma de la dinámica de fluidos computacional. A diferencia de un método empírico sencillo, una simulación CFD es el resultado de múltiples elecciones de modelado: definición geométrica, mallado, modelos de turbulencia, submodelos de combustión, condiciones de contorno, opciones numéricas y parámetros termodinámicos de materiales. Cada una de esas elecciones introduce fuentes de incertidumbre. En este sentido, se debe afrontar el problema de la cuantificación de incertidumbres en la modelización de incendios que no resulta trivial, pues combina las epistémicas (falta de conocimiento sobre modelos de cierre o parámetros cinéticos) y las aleatorias (variabilidad experimental de los datos de entrada).

La participación en ejercicios de validación y *benchmarking* internacionales juega un papel esencial para la cuantificación de incertidumbres. *Benchmarks* bien diseñados proveen casos de referencia con datos experimentales de alta calidad, que permiten evaluar el desempeño de distintos códigos y prácticas de modelado. La participación en estos programas –tanto

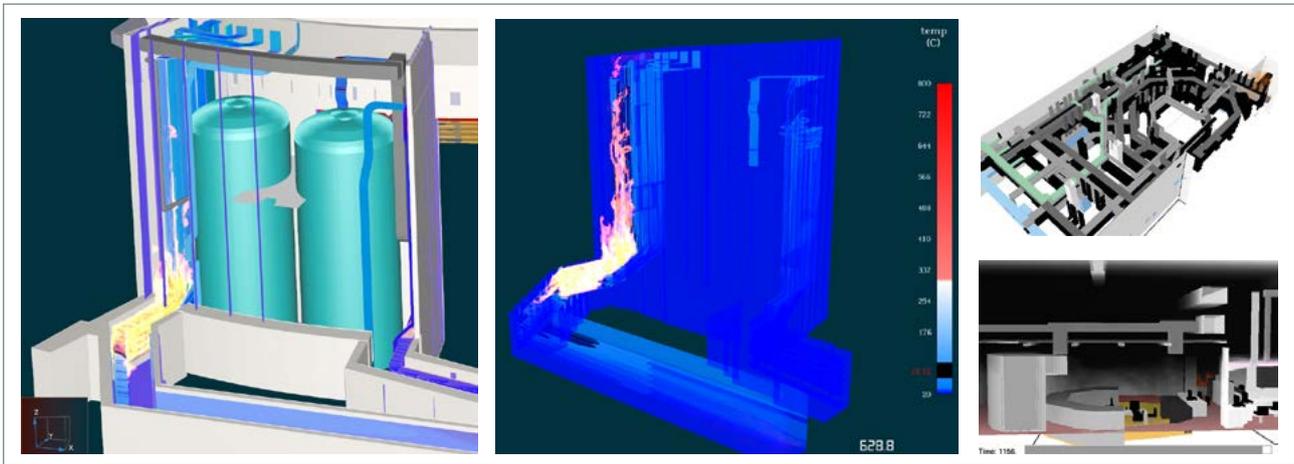


Figura 4. Visualización de simulaciones de incendios en escenarios reales

en calidad de contribuyente como de evaluador— proporciona una base objetiva para calibrar y entender las limitaciones de los modelos de simulación de incendios en escenarios realistas.

El coste computacional sigue siendo otro gran obstáculo para la generalización de los CFD en procesos reguladores. Una simulación detallada de un incendio en un compartimento nuclear puede requerir semanas o meses de cálculo en estaciones de trabajo de alto rendimiento. Para superar esta limitación se vislumbran varias estrategias, como la paralelización masiva en arquitecturas de supercomputación o la integración de la inteligencia artificial mediante redes neuronales o metamodelos entrenados con grandes conjuntos de datos derivados de simulaciones CFD y experimentos.

Otra línea de futuro consiste en integrar los resultados de los CFD con las metodologías de análisis probabilista de seguridad (APS). Tradicionalmente, los APS se han basado en modelos simplificados para estimar la frecuencia y las consecuencias de incendios. Incorporar resultados de CFD permite representar de forma más realista la evolución de escenarios críticos, cuantificar con mayor precisión las trayectorias de propagación de humo y mejorar la estimación de tiempos de fallo de sistemas.

Una línea prioritaria para afrontar este problema consiste en el fortalecimiento de la base experimental disponible. Si bien se han realizado

ensayos de referencia a escala real en proyectos internacionales, todavía existen fenómenos mal caracterizados. Los incendios de cables de última generación, con cubiertas poliméricas retardantes de llama, presentan comportamientos de combustión complejos y difíciles de reproducir en modelos CFD. Del mismo modo, aspectos como la interacción entre incendios y sistemas de supresión por agua nebulizada, espuma o agentes limpios o el impacto del envejecimiento de los cables sobre su combustión aún carece de una base experimental amplia que permita validar los modelos. La realización de nuevas campañas experimentales a pequeña o gran escala, con instrumentación avanzada y escenarios realistas, que puedan abarcar estas casuísticas de interés, será esencial para consolidar la confianza en las simulaciones.

Una consecuencia directa de la integración de CFD en la práctica reguladora es la necesidad de que los organismos reguladores dispongan de capacidades técnicas propias para evaluar estudios complejos. Esto implica invertir en formación especializada, herramientas de *software* para reproducir o verificar análisis y, en ocasiones, realizar simulaciones de comprobación. La colaboración CSN-UC ha contribuido de forma decisiva a este objetivo, formando especialistas en un ámbito en el que confluyen conocimientos de física de incendios, modelización numérica, ingeniería nuclear y normativa de seguridad

para la protección de incendios en centrales nucleares.

Tras una década de trabajo conjunto, la colaboración CSN-UC ha permitido avances significativos en caracterización experimental de materiales, desarrollo de *software* específico, validación de modelos mediante ensayos a pequeña y gran escala y en la definición de metodología de simulación de incendios aplicables a escenarios reales en centrales nucleares. Más allá de los resultados técnicos, ha generado un canal estable de transferencia de conocimiento entre el ámbito académico y el regulador.

El reto ahora es consolidar estas capacidades y proyectarlas hacia el futuro, mediante nuevas campañas experimentales, integración con análisis probabilistas y participación en foros internacionales. En este camino, España se ha posicionado como un actor relevante en la investigación aplicada a la seguridad nuclear frente a incendios, mostrando cómo la cooperación entre organismos reguladores y universidades puede traducirse en beneficios tangibles para la seguridad.

En definitiva, el recorrido de la CFD en la seguridad nuclear frente a incendios ha sido, en apenas dos décadas, extraordinario. Lo que comenzó como una herramienta exploratoria, confinada a laboratorios de investigación, se ha convertido en un recurso con potencial para apoyar decisiones críticas en el ámbito regulador y en la operación de instalaciones nucleares. ■

VIGILANCIA DE LA RADIATIVIDAD AMBIENTAL EN ESPAÑA: EL PAPEL DEL CSN

Adriana Ortiz Gómez, Paloma Ozores Díez, Miriam Herbella Blázquez, José Antonio Trinidad Ruiz, Francisco Javier Castillo Tortosa / Técnicos del Área de Vigilancia Radiológica Ambiental • Sofía Luque Heredia / Jefa del Área de Vigilancia Radiológica Ambiental • Inmaculada Simón / Subdirectora de Protección Radiológica Ambiental

La vigilancia radiológica ambiental constituye un pilar fundamental en la protección de la población y el medioambiente frente a efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. En España, el Consejo de Seguridad Nuclear desarrolla desde hace más de tres décadas un completo sistema que garantiza el seguimiento continuo de la calidad radiológica del medioambiente. Reconocido internacionalmente por su rigor y alcance, integra la vigilancia en el entorno de las instalaciones nucleares y radiactivas y proporciona una visión global del estado radiológico del país.

La vigilancia radiológica ambiental en España encuentra su fundamento legal en el marco normativo nacional e internacional que establece las obligaciones del Estado en materia de protección. Los artículos 35 y 36 del Tratado Euratom constituyen la base jurídica europea y establecen que cada Estado miembro debe crear las instalaciones necesarias para controlar de modo permanente el índice de radiactividad de la atmósfera, las aguas y el suelo, y comunicar esta información a la Comisión Europea.

A nivel nacional, la Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear establece entre sus funciones fundamentales «controlar y vigilar la calidad radiológica del medioambiente» e «informar a la opinión pública sobre materias de su competencia». Esta doble función refleja la importancia que el legislador otorgó tanto al aspecto técnico de la vigilancia como a la transparencia informativa hacia la sociedad.

En este sentido, los objetivos del CSN son múltiples y complemen-

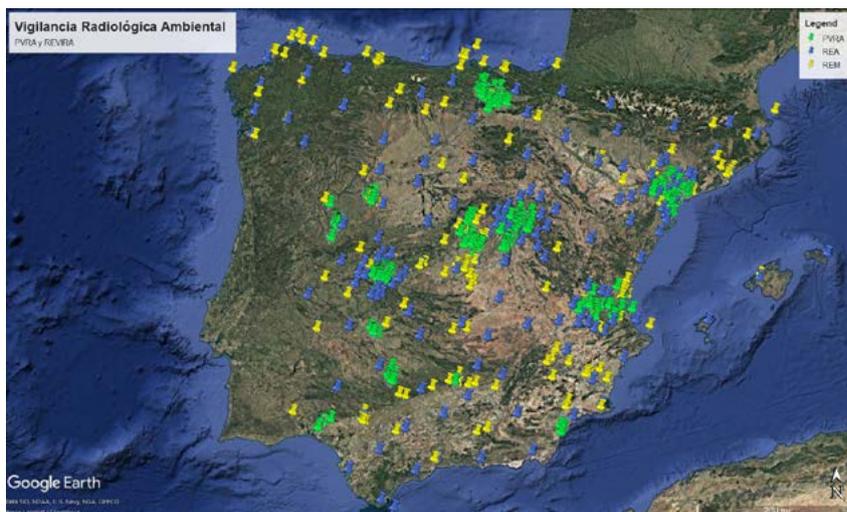


Figura 1. Estaciones de medida y muestreo del sistema de vigilancia radiológica ambiental en España

tarios. En primer lugar, detectar la presencia y vigilar la evolución de elementos radiactivos de origen natural y artificial, así como los niveles de radiación ambiental, determinando las causas de posibles incrementos. En segundo lugar, estimar el riesgo radiológico potencial para la población y proporcionar datos científicos que permitan una evaluación objetiva de la situación. Por último,

en su caso, determinar la necesidad de tomar precauciones o establecer medidas correctoras que protejan la salud pública y el medioambiente.

En el entorno de las instalaciones nucleares, estos objetivos se amplían para garantizar el cumplimiento de los requisitos legales y reglamentarios, verificar la idoneidad de los programas de vigilancia de efluentes y validar los

modelos de transferencia de radionucleidos en el medioambiente.

ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE VIGILANCIA

El sistema de vigilancia radiológica ambiental del CSN presenta una estructura compleja, que garantiza la cobertura completa del territorio nacional. Está basada en dos componentes principales, que se complementan para proporcionar una visión integral de la situación radiológica del país y proteger a las personas.

El primero lo constituyen los Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA), desarrollados en el entorno de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear y otros emplazamientos singulares, para detectar posibles incrementos de radiactividad en el medioambiente. Estos programas, responsabilidad de los titulares de las instalaciones bajo la supervisión del CSN, se establecen según las características específicas de cada emplazamiento e incluyen factores como tipo de instalación, demografía local, usos de la tierra y el agua o hábitos de la población del entorno. A estos PVRA se superponen los Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental Independientes (PVRAIN), llevados a cabo por el CSN mediante acuerdos con laboratorios de universidades españolas, que toman y analizan el 5-10 % de las muestras del PVRA, para comprobar la bondad de sus resultados.

El segundo componente es la Red de Vigilancia Radiológica Ambien-

tal nacional (Revira), gestionada directamente por el CSN, que brinda información sobre todo el territorio español, incluyendo aquellas zonas no influidas por instalaciones. Esta red se subdivide a su vez en dos subsistemas: la Red de Estaciones de Muestreo (REM), que practica la vigilancia mediante programas de muestreo y análisis de diferentes matrices en laboratorio, y la Red de Estaciones Automáticas (REA), que facilita datos en tiempo real de los niveles de radiación ambiental en aire.

Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental

Los PVRA constituyen el núcleo de la vigilancia en el entorno de las instalaciones nucleares. Se diseñan siguiendo las recomendaciones de la *Guía de Seguridad 4.1* del CSN, sobre *Diseño y desarrollo del Programa de Vigilancia Radiológica Ambiental para centrales nucleares*, que establece criterios armonizados para su implantación y desarrollo.

Cada PVRA responde al Estudio Analítico Radiológico (EAR) correspondiente, que permite la identificación de los grupos de población críticos, las vías críticas de exposición y todos aquellos radionucleidos que puedan tener una contribución significativa a las dosis de la población. Las vías de exposición que normalmente se consideran incluyen la inhalación de partículas y gases, la ingestión de agua y alimentos, y la exposición externa por radiación directa.

Los PVRA se desarrollan a lo largo de diferentes fases temporales correspondientes a las distintas etapas de vida de las instalaciones.

Durante la fase preoperacional, que acompaña a la autorización de construcción, se establece el nivel de referencia del fondo radiológico de la zona. Las centrales nucleares españolas de segunda y tercera generación llevaron a cabo programas preoperacionales de entre cuatro y siete años de duración, cumpliendo con las recomendaciones internacionales.

La fase operacional se desarrolla durante la explotación de la planta y su objeto es la evaluación del impacto derivado del funcionamiento de la instalación.

Finalmente, las fases de cese de explotación, desmantelamiento y clausura requieren adaptaciones del PVRA para verificar el posible impacto derivado de las actividades específicas de cada etapa.

Red de Vigilancia Radiológica Ambiental

La red nacional Revira proporciona una perspectiva más amplia de la situación radiológica del país y complementa la información obtenida en el entorno específico de las instalaciones. Su desarrollo se basa en los acuerdos alcanzados en el marco de los artículos 35 y 36 del Tratado Euratom y la Recomendación de la Comisión Europea de 8 de junio de 2000 sobre el contenido mínimo de los programas de vigilancia.

Esta recomendación establece dos tipos de redes: una densa, con



Figura 2. Medida y muestreo de suelos durante el desmantelamiento



Figura 3. Equipos de muestreo de aire

numerosos puntos de muestreo distribuidos por todo el territorio para proporcionar una cobertura adecuada, y otra espaciada, constituida por pocos puntos, donde se requieren técnicas de medida de gran sensibilidad que permitan detectar y seguir la evolución de concentraciones extremadamente bajas de actividad.

• **Red de Estaciones de Muestreo (REM)**

La REM se inició en 1992, con la participación de catorce laboratorios pertenecientes a nueve comunidades autónomas, expandiéndose progresivamente hasta incluir veinte laboratorios colaboradores distribuidos por todo el territorio nacional. Ubicados principalmente en universidades y centros de investigación, desarrollan programas de muestreo y análisis que abarcan la vigilancia de la atmósfera, el medio terrestre y el medio acuático.

El programa de vigilancia de la atmósfera y del medio terrestre incluye el muestreo del aire, que pasa mediante un sistema de bombeo a través de filtros y cartuchos de carbón activo que retienen los aerosoles y radioyodos, y se miden semanalmente en laboratorio. Los análisis realizados comprenden índices de actividad alfa y beta total, espectrometría gamma y, trimestralmente, análisis específicos de estroncio-90. La red de alta sensibilidad utiliza muestreadores de alto flujo que operan con caudales de hasta 900 m³/hora, permitiendo alcanzar límites de detección significativamente más bajos.

El programa de vigilancia del medio acuático se desarrolla en colaboración con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex) mediante acuerdos específicos suscritos desde 1987. Este programa incluye más de ochenta puntos de muestreo a lo largo de los ríos de las principa-

les cuencas hidrográficas y quince estaciones de vigilancia de aguas costeras, que proporcionan una cobertura completa del territorio nacional.

• **La Red de Estaciones Automáticas (REA)**

La REA constituye uno de los componentes más modernos del sistema de vigilancia del CSN. Renovada completamente entre 2019 y 2021, consta de 185 estaciones distribuidas estratégicamente por todo el territorio nacional. Están diseñadas para la gestión de emergencias radiológicas, con capacidad para detectar en tiempo real pequeños incrementos en los niveles de fondo radiológico en la atmósfera.

Las estaciones de la nueva REA incorporan tecnología avanzada, que incluye detectores de centelleo de NaI o LaBr₃ para espectrometría gamma, detectores Geiger-Müller para medida de altas tasas de dosis y sistemas de comunicación robus-



Figura 4. Muestreo de agua marina y continental



Figura 5. Estación de la REA

| Año | Institución |
|------|--------------------------------------|
| 1978 | Cedex |
| 1992 | Universidad de Cantabria |
| 1992 | Universidad de Extremadura (Badajoz) |
| 1992 | Universidad de Extremadura (Cáceres) |
| 1992 | Universidad de Granada |
| 1992 | Universidad de La Laguna |
| 1992 | Universidad de las Islas Baleares |
| 1992 | Universidad de León |
| 1992 | Universidad de Málaga |
| 1992 | Universidad de Salamanca |
| 1992 | Universidad de Sevilla |
| 1992 | Universidad de Valencia |
| 1992 | Universidad del País Vasco |
| 1992 | Universidad Politécnica de Madrid |
| 1992 | Universidad Politécnica de Valencia |
| 1997 | Universidad de Castilla-La Mancha |
| 1997 | Universidad de La Coruña |
| 1997 | Universidad de Oviedo |
| 1997 | Universidad de Zaragoza |
| 2000 | CIEMAT |
| 2000 | Universidad Politécnica de Cataluña |
| 2024 | Universidad de Barcelona |

Figura 6. Laboratorios que participan en vigilancia radiológica ambiental

tos que garantizan la transmisión de datos incluso en situaciones de emergencia. Los datos se publican en línea en la web del CSN y se comparan con plataformas internacionales como EURDEP (European Radiological Data Exchange Platform) y el sistema IRMIS (International Radiation Monitoring System) del OIEA.

GARANTÍA DE CALIDAD

La fiabilidad de los resultados obtenidos en los programas de vigilancia radiológica ambiental requiere la implementación de sistemas de calidad rigurosos que garanticen la competencia técnica de todos los participantes.

A lo largo de los años, el CSN ha desarrollado un completo sistema de control de calidad que abarca múltiples aspectos de la vigilancia radiológica ambiental.

Acreditación y normalización

El CSN impulsa la implantación de sistemas de gestión de calidad, conforme a la norma ISO/IEC 17025 sobre Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, en todos los laboratorios que intervienen en los programas de vigilancia. Esta normalización garantiza que los participantes cuenten con procedimientos documentados, personal cualificado, equipos calibrados y sistemas de trazabilidad de las medidas.

La progresiva acreditación de los laboratorios por parte de ENAC (Entidad Nacional de Acreditación) representa un reconocimiento formal de su competencia técnica y una garantía adicional de la fiabilidad de sus resultados. El proceso ha sido especialmente relevante, dado que las medidas de radiactividad ambiental se caracterizan por los bajos niveles de actividad que deben detectarse, lo que requiere técnicas analíticas muy especializadas.

Campañas de intercomparación analítica

Desde 1992, el CSN organiza anualmente campañas de intercomparación analítica con el apoyo técnico del Ciemat y, desde 2010, de la Universidad de Barcelona para la preparación de muestras. Estas campañas son una herramienta

fundamental para verificar y mejorar la calidad de las medidas realizadas por los laboratorios.

La programación de los ejercicios sigue un ciclo de cuatro años que cubre todas las vías de exposición, agrupando las diferentes matrices en cuatro grandes grupos: aire, agua, minerales y orgánicas. Se emplean matrices con niveles de concentración bajos, similares a los que se encuentran en condiciones reales, y se solicitan resultados en dos plazos: 72 horas para evaluar la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia y dos meses para el análisis en condiciones normales. Además, cada cinco años se lleva a cabo un ejercicio de dosimetría ambiental.

La participación en estas campañas es obligatoria para todos los laboratorios que colaboran con el CSN, y los resultados se evalúan mediante criterios estadísticos rigurosos, que permiten identificar desviaciones significativas y promover acciones correctoras cuando sea necesario, y se divulgan a través de la web del CSN.

Procedimientos técnicos normalizados

El CSN ha publicado diecinueve procedimientos técnicos que establecen criterios armonizados para diferentes aspectos de la vigilancia radiológica ambiental. Desarrollados en colaboración con expertos del sector, abarcan desde técnicas de muestreo hasta métodos de análisis específicos para diferentes tipos de muestras y radionucleidos.

Su aplicación garantiza la homogeneidad de las técnicas empleadas por los diferentes laboratorios y facilita la comparabilidad de los resultados obtenidos en distintas ubicaciones geográficas. Los procedimientos se actualizan periódicamente para incorporar los avances técnicos y las mejores prácticas internacionales.

GESTIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS: KEEPER

La gestión de la ingente cantidad de datos generados por el sistema de vigilancia radiológica ambiental requiere herramientas informáticas especializadas capaces de manejar, validar y analizar millones de registros. Para ello, el CSN desarrolló

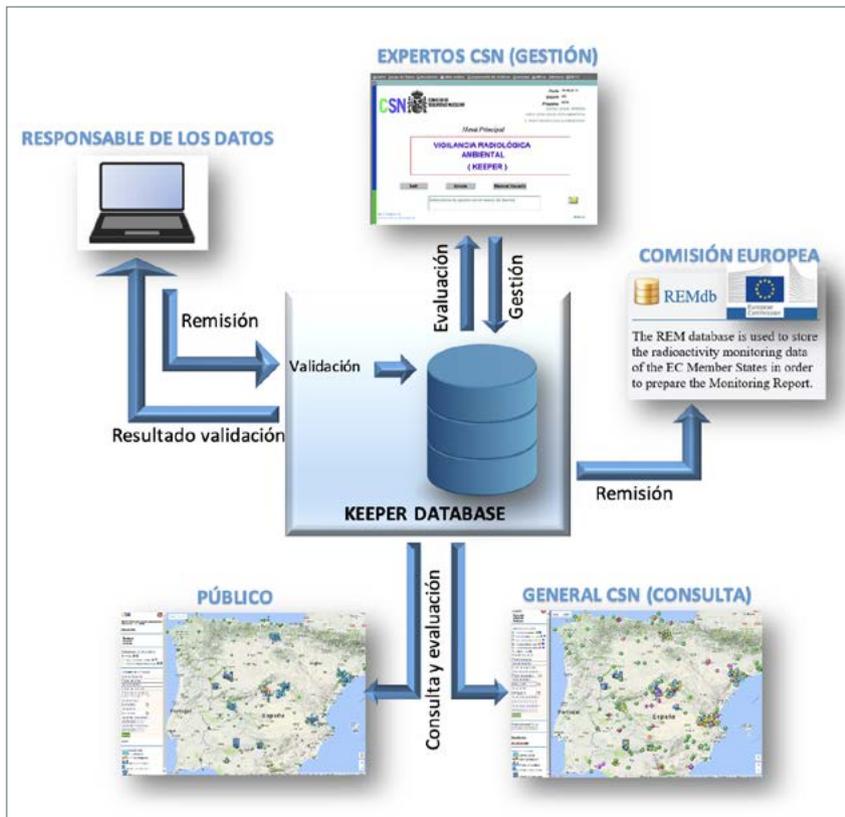


Figura 7. Gestión de datos de vigilancia radiológica ambiental

la base de datos integrada Keeper, núcleo de la gestión de información radiológica ambiental en España.

Evolución y características

El desarrollo del sistema Keeper comenzó en 1992, a partir de los datos almacenados en el programa informático ANATEMA, donde se cargaban manualmente los datos facilitados por las instalaciones y los recuperados de la antigua Junta de Energía Nuclear (JEN). Desde sus inicios, se ha adaptado a las necesidades cambiantes del sistema de vigilancia y a avances tecnológicos, como la reciente implantación de una solución ©Business Intelligence asociada a Keeper para el análisis de datos.

Actualmente, Keeper contiene cerca de cinco millones de registros con información sobre la calidad radiológica del medioambiente de los últimos cuarenta años. Constituye un archivo único a nivel internacional por su extensión temporal y la diversidad de información que contiene, y proporciona una perspectiva histórica invaluable sobre

la evolución de los niveles de radiactividad en España.

El sistema se sustenta en cinco módulos diferenciados que prestan servicios a distintos tipos de usuarios. El núcleo principal es la base de datos propiamente dicha, una potente herramienta para la gestión y evaluación de los registros por parte de los técnicos del CSN. Un segundo módulo permite el envío telemático de información por parte de los laboratorios y titulares de instalaciones, facilitando la carga automática en la base de datos. El tercer módulo está destinado al envío de información a la Unión Europea, en cumplimiento de los artículos 35 y 36 del Tratado Euratom.

El cuarto módulo consiste en una aplicación corporativa, para que los técnicos del CSN puedan consultar, analizar y representar gráficamente todos los datos georreferenciados. Esta herramienta incorpora funcionalidades avanzadas de análisis estadístico y representación cartográfica para facilitar la inter-

pretación de los resultados y la detección de tendencias.

El quinto módulo, puesto en marcha en febrero de 2017, es una aplicación web de acceso público que posibilita a cualquier ciudadano la consulta de los datos de vigilancia radiológica ambiental. Denominada Keeper-Web, representa un hito en materia de transparencia informativa y sitúa a España entre los países más avanzados del mundo en cuanto a acceso público a información radiológica ambiental.

Keeper-Web presenta una interfaz intuitiva basada en tecnología de mapas que permite visualizar las estaciones de muestreo y consultar los valores de radiactividad disponibles desde 2006. Los usuarios pueden filtrar la información por instalación, tipo de muestra, radionucleido, periodo temporal o estación, y los resultados se presentan en forma gráfica y tabular, con posibilidad de exportación para análisis posteriores.

RESULTADOS Y TENDENCIAS

Los resultados obtenidos durante más de tres décadas de vigilancia radiológica ambiental sistemática proporcionan una visión completa y objetiva del estado radiológico de España. Analizados de forma integral, permiten extraer conclusiones sobre la evolución temporal de los niveles de radiactividad y su impacto en la población y el medioambiente.

Niveles de radiactividad

Los datos de la campaña de vigilancia de 2024, representativos de las tendencias observadas en los últimos años, confirman que los valores de radiactividad detectados en España se mantienen dentro de los rangos característicos del fondo radiológico ambiental, sin indicios de riesgo para la población o el medioambiente.

En el aire, los índices de actividad alfa y beta total muestran valores estables a lo largo del tiempo, con pequeñas variaciones entre puntos de muestreo que reflejan las diferencias naturales en la composición geológica de cada zona. La detección de radionucleidos artificiales, como el cesio-137 en las estaciones de alta sensibilidad, aunque

sistemática, debido a la presencia global de este radionucleido a causa del fallout, se produce en concentraciones extremadamente bajas sin riesgo para la salud pública.

En las aguas continentales, los valores de los índices de actividad alfa y beta total reflejan principalmente el contenido en radionucleidos naturales procedentes de la geología de las cuencas hidrográficas. Los valores de tritio presentes en algunos ríos como consecuencia de los vertidos autorizados de las centrales nucleares se mantienen muy por debajo de los límites establecidos en la normativa sobre calidad del agua.

Impacto

Los resultados de los PVRA demuestran que estas instalaciones operan sin impacto radiológico significativo sobre el medioambiente circundante. Los niveles de radiactividad detectados en las diferentes vías de exposición se mantienen dentro de los rangos del fondo radiológico ambiental o muy próximos a los límites de detección de los equipos de medida.

Esta conclusión se ve reforzada por la comparación sistemática entre estaciones de muestreo situadas aguas arriba y abajo de las instalaciones, así como por la evolución temporal de los resultados que no muestra tendencias crecientes atribuibles al funcionamiento de las instalaciones.

Los PVRAIN confirman los resultados obtenidos en los PVRA, proporcionando una validación independiente de la calidad radiológica del entorno de las instalaciones.

Vigilancia en situaciones especiales

El sistema español ha demostrado su eficacia en la detección y seguimiento de situaciones especiales que han permitido verificar su capacidad de respuesta. El accidente de Fukushima en 2011 constituyó una prueba importante para las redes de vigilancia europeas, incluyendo la española.

Desde el 23-24 de marzo hasta finales de mayo de 2011, las redes de vigilancia españolas detectaron el paso de la nube radiactiva procedente del ac-

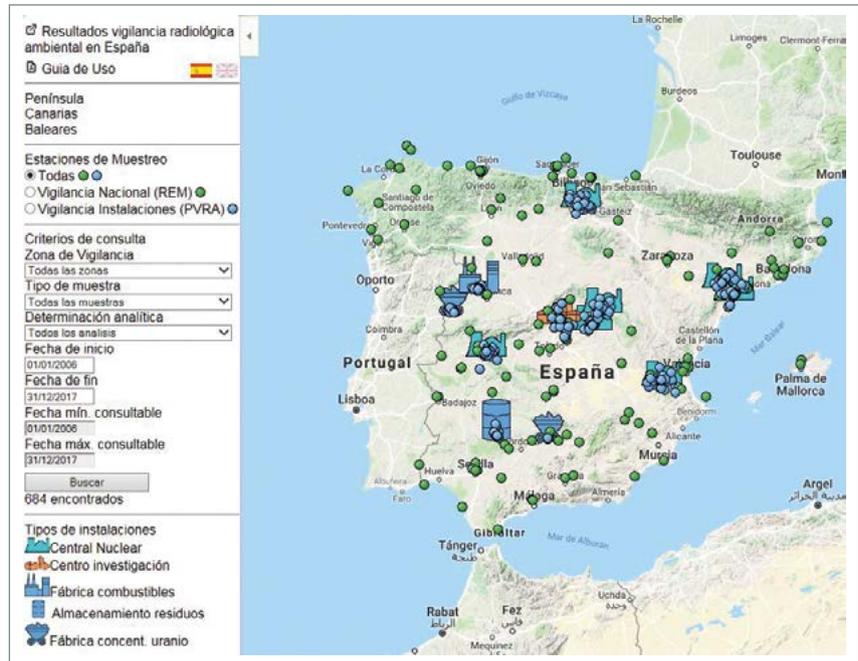


Figura 8. Aplicación KEEPER-WEB

cidente japonés. Los valores detectados, aunque claramente distinguibles del fondo radiológico habitual, se mantuvieron en niveles muy bajos sin riesgo para la población. Esta detección demostró la sensibilidad y eficacia del sistema de vigilancia.

TRANSPARENCIA E INFORMACIÓN PÚBLICA

La función informativa del CSN hacia la sociedad constituye uno de los pilares fundamentales de su actividad y representa un compromiso con la transparencia que va más allá de las obligaciones legales establecidas. Esta función se materializa a través de múltiples canales y herramientas que garantizan el acceso público a información rigurosa y actualizada sobre la calidad radiológica del medioambiente.

Informes y Publicaciones

Cada año, el CSN presenta al Congreso de los Diputados y al Senado un informe que recoge sus actividades más relevantes en materia de seguridad nuclear y protección radiológica, incluyendo un resumen de los resultados de la vigilancia radiológica ambiental. De acceso público, proporciona una visión global de la situación radiológica del país.

También publica un informe técnico anual específico sobre los resultados

de la vigilancia radiológica ambiental que describe en detalle los resultados obtenidos tanto en los PVRA como en REVIRA. En sus últimas ediciones alcanza las doscientas páginas y supone una fuente de información técnica de primer nivel.

Keeper-Web

El desarrollo de la aplicación Keeper-Web representa un hito en materia de transparencia informativa a nivel internacional. Accesible desde febrero de 2017, situó a España junto con Francia dentro de los primeros países europeos en proporcionar acceso público directo a sus bases de datos de vigilancia radiológica ambiental.

La aplicación permite consultar más de diez años de datos históricos, con información actualizada y validada. La interfaz, basada en tecnología cartográfica avanzada, facilita la consulta intuitiva de información compleja y garantiza a usuarios sin conocimientos técnicos especializados el acceso a datos de alta calidad científica.

Su impacto trasciende las fronteras nacionales: es utilizada como referencia por organismos reguladores internacionales y citada en foros especializados como ejemplo de buenas prácticas en transparencia informativa.

Comunicación durante emergencias

El sistema de vigilancia radiológica ambiental está diseñado para proporcionar información en tiempo real durante situaciones de emergencia radiológica. La REA publica datos actualizados cada diez minutos en la web del CSN, lo que permite un seguimiento continuo de la evolución de la situación radiológica en todo el territorio nacional. En caso de emergencia, la red aumenta la frecuencia de transmisión y proporciona datos cada minuto.

Durante emergencias nucleares, como la ocurrida en Fukushima, el CSN intensifica la comunicación pública, con información actualizada, objetiva y accesible sobre la evolución de los niveles de radiactividad detectados y su riesgo para la población.

RETOS TECNOLÓGICOS

El sistema español se encuentra en constante evolución, adaptándose a los avances tecnológicos y a las necesidades cambiantes de la sociedad. Los retos futuros incluyen la incorporación de nuevas técnicas analíticas, la aplicación de nuevas tecnologías para el análisis de datos, y la mejora y la adaptación continua a las nuevas vías y formas de comunicación.

Desarrollo tecnológico

La incorporación de nuevas técnicas analíticas para la determinación de radionucleidos que permitan alcanzar límites de detección más bajos que los métodos tradicionales en menor tiempo permitirá mejorar la capacidad de detección de variaciones muy pequeñas en los niveles de actividad.

El desarrollo de sensores remotos y sistemas de muestreo automatizados abre nuevas posibilidades para la vigilancia en localizaciones de difícil acceso o en condiciones ambientales adversas. Además, permitirá ampliar la cobertura geográfica de la vigilancia sin comprometer la calidad de los datos obtenidos.

Integración de datos y análisis predictivos

El volumen creciente de datos generados por el sistema de vigilan-



cia requiere el desarrollo de herramientas avanzadas de análisis que permitan extraer información relevante de grandes conjuntos de datos. La aplicación de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático favorecerá la identificación de patrones y tendencias que podrían pasar desapercibidos mediante análisis convencionales.

La posibilidad de integrar parámetros ambientales con técnicas geoestadísticas en la evaluación de los datos radiológicos proporcionará una visión más completa de los procesos de transferencia de radionucleidos en el medioambiente, mejorando la capacidad predictiva del sistema.

CONCLUSIONES

El sistema de vigilancia radiológica ambiental desarrollado por el CSN a lo largo de más de tres décadas constituye un modelo de referencia internacional que combina rigor científico, cobertura territorial completa y transparencia informativa. Los resultados obtenidos demuestran de manera objetiva y continuada que la calidad radiológica del medioambiente español se mantiene en niveles sin riesgo alguno para la población.

Su evolución hasta la actualidad refleja la capacidad de adaptación a los cambios tecnológicos y a las demandas sociales crecientes en materia de información y transparencia. La implementación de la aplicación Keeper-Web sitúa a Es-

paña en la vanguardia mundial en cuanto a acceso público a información radiológica ambiental.

Los retos futuros requieren mantener el equilibrio entre la innovación tecnológica y la continuidad de las series temporales que constituyen el principal valor del sistema. La incorporación de nuevas técnicas analíticas y el desarrollo de herramientas de análisis avanzadas deben realizarse sin comprometer la comparabilidad histórica de los datos.

El compromiso del CSN con la excelencia técnica y la transparencia informativa garantiza que el sistema de vigilancia radiológica ambiental español continúe proporcionando a la sociedad la información necesaria para mantener la confianza en la protección efectiva de la población y el medioambiente frente a los riesgos radiológicos.

La vigilancia radiológica ambiental trasciende su función técnica para convertirse en un instrumento que proporciona certidumbre científica en un ámbito donde la percepción pública a menudo se encuentra influida por factores de otro tipo. En este contexto, la labor del CSN adquiere una dimensión que va más allá de la mera verificación del cumplimiento normativo para contribuir de manera sustantiva al bienestar social y a la confianza pública en las instituciones encargadas de la protección radiológica. ■



Lo que el arte oculta

Ciencia al servicio de la conservación del patrimonio

El Descendimiento, Rogier van der Weyden. Óleo sobre tabla.
©Museo Nacional del Prado

Radiografía de El Descendimiento, Rogier van der Weyden.
©Museo Nacional del Prado

La ciencia no solo participa en la creación de expresiones artísticas. Acompaña a los procedimientos de análisis y favorece nuevas técnicas para su preservación. Desde la datación mediante ¹⁴C hasta cámaras de atmósfera controlada y radiografías que penetran los lienzos, diversas metodologías permiten comprender en profundidad las obras pictóricas y asegurar su supervivencia para las generaciones futuras.

■ Texto: Isabel Alonso

El Museo de Orsay (París) custodia una de las obras más famosas de Jean-François Millet: *El Ángelus*. Una pareja de campesinos detiene su trabajo en un campo desierto para rezar. La luz amarillenta que inunda el cielo y no logra desterrar el frío que envuelve el lienzo apenas los ilumina y deja entrever instrumentos de labranza y un cesto de patatas a sus pies. Donde muchos solo observaban

una de las escenas campesinas que proliferaron en el siglo XIX, Salvador Dalí supo ver algo más. Su insistencia llevó al Louvre a utilizar rayos X para analizar el lienzo y, bajo la capa de pintura final, en el lugar del cesto apareció un rectángulo oscuro. Interpretado como un diminuto ataúd por algunas fuentes, el hallazgo otorgó una nueva lectura a la escena y abrió interrogantes que hoy siguen sin resolverse.

El Ángelus no es el único lienzo sometido a este tipo de análisis. El Museo Nacional del Prado cuenta desde 1975 con una instalación propia –autorizada y supervisada por el Consejo de Seguridad Nuclear– para radiografiar piezas de su catálogo, como *El descendimiento*, de Rogier van der Weyden, o *El cazador cargando la escopeta*, de Goya. «Esta técnica revela lo que el ojo no



Pastillas de albayalde (o blanco de plomo) halladas en una tumba del siglo V a. C.

Datar el arte

A partir de la década de los cuarenta, el descubrimiento del radiocarbono o ^{14}C , isótopo radiactivo que se produce de forma natural cuando los rayos cósmicos impactan contra el nitrógeno de la atmósfera terrestre, y su decaimiento en ^{14}N , hizo posible calcular la datación de los materiales orgánicos. En consecuencia, pudo conocerse con precisión la antigüedad de lienzos, marcos y, cuando se preservan, aglutinantes naturales.

¿Y los frescos? Pintados mayoritariamente con pigmentos inorgánicos sobre capas de mortero de cal, no contienen aglutinantes orgánicos que puedan datarse con esta metodología. Sin embargo, existen dos pigmentos blancos que contienen carbono: el carbonato cálcico y el blanco de plomo. El primero, formado hace millones de años a partir de microorganismos, ya no contiene suficiente ^{14}C para ser datado; el segundo, por el contrario, sí. Este tipo de blanco, también llamado albayalde, es un pigmento artificial conocido desde la Antigüedad, ampliamente utilizado a lo largo de los siglos –ya lo mencionaba Plinio el Viejo en el siglo I y Cennino Cennini en el XV– y creado por la corrosión del plomo debido a ácidos como el vinagre. Tras un proceso que permite separar el ^{14}C que posee del de los carbonatos, puede datarse con precisión. Para comprobar que los resultados eran fiables, se aplicaron sobre la cámara de Margarita de Borgoña, en el Château de Germolles (Borgoña, Francia), y el coro alto de la iglesia de los Cordeliers, en la capital del cantón suizo de Friburgo. En ambos casos, la documentación medieval indicaba la fecha de construcción, que coincidió con los resultados arrojados por la datación del ^{14}C del blanco de plomo ■



Detalle en macrofotografía de la obra de Ghirlandaio "Retrato de Giovanna Tornabuoni".
© Museo Nacional Thyssen-Bornemisza, Madrid

ve y muestra el interior de las obras, aportando una información de gran valor sobre fabricación de los soportes, modificaciones durante el proceso pictórico, estado de conservación de piezas y materiales y procedimientos empleados por los artistas», explican desde el museo, que en 2023 solicitó un equipo de tomografía computarizada.

Los tipos de pigmentos, el ligamento del soporte, reparaciones antiguas, zonas repintadas, refuerzos estructurales del bastidor o incluso obras anteriores ocultas bajo la capa final son parte de la información que se puede conseguir mediante esta metodología. No obstante, no es el único recurso utilizado por los museos para el diagnóstico de las creaciones artísticas.

La fotografía ultravioleta, por ejemplo, permite identificar materiales y determinar su antigüedad. Al aplicar luz ultravioleta sobre un lienzo, se produce un fenómeno denominado fluorescencia inducida. Los átomos de las moléculas de los materiales absorben energía y emiten un tipo de radiación electromagnética con una longitud de onda más larga y dentro del espectro visible: fluorescencia. Su intensidad varía según la composición de

cada material –pigmentos como el amarillo de cadmio presentan una fluorescencia intensa–, su grado de envejecimiento –la oxidación y polimerización la aumentan– o las mezclas que se han llevado a cabo –el blanco de plomo apenas presenta fluorescencia, pero combinado con el aceite de linaza es capaz de inducirla–. El método puede detectar retoques, repintes o comprobar el estado de la capa de barniz.

También se pueden detectar restauraciones anteriores, inscripciones o firmas mediante reflectografía infrarroja. Esta técnica utiliza radiación del infrarrojo cercano, capaz de penetrar las capas superficiales de pintura hasta alcanzar el dibujo preparatorio o los trazos subyacentes realizados con materiales ricos en carbono.



Amarillo de cadmio, uno de los pigmentos que presenta más fluorescencia inducida por luz ultravioleta



Restauración de la obra de Ghirlandaio "Retrato de Giovanna Tornabuoni". © Museo Nacional Thyssen-Bornemisza, Madrid

Asimismo, la macrofotografía aplicada a las obras de arte permite ampliar la imagen hasta observar detalles que, en condiciones normales, pasan inadvertidos para el ojo humano, como las variaciones de matices, las pinceladas y las texturas que componen cada cuadro.

Insectos, hongos y el desafío de la conservación

En 2022, el Museo de Arte Contemporáneo de Teherán cerró temporalmente sus puertas tras detectar visitantes indeseados: dentro del marco de una obra de los fotógrafos Bernd e Hilla Becher, habitaban varios pececillos de plata que se alimentaban del papel. De inmediato, comenzaron las labores de fumigación para acabar con la plaga.

Más allá de lo anecdótico, el incidente evidenció un gran peligro para la conservación artística. Asegurar la longevidad del patrimonio requiere una serie de cuidados y procesos que combinan biología, química y tecnología precisa. Los museos modernos aplican protocolos de gestión integral de plagas para detectar y neutralizar amenazas como polillas, termitas o xilófagos. Estos insectos se sienten especialmente atraídos por mate-

riales orgánicos, por lo que su prevención es esencial. Cuando el problema aparece, la ciencia se hace indispensable.

Uno de los métodos utilizados precisa cámaras de atmósfera controlada, para aislar las piezas afectadas durante varias semanas en un entorno donde el oxígeno se sustituye por gases inertes, como el nitrógeno o el argón. Privados de oxígeno, los insectos y sus larvas mueren por asfixia sin recurrir a pesticidas ni biocidas, evitando residuos químicos en las obras. No obstante, es necesario conocer los pigmentos utilizados: si el cuadro contiene azul de Prusia, la anoxia provoca un cambio en su estructura química y, como consecuencia, su decoloración.

En algunos casos, el tratamiento se realiza mediante congelación controlada y las piezas se introducen en cámaras a temperaturas entre -20 y -40 °C durante varios días. Este procedimiento no es aconsejable en acrílicos u óleos sobre lienzo, para evitar su deterioro. En otros, es necesario recurrir a la ciencia nuclear: una dosis muy baja de radiación ionizante es letal para las plagas, pero inocua para los cuadros.

A veces, el daño proviene de condiciones ambientales. Con demasiada humedad, los hongos encuentran el entorno ideal para su desarrollo, llegando a alterar la composición química de los pigmentos y modificar los colores. Para detectarlos, existen metodologías basadas en sistemas hiperespectrales, que permiten identificar variaciones en la superficie imperceptibles al ojo humano y localizar zonas afectadas por microorganismos o compuestos orgánicos en descomposición, sin necesidad de tomar muestras directas; en otras ocasiones se recurre al análisis molecular, que facilita el hallazgo de las especies responsables y determinar el tratamiento más adecuado.

Reparar el daño

En el centro de Pompeya, a apenas cien metros del foro, la Casa de Ariadna fue uno de los grandes descubrimientos del siglo XIX por sus pinturas murales. El paso del tiempo y una meteorología adversa han favorecido el deterioro y algunos frescos se han desprendido o presentan eflorescencias salinas que incrementan su decadencia, como ocurre en muchas partes del yacimiento.



Han van Meegeren en su estudio

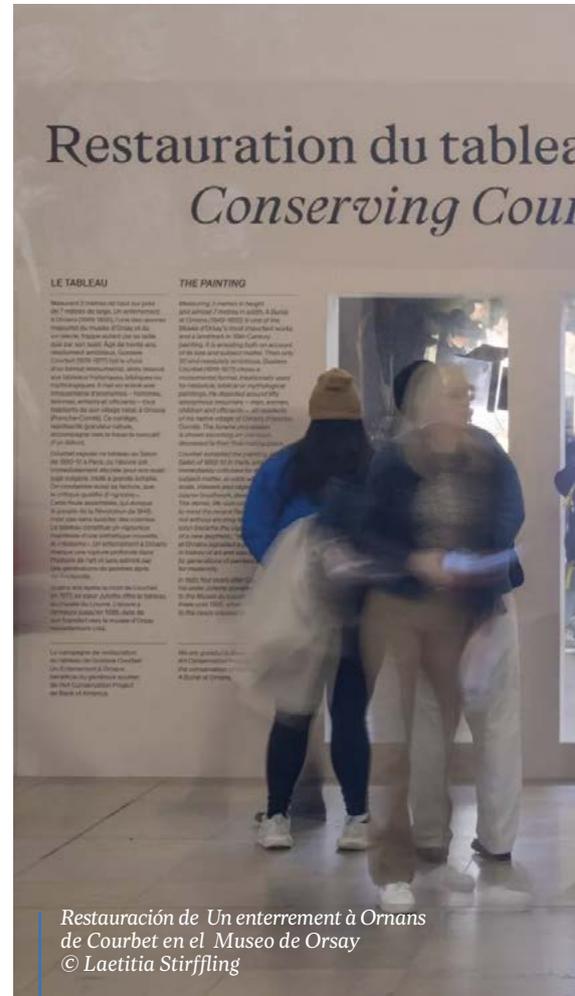
El arte de falsificar arte

Determinar la autoría en el ámbito de las artes plásticas ha sido siempre una cuestión controvertida. A lo largo de la historia, muchos han intentado hacer pasar sus cuadros por los de autores más conocidos con el fin de obtener mayor rédito. Cuidadas al detalle, copiando estilos y materiales –lienzos antiguos, pigmentos obtenidos mediante recetas tradicionales o marcos centenarios–, determinar la autenticidad de estas obras dependía del ojo experto de restauradores y especialistas en historia del arte, capaces de reconocer la mano de un autor por el trazo, la composición o el uso de la luz.

El avance de la física nuclear y el desarrollo de la datación por ^{14}C permitieron comprobar la edad real de los materiales y revelar falsificaciones que hasta entonces habían logrado engañar incluso a los expertos. Este método, aplicable únicamente a materiales de origen orgánico –como los lienzos de lino o algodón, la madera de los bastidores o los aglutinantes naturales–, se basa en el comportamiento del carbono durante la vida y la muerte de los organismos. Mientras una planta o un animal están vivos, intercambian de forma constante carbono con el medio, manteniendo estable la proporción de sus isótopos, incluido el radiactivo ^{14}C . Al morir, ese intercambio cesa y el ^{14}C comienza a desintegrarse a un ritmo conocido: su vida media, de unos 5730 años, permite determinar el tiempo transcurrido desde la muerte del organismo. Así fue posible, por ejemplo, descubrir falsificaciones artísticas realizadas sobre materiales mucho más recientes de lo que se pretendía. Uno de los casos más

célebres fue el del pintor neerlandés Han van Meegeren, que durante décadas falsificó obras de maestros como Frans Hals o Johannes Vermeer. Su suerte cambió tras la Segunda Guerra Mundial, cuando entre las posesiones de Hermann Göring, comandante en jefe de la Luftwaffe y procesado en los juicios de Núremberg, se halló uno de sus cuadros. Detenido por colaborar con los nazis y vender bienes culturales neerlandeses, Van Meegeren no tardó en confesar que en realidad se trataba de una falsificación. Así se le juzgó por fraude y redujo su pena a un solo año de prisión, que nunca llegó a cumplir, pues falleció antes.

Sin embargo, los falsificadores aprenden de la ciencia y algunos refinan su técnica hasta ser casi indetectables. Es el caso de uno de los cuadros de la serie *Contrastes de Formas*, pintada por el francés Fernand Léger a principios del siglo XX. Perteneciente a la colección Peggy Guggenheim de Venecia, los expertos sospechaban que no era auténtico, pero los análisis practicados hasta la fecha indicaban únicamente que los pigmentos y el lienzo diferían de otra obra del pintor, cuya autoría no se dudaba y estaba custodiada en Nueva York. En 2014, se tomó una muestra del cuadro y se analizó mediante un nuevo método denominado *bomb peak*, que tenía en cuenta el ^{14}C liberado tras las detonaciones atómicas en Hiroshima y Nagasaki y las pruebas nucleares atmosféricas posteriores. Los resultados fueron claros: el nivel de ^{14}C demostraba que el algodón utilizado para el lienzo era posterior a 1959... y Léger había muerto en 1955. ■



Restauración de *Un enterrement à Ornans* de Courbet en el Museo de Orsay © Laetitia Stirffling

Sensores de microclima, mediciones de radiación electromagnética y exploración de materiales son algunos métodos utilizados para monitorizar el estado de los frescos y determinar que la combinación de humedad, contaminación atmosférica y sales de ascenso capilar son los principales agentes de degradación. A partir de ahí, se han diseñado actuaciones de consolidación estructural y de limpieza controlada.

En los museos, la radiografía, la reflectografía infrarroja o la fluorescencia de rayos X ayudan a identificar grietas ocultas, capas de repinte o pigmentos inestables, mientras que los estudios fisicoquímicos determinan la composición de los materiales y su grado de deterioro.

Una vez determinado el alcance de los daños y la fórmula idónea de reparación, comienza el proceso de restauración. Si la superficie está



Restauración de *Un enterrement à Ornans* de Courbet en el Museo de Orsay © Laetitia Stirffling

cubierta por una capa de suciedad o barniz oxidado, se opta por geles acuosos o emulsiones controladas; cuando el soporte está roto, se aplican adhesivos sintéticos diseñados para envejecer de forma compatible con los materiales naturales; si es necesario pintar alguna parte, los pigmentos se mezclan con aglutinantes reversibles que pueden retirarse sin dejar rastro y, a la hora de barnizar, se priorizan materiales estables, transparentes y fácilmente solubles en el futuro.

El minucioso trabajo llevado a cabo en laboratorios de restauración suele pasar inadvertido para el público. Por ejemplo, en la sala 7 del Museo de Orsay, tras una cristalera que observa el paso de cientos de turistas al día, numerosos técnicos especializados se afanan en labores de recuperación, ajenos al tránsito de visitantes. Se trata de *Un Enterrement à Ornans*, inmensa obra

de Gustave Courbet que el museo ha decidido restaurar *in situ*, ofreciendo incluso visitas guiadas para explicar los procesos.

Ciencia, arte e inspiración

Acercar ciencia y arte al público general es una de las misiones del Ars Electronica Festival que se celebra en Linz, Austria. El festival forma parte de la iniciativa STARTS (Science, Technology & Arts) de la Comisión Europea, que promueve la colaboración entre artistas, científicos e investigadores. Cada año, acoge presentaciones, exposiciones y debates donde arte, ciencia y tecnología se encuentran y se presentan ante el público. El encuentro incluye una muestra de los proyectos seleccionados por el STARTS Prize, talleres y conferencias. Los visitantes pueden interactuar con los equipos creativos y científicos que se encuentran detrás de cada propuesta. ■

Bibliografía

- Alba Carcelén, L. et al. (2005). *Uso de la ultravioleta para el estudio del estado de conservación de la pintura de caballete*. Disponible en: https://www.ge-ic.com/files/2congresoGE/El_uso_de_la_luz_ultravioleta.pdf
- Berk, L. et al. (2020). Unexpected presence of ¹⁴C in inorganic pigment for an absolute dating of paintings. *Science Report*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/342128283_Unexpected_presence_of_14C_in_inorganic_pigment_for_an_absolute_dating_of_paintings
- Caforio, L. et al. (2014). Discovering forgeries of modern art by the ¹⁴C Bomb Peak. *European Physical Journal Plus*. Disponible en: DOI 10.1140/epjp/i2014-14006-6
- Ibermuseos. (2020). *La ciencia y el arte 2. Museos, conservación y tecnologías emergentes*. Disponible en: <https://www.ibermuseos.org/wp-content/uploads/2020/04/la-ciencia-y-el-arte-2-esp.pdf>
- Maekawa, S. y Elert, K. (2003). *The Use of Oxygen-Free Environments in the Control of Museum Insect Pests*. Getty Conservation Institute. Disponible en: https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/books/oxygen_free_environment.html
- Merello, P. García Diego, F. J. y Zarzo, M. (2012). Microclimate monitoring of Ariadne's house (Pompeii, Italy) for preventive conservation of fresco paintings. *Chemistry Central Journal* 6, 145. Disponible en: <https://bmcchem.biomedcentral.com/articles/10.1186/1752-153X-6-145>
- Museo del Prado (2020). *El Museo Nacional del Prado descubre algunas de sus obras a través de los rayos X*. Disponible en: <https://www.museodelprado.es/actualidad/noticia/el-museo-nacional-del-prado-descubre-algunas-de-60c1e0dc-04ef-7737-0a18-dc81e420cb43>



SUBESTACIONES de 400 KV

Conexión de una central nuclear española con la red de transporte eléctrico

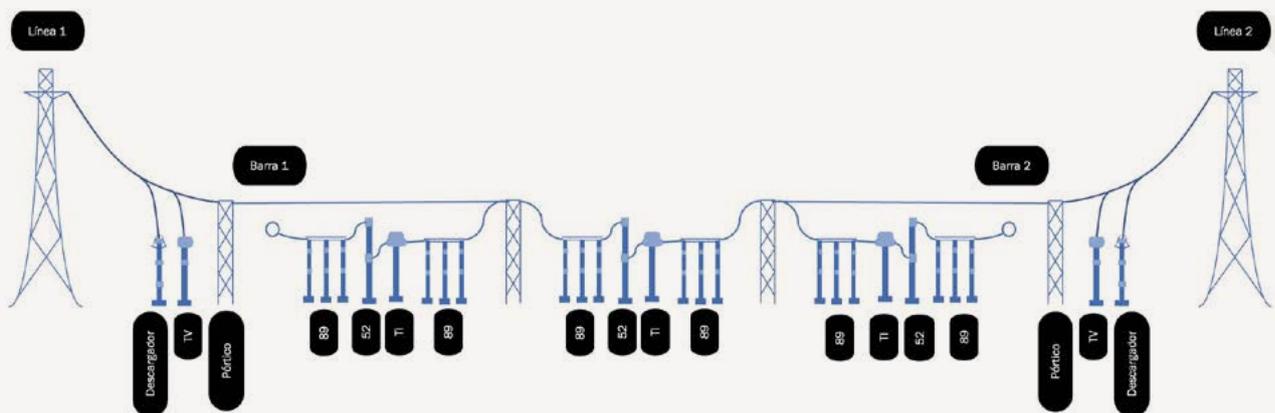
■ Texto: **Leyre Armañanzas** / Área de Sistemas Eléctricos e I&C del CSN

La energía producida por las centrales nucleares españolas en servicio se incorpora a la red de transporte a través de subestaciones de 400 kV, ubicadas cerca del doble vallado o a cierta distancia, como Vandellós II.

En el emplazamiento existe un segundo parque eléctrico de intemperie (110, 132 o 220 kV), disponible como fuente de alimentación eléctrica exterior alternativa para maniobras de arranque o alimentación a sistemas auxiliares. Ambos dan cumplimiento a las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento, que requieren dos circuitos cualificados

desde la red eléctrica exterior en las condiciones de operación a potencia.

Red Eléctrica de España es la titular de estas subestaciones, encargada de su gestión y control. Las actividades de mantenimiento, reconexión y puesta en servicio están coordinadas con los titulares de la central.



Esquema simplificado (para una fase) de una calle de una subestación de doble barra con dos líneas de entrada. Las barras son perpendiculares al papel. En la página siguiente, algunos detalles.

Las centrales terminan entre los transformadores principales en los que se eleva la tensión de la energía producida (desde 21 o 27 kV) a la tensión de la subestación de 400 kV y los interruptores de conexión a la subestación.

■ Las subestaciones están constituidas por dos barras en paralelo, tres en el caso de Ascó, con varias calles por las que acceden las líneas exteriores. Las barras cruzan la subestación y son equivalentes a «colectores». La salida desde el transformador principal se conecta a cualquiera de estas barras.

■ Las calles, perpendiculares a las barras, son las posiciones en las que se enganchan las líneas exteriores que conectan la subestación con el resto de la red. Su configuración es de interruptor y medio: se disponen tres interruptores por cada dos líneas de conexión exterior, de forma que ambas pueden conectarse a su barra o la contraria.

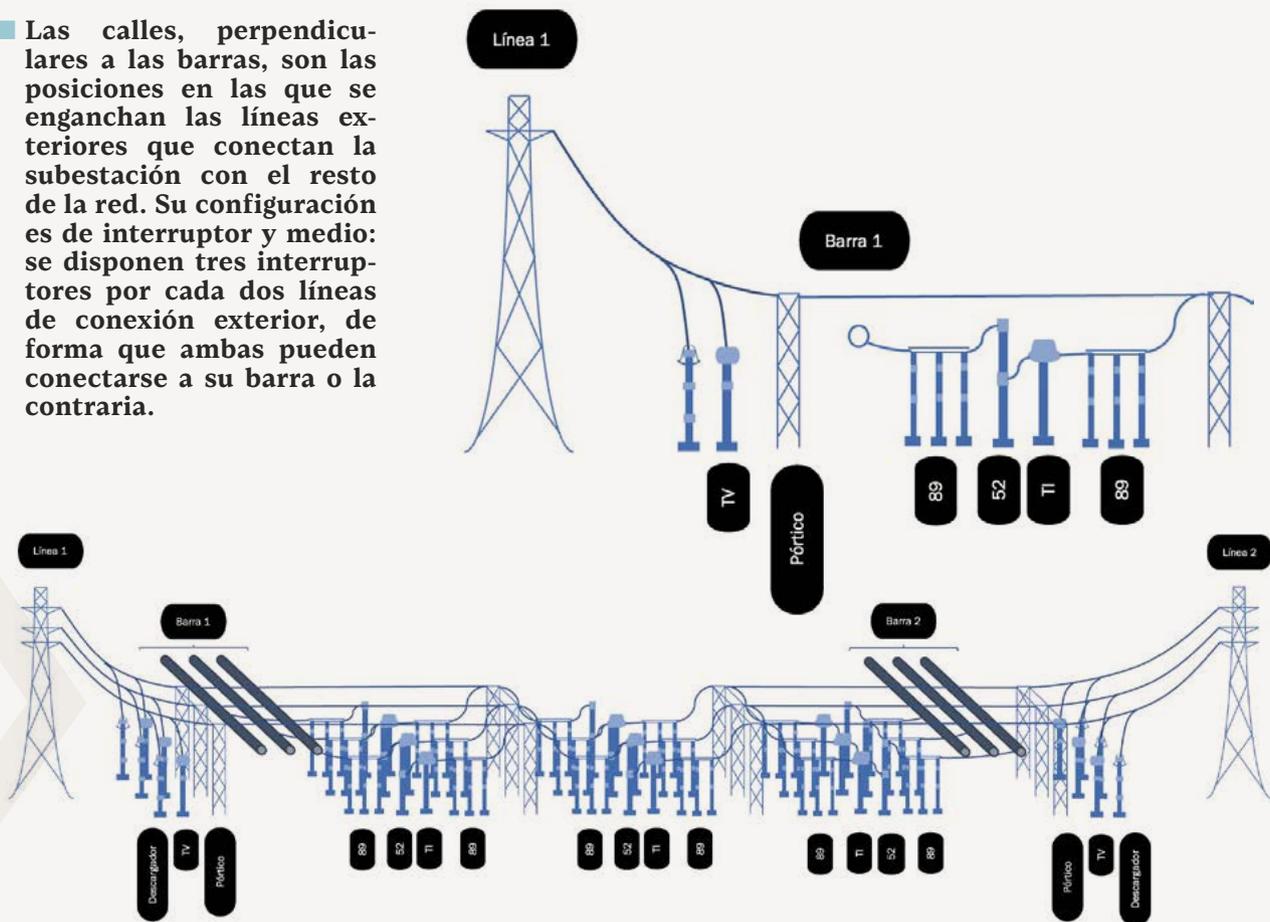
Las conexiones con los parques de 400 kV permiten, además de evacuar la energía generada hacia el exterior, alimentar los servicios auxiliares en caso de desconexión de la generación en aquellas centrales que disponen de un interruptor de generación.

Los interruptores (código ANSI 52) disponibles en los parques son mayoritariamente de tecnología SF6, robustos y compactos. Permiten interrumpir el paso de la corriente y disipar el arco eléctrico formado en la maniobra de apertura. Cada interruptor está flanqueado por dos seccionadores (código ANSI 89) que mantienen la apertura de un circuito para garantizar la seguridad de los trabajos durante las tareas de mantenimiento. Estos seccionadores suelen estar acompañados por dispositivos de cortocircuito o puesta a tierra (código ANSI 57), que favorecen condiciones de trabajo sin tensión durante tareas de corte y conexión de líneas.

Para accionar los interruptores del parque de 400 kV, se utilizan varios sistemas independientes de corriente continua, que ofrecen alto grado de fiabilidad y continuidad de operación de todos aquellos circuitos de mando y control.

Las variables eléctricas de tensión e intensidad se registran mediante transformadores de tensión o intensidad (TV o TI) de medida o de protección según sea su función.

Otros elementos típicos son las reactancias de línea, que permiten controlar las corrientes de cortocircuito y los descargadores que controlan las sobretensiones provocadas en las líneas.



Proyecto Karst y radón

Luis Santiago Quindós Poncela, Alma Pereda Guinea, Jorge Quindós López, Alicia Fernández Villar, Enrique Fernández López, Luis Quindós López, Ismael Fuente Merino, Santiago Celaya González, Daniel Rábago Gómez, Carlos Sainz Fernández. Universidad de Cantabria

Sergio Cañete Hidalgo, Elisa Gordo Puertas, José Manuel Pastor Vega, Lucía Ojeda Rodríguez. Universidad de Málaga

Gumersindo Jesús Verdú Martín, Belén Jeanne Juste Vidal, Aina Noverques Medina. Universidad Politécnica de Valencia ISIRYM

Sebastián Martorell Alsina, Josefina Ortiz Moragón, Marina Sáez Muños; Luisa Ballesteros Pascual. Laboratorio de Radiactividad Ambiental

En España, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) ha identificado las zonas con mayor riesgo de exposición al radón a partir de las medidas de radón en viviendas disponibles, del Mapa de Radiación Gamma Natural (MARNA), del Mapa litoestratigráfico y de permeabilidades de España. No obstante, fuera de estas zonas, también se detectan concentraciones de radón que superan el nivel de referencia de 300 Bq/m³, aunque con una probabilidad mucho menor.

En este proyecto se ha estudiado en detalle uno de los factores geológicos que puede originar concentraciones elevadas de radón, y que no se contempla en la actualidad en el mapa de radón: los sistemas kársticos que se muestran en la figura 1, localizados en las zonas de Cantabria, Málaga y Castellón de la Plana. Con ello se ha contribuido a un mejor conocimiento de la dinámica del radón en este tipo de sistemas y, por lo tanto, a mejorar el conocimiento sobre la exposición al radón en España.

El presente artículo recoge un extracto de los principales resultados obtenidos con referencia a cada uno de los objetivos que forman parte del proyecto financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear, desarrollado entre diciembre de 2021 y diciembre de 2024.

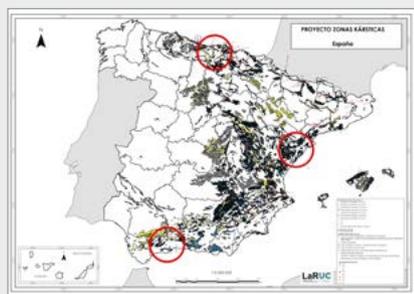


Figura 1. Mapa IGME-CSIC de zonas kársticas en España con las zonas señaladas que han sido objeto del proyecto

Los objetivos principales del proyecto se enumeran a continuación:

OBJETIVO 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS KÁRSTICAS ELEGIDAS DESDE EL PUNTO DE VISTA RADIOLÓGICO-GEOLÓGICO-ESTRUCTURAL

1. a.- Radiación gamma externa
1. b.- Espectrometría gamma de suelos
1. c.- Exhalación de gas radón de los suelos
1. d.- Permeabilidad
1. e.- Radón en suelos
1. f.- Caracterización geológico-estructural
- g.- Contenido de radón en agua (en abastecimientos de agua de consumo de la zona)

OBJETIVO 2: MEDIDAS DE GAS RADÓN EN VIVIENDAS Y PUESTOS DE TRABAJO EN ZONAS KÁRSTICAS

- 2.a.- Selección de localizaciones para las medidas
2. b.- Evolución temporal anual

2. c.- Intercomparación de métodos de medida de variables analizadas

Junto con los objetivos anteriores, en el proyecto se incluyó un tercer objetivo relativo a un análisis detallado de resultados que por su extensión no se incluye en este artículo y que puede encontrarse en la página web del Grupo Radón de la Universidad de Cantabria www.elradon.com.

Resultados

La Tabla 1 resume los distintos parámetros evaluados en el proyecto y el número de medidas fijadas inicialmente para este objetivo.

Al conjunto total de medidas recogidos en la tabla 1 hay que añadir las correspondientes a medidas de radón en viviendas y puestos de trabajo lo que hace que en su conjunto se hayan superado más de 3000 mediciones. La tabla 2 recoge un resumen de los valores medidos para todos los parámetros contemplados que incluye, para cada uno de ellos, el valor mínimo y máximo, así como la desviación estándar correspondiente.

| NÚMERO DE MEDICIONES TOTALES SEGÚN OBJETIVO 1: Caracterización de las zonas kársticas elegidas desde el punto de vista radiológico-geológico-estructural | | | | |
|--|-----------|--------|-----------|-------|
| OBJETIVO | Cantabria | Málaga | Castellón | TOTAL |
| 1.a Radiación y externa | 160 | 80 | 80 | 320 |
| 1.b Espectrometría y de suelos | 160 | 80 | 80 | 320 |
| 1.c Exhalación de 222Rn de los suelos | 160 | 80 | 80 | 320 |
| 1.d Permeabilidad | 160 | 80 | 80 | 320 |
| 1.e 222Rn en suelos | 160 | 80 | 80 | 320 |
| 1.f Caracterización geológico-estructural | - | - | - | - |
| 1.g Contenido de 222Rn en agua | 70 | 40 | 40 | 150 |
| | 870 | 440 | 440 | 1750 |

Tabla 1. Resumen del número y tipo de análisis realizados por cada entidad participante

| VARIABLE | ZONA KÁRSTICA | | |
|---|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | UC | UPV | UMA |
| RADÓN EN AIRE Concentración (Bq/m ³) | 122 (10-2090) SD: 256 | 113 (26-415) SD: 93 | 101 (29-869) SD: 93 |
| RADÓN EN SUELOS Concentración (KBq/m ³) | 45 (1-465) SD: 76 | 1 (0.2-2.5) SD: 0.5 | 4 (0.5-17.0) SD: 4.0 |
| GAMMA EXTERNA Tasa (nSv/h) | 68 (40-110) SD: 14 | 150 (30-240) SD: 40 | 128 (87-121) SD: 24 |
| GAMMA SUELOS 226Ra (Bq/kg) | 32 (4-84) SD: 11 | 28 (5-49) SD: 10 | 25 (8-70) SD: 12 |
| GAMMA SUELOS 232Th (Bq/kg) | 33 (4-54) SD: 10 | 33 (5-58) SD: 12 | 29 (10-47) SD: 7 |
| GAMMA SUELOS 40K (Bq/kg) | 307 (39-1302) SD: 176 | 493 (49-877) SD: 192 | 467 (154-789) SD: 150 |
| GAMMA SUELOS 137Cs (Bq/kg) | 5 (1-12) SD: 3 | 6 (2-10) SD: 7 | 3 (1-6) SD: 1 |
| EXHALACIÓN DE RADÓN (Bq/m ² .h) | 82 (40-240) SD: 70 | 21 (10-74) SD: 26 | 18 (5-68) SD: 14 |
| RADÓN EN AGUAS Concentración (Bq/l) | 7 (1-3) SD: 26 | 3 (1-9) SD: 10 | 6 (3-14) SD: 3 |
| PERMEABILIDAD (valor de k (m ²))*10 ⁻¹² VALOR 1 Baja(<4.10-13m ²) VALOR 2 Media (4.10-13m ² a 4.10-12m ²) VALOR 3 Alta(4.10-12m ²) | 1.5 (0.05-10.0) SD:2 | 2.0 (0.07-20.0) SD:3 | 3.0 (0.1-9.0) SD:3 |

Tabla 2. Resumen estadístico de las medidas de las variables estudiadas. Se muestran las medias aritméticas, rango de valores y desviación estándar (SD)

Es importante destacar que, en el marco del proyecto desarrollado, se ha llevado a cabo un ejercicio de intercomparación de métodos de medida de las variables analizadas. Una vez aprobada la concesión del proyecto por el CSN, se llevó a cabo una primera reunión presencial de coordinación en las instalaciones del Laboratorio de Radiación Natural, localizado en las instalaciones de ENUSA en Saelices el Chico (Salamanca) (figura 2). Se utilizaron dichas instalaciones para la medida de gas radón, radiación gamma externa empleando los dos «greens» o zonas con diferente relleno, certificados por el CIEMAT, y que proporcionan tasas de exposición estables de 100 y 1000 nGy/h. Igualmente se llevaron a cabo medidas utilizando los diferentes métodos empleados por las tres universidades participantes.

Conclusiones

- Tras todo el trabajo desarrollado durante este proyecto y a partir de los resultados obtenidos, podemos establecer las siguientes conclusiones:
- Por primera vez se dispone de una base de datos de caracterización de zonas kársticas desde un punto de vista integral, seleccionando zonas de Cantabria, Málaga y Castellón. En total se han realizado más de 3000 medidas, incluyendo radiación gamma externa, concentración de elementos radiactivos en los suelos, contenido de radón en el interior del suelo, permeabilidad, radón en aire y concentración de radón en aguas de consumo y fuentes públicas.
- Se ha puesto de manifiesto para cada uno de los parámetros ana-

lizados la diferencia notable que presentan si se comparan con los que aparecen recogidos en el mapa potencial de radón.

- El proyecto aporta resultados sobre parámetros que no han sido incluidos en el mencionado mapa potencial de radón, mostrando el interés de llevar a cabo este tipo de estudios a nivel local.

Los resultados encontrados para la concentración de radón en viviendas muestran que el porcentaje de las mismas que superan los 300 Bq/m³ es del mismo orden que el recogido a nivel nacional, razón por la que sería conveniente realizar nuevas campañas de medida extendidas a otras zonas kársticas no incluidas en este estudio. ■

Referencias

- CSN (2000). *Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural. Colección informes técnicos 5.2000*. Madrid: CSN.
- CSN (2014). *Estudio de la problemática existente en la determinación del índice de actividad alfa total en aguas potables. Colección Informes Técnicos 37.2014*. Madrid: CSN.
- Directiva 2013/59/Euratom, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 17 de enero de 2014.
- European Commission (1977). *Radiation Protection 88, Recommendation for the implementation of title VII of the European BSS Directiva concerning significant increase in exposure due to natural radioactive sources*. Luxembourg: European Commission.
- IAEA (1996). *Safety Series 115. International Basic Safety Standards for the protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*. Vienna: IAEA.
- Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes. *BOE*, 21 de diciembre de 2022.. ■

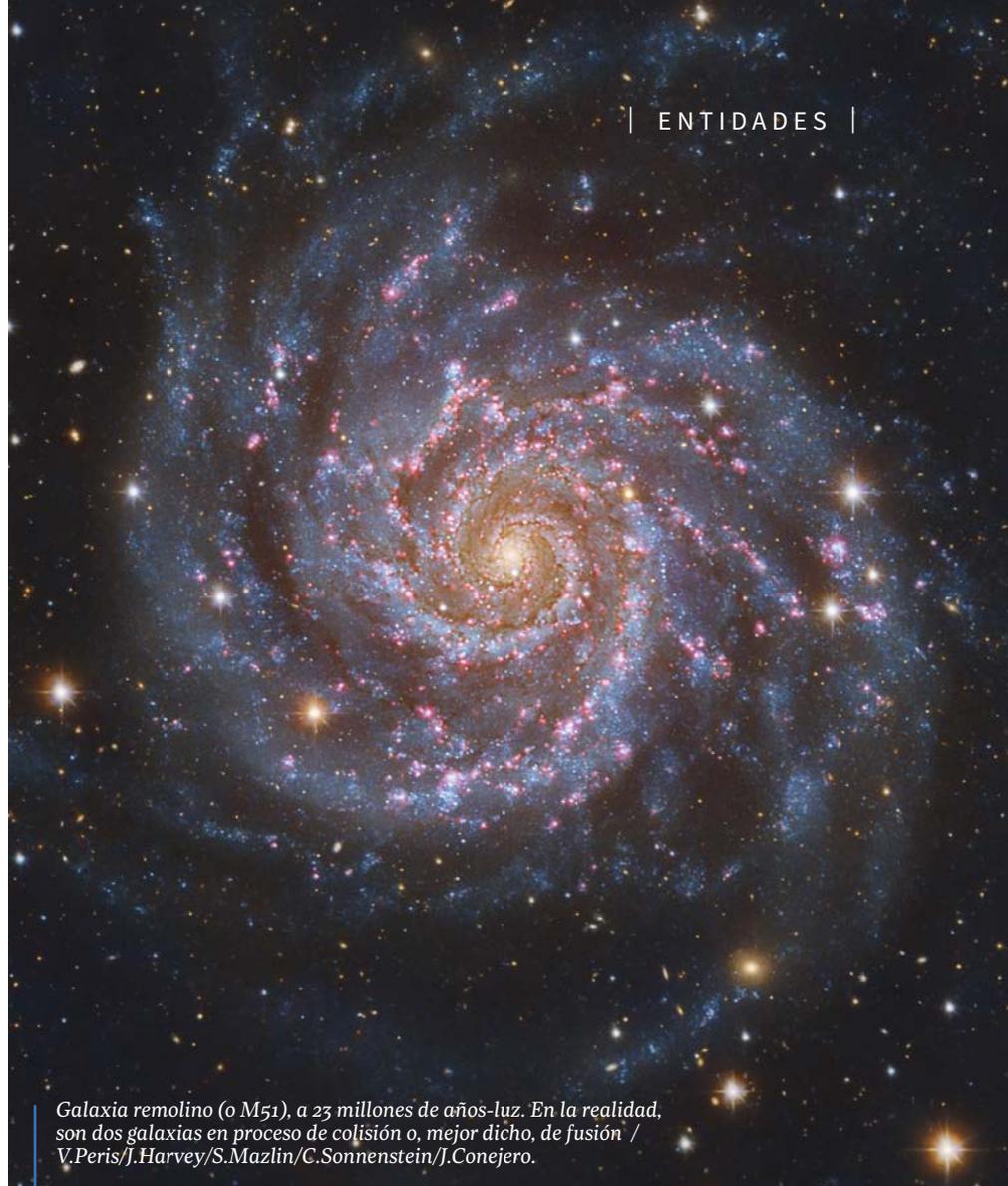
Observatorio Astronómico de Calar Alto (CAHA)

Cincuenta años como referente europeo
en astronomía óptica e infrarroja

■ Texto: **Pablo García** | Fotos: CAHA

El observatorio almeriense consolida su papel como infraestructura científica de referencia con proyectos internacionales, instrumentación avanzada y una firme apuesta por la excelencia y el futuro.





Galaxia remolino (o M51), a 23 millones de años-luz. En la realidad, son dos galaxias en proceso de colisión o, mejor dicho, de fusión / V.Peris/J.Harvey/S.Mazlin/C.Sonnenstein/J.Conejero.

El Observatorio Astronómico de Calar Alto o Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA), situado en la Sierra de los Filabres a más de dos mil metros de altitud, es una de las instalaciones de investigación científica en el ámbito de la astronomía óptica e infrarroja más relevantes de Europa. Desde su fundación oficial en 1975, ha pasado de ser un proyecto pionero en España a consolidarse como una Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS) al servicio de la comunidad científica internacional.

Su director, Jesús Aceituno, explica que «el objetivo principal de Calar Alto es ofrecer una infraestructura de primer nivel para la observación astronómica, garantizando la excelencia cien-

tífica, la innovación tecnológica y la sostenibilidad». Calar Alto centra su labor en el estudio de un amplio catálogo de fenómenos astronómicos: la formación y evolución de galaxias, la caracterización de exoplanetas, el análisis de cúmulos estelares y supernovas o la observación de asteroides cercanos.

Uno de los mayores logros de los últimos años ha sido el desarrollo del proyecto CARMENES (cuyas siglas en inglés responden a Búsqueda de alta resolución de planetas tipo Tierra alrededor de enanas M con espectrógrafos Échelle en el infrarrojo cercano y el visible del Observatorio de Calar Alto): un espectrógrafo doble –óptico e infrarrojo– de alta precisión, instalado en el telescopio de 3,5 metros. Diseñado



Nebulosa Iris (o NGC 7023), una zona de gas y polvo iluminada por reflexión de la luz de la joven estrella central/C. Blanco.

Colaboración Hispano-Alemana

Creado gracias a un acuerdo entre los gobiernos de España y Alemania, funcionó durante décadas como Centro Astronómico Hispano-Alemán, gestionado por el Max-Planck-Institut für Astronomie y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC). En 2019, tras la retirada del socio alemán y la incorporación de la Junta de Andalucía, pasó a denominarse Centro Astronómico Hispano en Andalucía (CAHA) y a tener gestión plenamente española. ■



y construido por un consorcio internacional liderado por España, ha permitido detectar más de sesenta exoplanetas, de los que unos quince presentan condiciones comparables a las de la Tierra en la zona de habitabilidad. Incluso se ha llegado a detectar oxígeno molecular en algunas de sus atmósferas.

El impacto del proyecto ha sido notable. El observatorio colabora actualmente con misiones espaciales de la Nasa y la ESA, como TESS, Kepler o el telescopio James Webb, que utilizan datos recopilados en Calar Alto para confirmar descubrimientos y descartar falsos positivos. Gracias a CARMENES, el centro se ha situado en primera línea internacional de la investigación de exoplanetas.

Infraestructura

El observatorio cuenta con dotación instrumental avanzada para cubrir una amplia gama de programas. El telescopio principal, de 3,5 m de diámetro, combina espectroscopía de alta resolución

y observaciones en el infrarrojo cercano, algo poco habitual en su rango que lo convierte en un instrumento versátil y competitivo en la investigación de frontera dentro del panorama europeo. A su alrededor operan otros telescopios que complementan su capacidad observacional:

- Telescopio de 2,2 m, idóneo para grandes programas de cartografiado y fotometría de precisión.
- Telescopio de 1,23 m, para seguimiento de objetos variables y eventos transitorios.
- Telescopio Schmidt, de 0,8/1,2 m, empleado en colaboración con la Agencia Espacial Europea para la detección y monitorización de objetos cercanos a la Tierra.

La labor de observación se complementa con tecnología auxiliar de alta precisión: los espectrógrafos permiten descomponer la luz estelar y analizar su composición y movimiento; las cámaras de gran campo capturan imágenes de alta resolución, y los

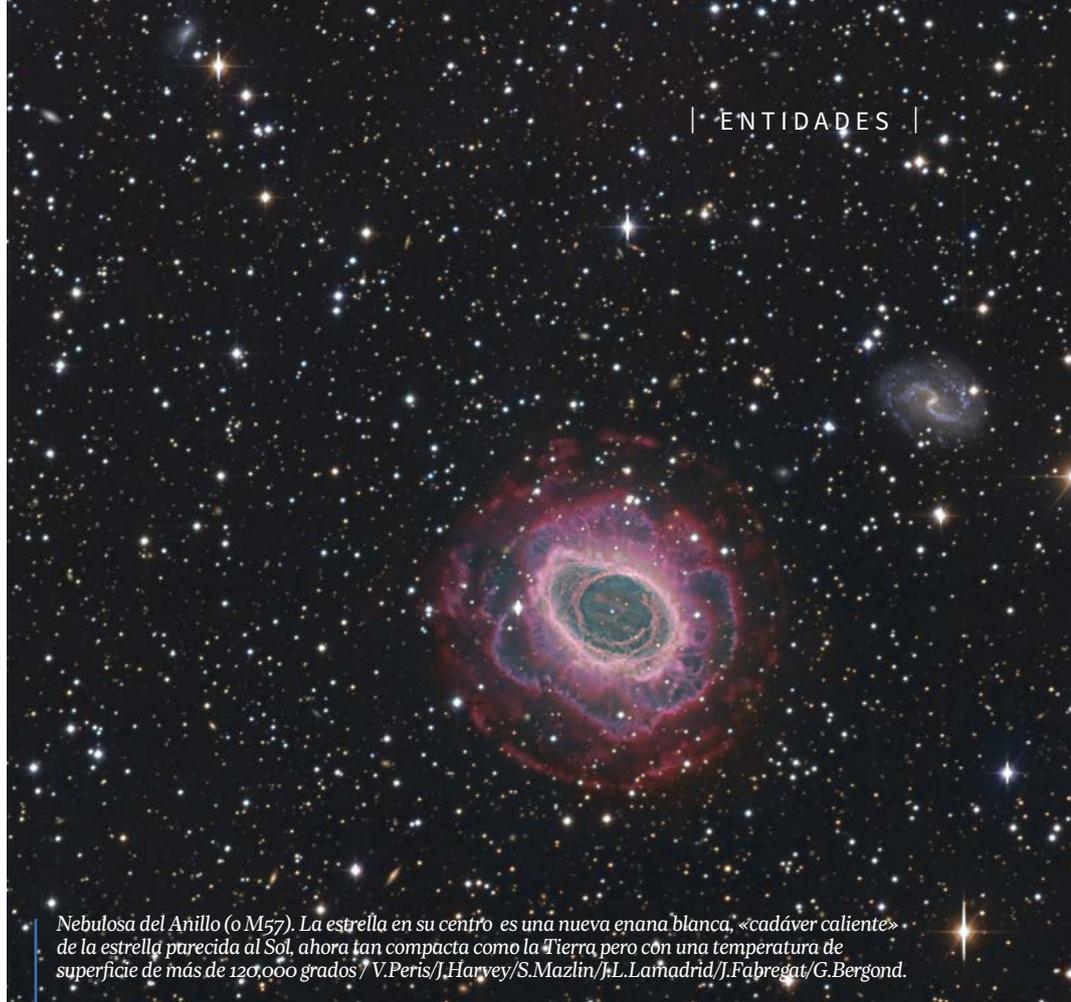
detectores de última generación reducen el ruido electrónico, lo que aumenta la sensibilidad y permite obtener resultados con precisión milimétrica.

Las imágenes y mediciones obtenidas en Calar Alto son resultado de un proceso técnico complejo. La luz de los objetos astronómicos se recoge mediante el espejo principal del telescopio, que la refleja y se registra en un detector CCD o infrarrojo. Posteriormente, los datos se calibran y procesan mediante software especializado que elimina imperfecciones y ajusta los niveles de brillo, dando lugar a la imagen final.

El observatorio utiliza programas y herramientas especializados como IRAF, MIDAS o Python, para transformar datos en información útil, científica o divulgativa: «La imagen científica contiene información en bruto, calibrada y medida con precisión, mientras que la divulgativa se compone a partir de esos datos, aplicando ajustes de color y contraste para resaltar estructu-



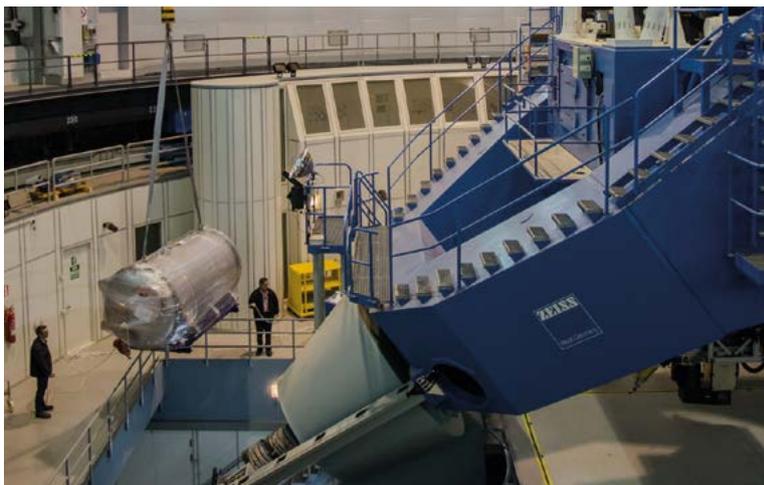
Tres ejemplos de contaminación lumínica en Calar Alto: Luz de vehículos reflejada en las cúpulas, nubes bajas y un halo luminoso proveniente de poblaciones circundantes / Harun Mehmedinovic.



Nebulosa del Anillo (o M57). La estrella en su centro es una nueva enana blanca, «cadáver caliente» de la estrella parecida al Sol, ahora tan compacta como la Tierra pero con una temperatura de superficie de más de 120.000 grados / V.Peris/J.Harvey/S.Mazlin/J.L.Lamadrid/J.Fabregat/G.Bergond.

Enanas M

Las enanas M, o enanas rojas, son las estrellas más abundantes de la galaxia, tienen temperaturas entre 2400 y 3700 K y una vida que puede durar billones de años. Su baja luminosidad sitúa la zona habitable –donde podría existir agua líquida– muy cerca de la estrella. Por eso, los planetas (tipo M) que las orbitan son ideales para buscar mundos potencialmente habitables. Instrumentos como CARMENES se centran en detectar y estudiar estos sistemas, que representan el entorno más prometedor para hallar planetas similares al nuestro. ■



ras o fenómenos. En esencia, la imagen divulgativa busca transmitir belleza y comprensión, sin alterar la veracidad científica del contenido», explica el director del observatorio.

Otro aspecto singular es la ubicación de las instalaciones. Su altitud, a 2168 m en plena Sierra de los Filabres, ofrece condiciones excepcionales de observación gracias a su estabilidad atmosférica y la baja contaminación lumínica. Sin embargo, plantea desafíos logísticos: está situado bajo la capa de inversión térmica, la zona que separa el aire frío del cálido superior. Esto implica que sufre fenómenos meteorológicos locales, como nubes o precipitaciones, especialmente en invierno. Aún así, su ubicación supone una ventaja frente a otros observatorios, ya que queda protegido de fenómenos como la calima, que sí afecta con frecuencia a los telescopios situados por encima de esa capa, como los de Canarias. El centro colabora activamente con las distintas administraciones para protegerlo de



Una nebulosa planetaria (PK164+31.1) cercana pero difusa, bien visible en largas exposiciones / V.Peris/J.Harvey.



Galaxia irregular M82 o «Galaxia del Cigarro» / César Blanco.

la contaminación lumínica y garantizar un recurso científico de alto estándar. Además, la gestión ambiental y la sostenibilidad energética son líneas de trabajo cada vez más presentes en la agenda del observatorio.

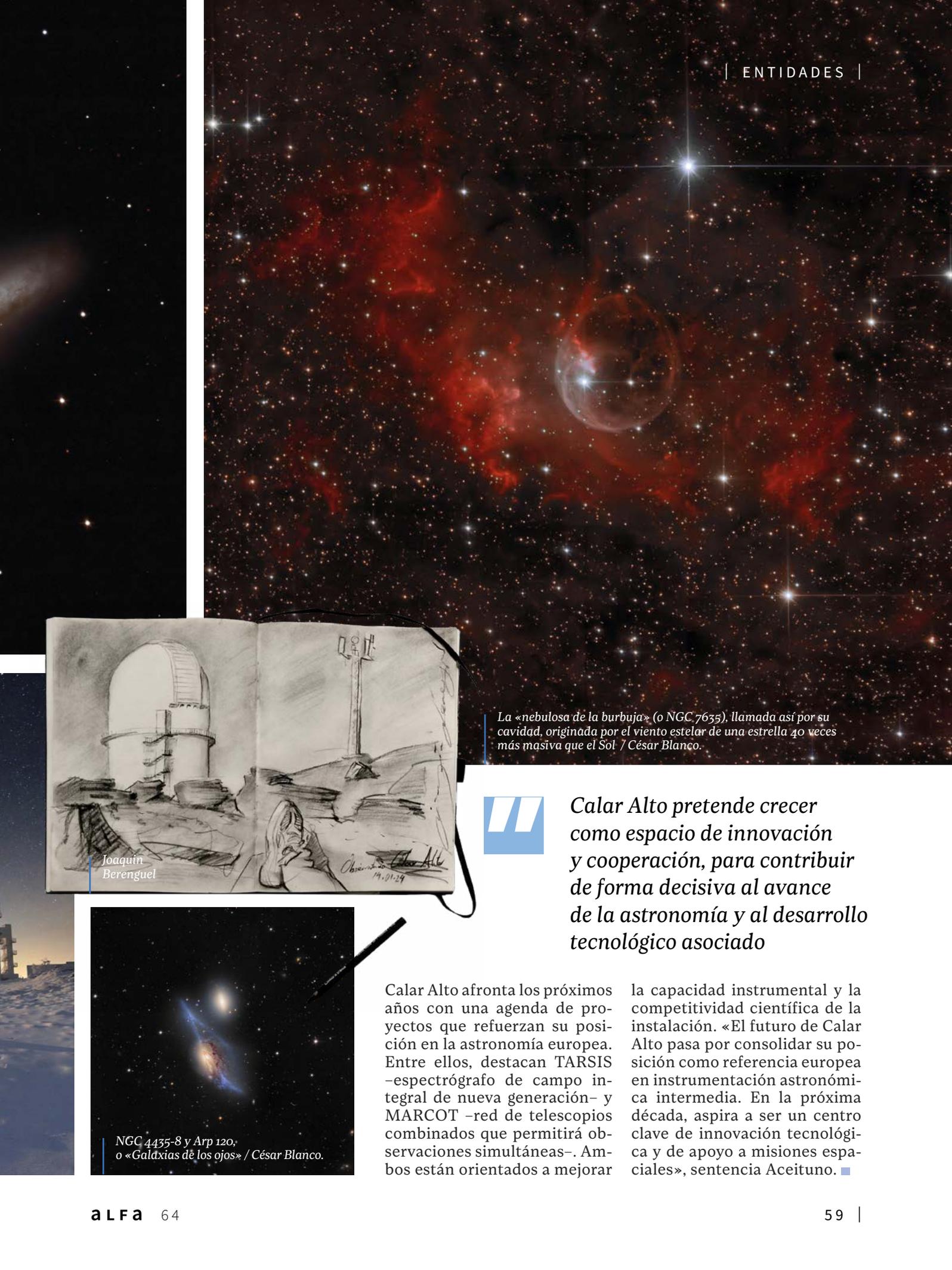
Gestión de datos y nuevas tecnologías

Cada noche se generan grandes volúmenes de información que precisan gestión y almacenamiento eficientes. Para ello, dispone de servidores de alta capacidad, sistemas automatizados de clasificación y respaldo de datos. El equipo trabaja en una integración progresiva del uso de inteligencia artificial y análisis masivo de datos con el fin de clasificar objetos, filtrar observaciones y optimizar tiempos de análisis.

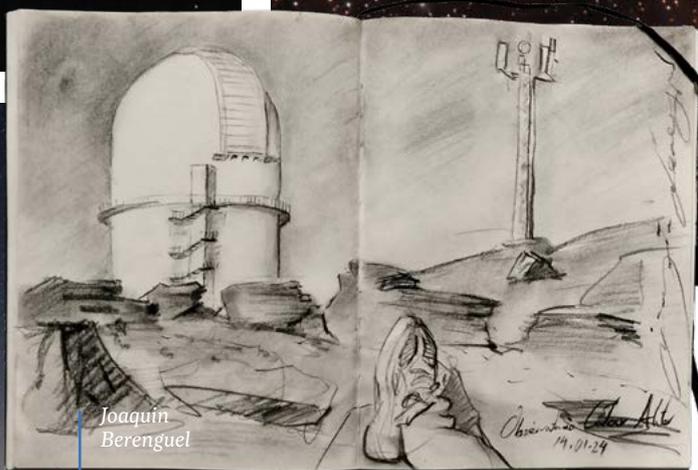
Una parte importante del trabajo del observatorio se basa en la ciencia abierta: «Los datos científicos del observatorio se publican tras un periodo de embargo y son accesibles a través del Archivo Público de Calar Alto. Además, participamos con redes internacionales de datos abiertos que permiten a investigadores de todo el mundo acceder a la información obtenida desde nuestros telescopios», señala Aceituno. En este sentido, el observatorio mantiene una amplia red de colaboraciones internacionales con agencias espaciales, universidades y otros centros de investigación. La interoperabilidad de datos permite combinar observaciones de diferente instrumental y obtener resultados más completos y precisos.



Crepúsculo sobre Calar Alto.



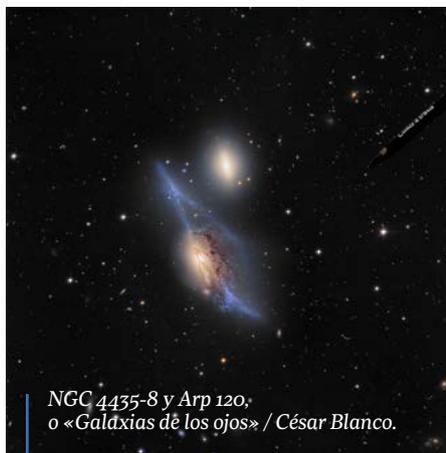
La «nebulosa de la burbuja» (o NGC.7635), llamada así por su cavidad, originada por el viento estelar de una estrella 40 veces más masiva que el Sol / César Blanco.



Joaquín Berenguel



Calar Alto pretende crecer como espacio de innovación y cooperación, para contribuir de forma decisiva al avance de la astronomía y al desarrollo tecnológico asociado



NGC 4435-8 y Arp 120, o «Galaxias de los ojos» / César Blanco.

Calar Alto afronta los próximos años con una agenda de proyectos que refuerzan su posición en la astronomía europea. Entre ellos, destacan TARSIS –espectrógrafo de campo integral de nueva generación– y MARCOT –red de telescopios combinados que permitirá observaciones simultáneas–. Ambos están orientados a mejorar

la capacidad instrumental y la competitividad científica de la instalación. «El futuro de Calar Alto pasa por consolidar su posición como referencia europea en instrumentación astronómica intermedia. En la próxima década, aspira a ser un centro clave de innovación tecnológica y de apoyo a misiones espaciales», sentencia Aceituno. ■



Rosalind Franklin: la arquitecta olvidada del ADN

Rosalind Franklin se suma a la nómina de científicas a quienes la historia no les hizo justicia en vida. Su maestría en la cristalografía de rayos X fue decisiva para desentrañar la estructura de doble hélice del ADN, piedra angular de la biología molecular moderna. También sus investigaciones sobre la arquitectura de los virus ampliaron el conocimiento de la materia viva hasta el nivel atómico. Murió demasiado pronto, a los 37 años, sin saber que sus cálculos e imágenes habían sido esenciales para uno de los descubrimientos más trascendentes del siglo XX.

■ Texto: Ana Fernández

Rosalind Elsie Franklin nació en Londres en 1920 en un contexto familiar e histórico particular: hija de una familia acomodada judía y en una Inglaterra de entreguerras. Creció en un entorno intelectual que estimuló su curiosidad en contra de lo que los dictámenes sociales de la época señalaban para una mujer de su posición. A pesar del apoyo y aperturismo del que gozaba su familia, su padre, Ellis Franklin,

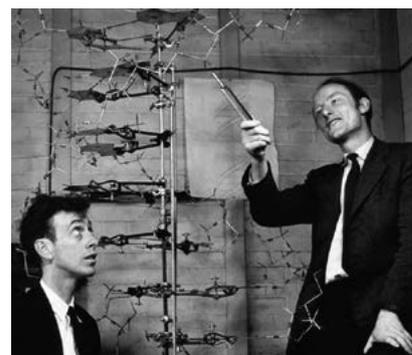
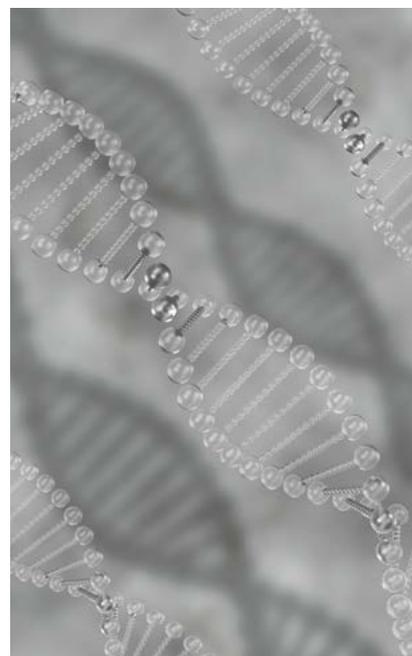
trató de persuadirla para alejarse de la ciencia, una disciplina aún muy masculinizada.

Como muestra de su tenacidad, estudió Ciencias Naturales en el *Newnham College* de la Universidad de Cambridge, donde descubrió su vocación por la investigación experimental. Tras graduarse en 1941, en pleno conflicto, consiguió una beca de investigación en el laboratorio de fisicoquímica de la universidad

para trabajar, bajo supervisión de Ronald George Wreyford Norrish (Nobel de Química en 1967), en la determinación de la estructura del carbono. Su objetivo era entender por qué algunos isótopos del carbono resultaban más permeables que otros a gases, agua o disolventes y cómo distintos factores, como la temperatura o el tratamiento térmico, modificaban su comportamiento físico. Presentó su estudio como su tesis



La científica británica Rosalind Franklin, trabajando con un microscopio.



Watson y Crick junto al modelo de ADN que propusieron en su artículo de la revista Nature y que dedujeron gracias a la investigación de Franklin

doctoral en 1945 bajo el título *The physical chemistry of solid organic colloids with special reference to coal and related materials*.

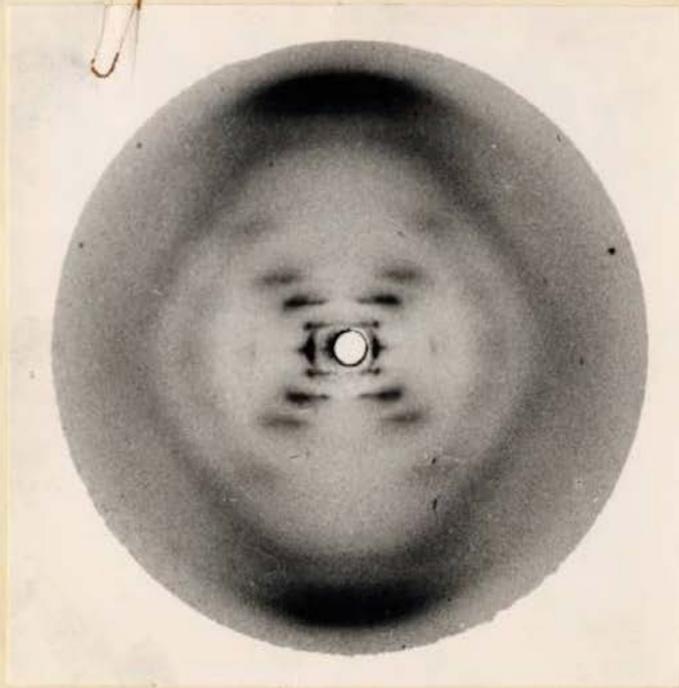
En 1947, alentada por Adrienne Weill, una científica francesa refugiada de la Segunda Guerra Mundial, Franklin decidió trasladarse a Francia para explorar una nueva sociedad y un ámbito laboral más abierto y libre para las mujeres. En el *Laboratoire Central des Services Chimiques de l'État*, bajo la tutela de Jacques Mering, perfeccionó la técnica que marcaría su carrera: la cristalografía de rayos X, método que permite deducir la disposición tridimensional de los átomos a partir del patrón de difracción que

produce un haz de rayos X al atravesar una muestra ordenada.

La carrera por la estructura del ADN

De regreso a Inglaterra, en 1951, Rosalind Franklin se incorporó al King's College de Londres para aplicar su dominio de la técnica de difracción al estudio de biomoléculas. Su contrato inicial contemplaba la investigación de proteínas, pero el director de la unidad, John Randall, le asignó un nuevo objetivo: determinar la estructura del ADN junto a Maurice Wilkins y el estudiante Raymond Gosling. Franklin aceptó el reto sin saber que, en Cambridge, James Watson y Francis Crick perseguían el mismo propósito.

Desde su llegada, tuvo que enfrentarse a un entorno complejo. Wilkins interpretó erróneamente que ella ocuparía un puesto subordinado, y el malentendido inicial generó una tensión que marcaría su relación profesional. Aun así, Franklin centró sus esfuerzos en perfeccionar la difracción de rayos X aplicada a fibras de ADN, optimizando la alineación de las muestras y controlando su grado de hidratación. Gracias a esa precisión experimental, identificó dos configuraciones estructurales –la forma A, más seca y compacta, y la forma B, más hidratada y biológicamente relevante– y obtuvo patrones con una nitidez sin precedentes.



Franklin &
Gosling
F.D. & M. Crick
Type I

Plate 1



Fotografía 51 de Rosalind Franklin

El ADN antes y después de la doble hélice

El ácido desoxirribonucleico (ADN) fue aislado por primera vez en 1869 por Friedrich Miescher, pero su función fue objeto de debate durante décadas. Muchos biólogos consideraban que la información hereditaria debía residir en las proteínas, por su diversidad estructural, y no en el ADN, al que se veía como un polímero demasiado simple. Solo en 1944, con los experimentos de Oswald Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty, se demostró que el ADN era el portador del material genético en las bacterias, aunque su estructura seguía siendo un misterio.

La molécula de ADN está formada por nucleótidos, cada uno compuesto por tres elementos:

- Un grupo fosfato.
- Un azúcar de cinco carbonos (desoxirribosa).
- Una base nitrogenada de cuatro tipos: adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C).

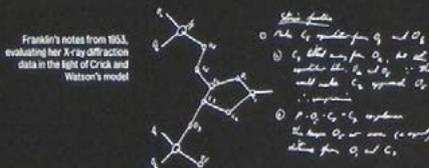
En aquella época, se conocían los componentes químicos, pero no su disposición espacial ni el modo en que almacenaban información. Los trabajos de Erwin Chargaff en 1950 habían revelado una pista decisiva: en cualquier ADN, la cantidad de adenina es igual a la de timina, y la de guanina igual a la de citosina: información decisiva en el planteamiento de Watson y Crick.

El descubrimiento de la estructura de doble hélice en 1953 transformó el panorama. La imagen helicoidal obtenida por Franklin y su deducción de dos cadenas opuestas permitieron entender que el ADN podía replicarse con exactitud, ya que cada hebra servía de molde para formar su complementaria. A partir de entonces, el ADN dejó de ser una sustancia química más para convertirse en el soporte físico de la información genética, el código con el que la vida se copia y evoluciona. ■

Mientras tanto, los equipos de Londres y Cambridge avanzaban por caminos distintos. Franklin se apoyaba en datos empíricos y análisis matemático para calcular parámetros helicoidales. Watson y Crick, en cambio, adoptaban un enfoque teórico y modelístico, a través de la construcción de maquetas moleculares con conjeturas geométricas. El contraste se reflejaba también en el ritmo: mientras Franklin y Gosling mejoraban la calidad de sus imágenes –hasta obtener la célebre Fotografía 51–, en Cambridge, los modelos se sucedían con correcciones constantes.

Fotografía 51: inflexión en la historia del ADN

Primavera de 1952 en el King's College de Londres. El meticuloso trabajo dirigido por Rosalind Franklin cristalizó en la Fotografía 51. Utilizó una fibra muy hidratada de ADN y, cuidadosamente orientada, la expuso durante más de sesenta horas a un haz de rayos X colimado. El patrón de difracción, registrado en una placa fotográfica, mostraba una figura en forma de X con bandas horizontales regulares: la firma geométrica de una hélice.



Notas de Franklin de 1953, evaluando sus datos de difracción de rayos X a la luz del modelo de Crick y Watson

En enero de 1953, sin su consentimiento expreso, Maurice Wilkins mostró la imagen a James Watson, que reconoció al instante la geometría helicoidal que buscaban. Gracias a este descubrimiento, James Watson y Francis Crick construyeron el modelo correcto del ADN.

El 25 de abril de 1953, la revista *Nature* publicó tres artículos consecutivos sobre el ADN: el primero, firmado por Watson y Crick, proponía el modelo teórico de la doble hélice; los dos siguientes, de Franklin y Gosling y de Wilkins, presentaban los datos experimentales en el que se sustentaba.

Franklin describía con precisión los parámetros espaciales obtenidos por difracción de rayos X –el paso helicoidal, el diámetro y la repetición axial–, pero, fiel a su prudencia científica, evitó formular una interpretación estructural definitiva. Así, la fotografía obtenida en silencio y con paciencia se convirtió en una de las más influyentes de la historia de la ciencia: la primera mirada directa a la estructura que codifica la vida.

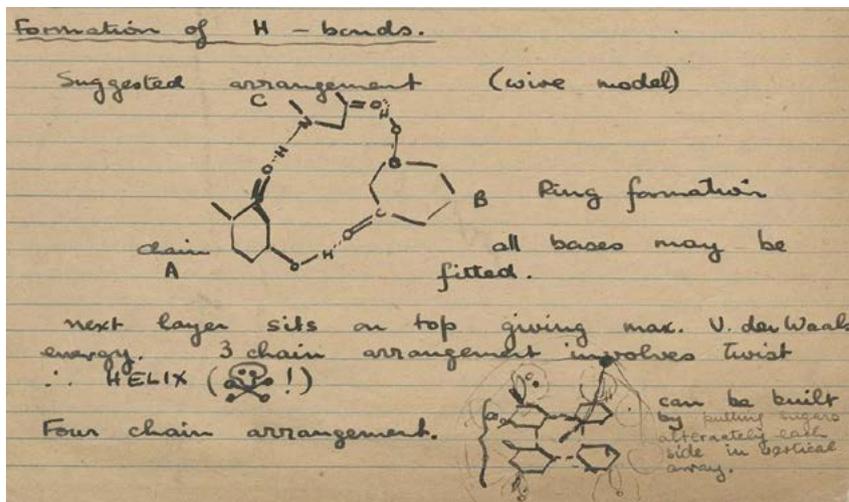
Nueve años después, en 1962, el Premio Nobel de Medicina fue concedido a Watson, Crick y Wilkins «por sus descubrimientos relativos a la

estructura molecular de los ácidos nucleicos y su importancia para la transferencia de información en la materia viva». Rosalind Franklin había muerto cuatro años antes, sin saborear un premio cuyas normas impiden concederlo a título póstumo. La historia de la doble hélice quedó así escrita con tres nombres visibles y uno ausente. Los avances actuales en genómica estructural y biología

computacional continúan aprovechando las bases sentadas por la cristalografía aplicada por Franklin.

Última etapa: del ADN a los virus

Tras dejar el King's College en 1953, Rosalind Franklin se incorporó al Birkbeck College de Londres para trabajar con el cristalógrafo John Desmond Bernal, pionero en aplicar la física al estudio de la biología.



"Disposición de 3 cadenas implica un giro [por lo tanto]; UNA HÉLICE!" El momento en que Franklin anotó por primera vez su revolucionario descubrimiento



Un rover es un vehículo robótico diseñado para desplazarse sobre la superficie de un planeta o satélite. Está equipado con instrumentos científicos que permiten analizar el terreno, la atmósfera y las muestras de roca o suelo. El rover europeo *Rosalind Franklin* forma parte del programa ExoMars de la Agencia Espacial Europea (ESA) y tiene como objetivo explorar Marte en busca de indicios de vida pasada.

Allí encontró un entorno más colaborativo y libre de las tensiones jerárquicas que habían marcado su trabajo anterior. Su nueva línea de investigación se centró en estructuras víricas, donde volvió a aplicar su técnica de rayos X.

El virus del mosaico del tabaco era entonces el modelo preferido para estudiar la organización molecular de los virus. Franklin aplicó la difracción de rayos X –técnica que había perfeccionado con el ADN– para analizar fibras de TMV cristalizadas y determinar su arquitectura helicoidal. De este modo, demostró que el TMV estaba formado por una cubierta proteica dispuesta en espiral alrededor de un eje central que contenía una única cadena de ARN.

El equipo de Franklin, que incluía al joven biofísico Aaron Klug, perfeccionó los métodos de reconstrucción a partir de datos de difracción y generó modelos tridimensionales de una precisión inédita. Décadas más tarde,

Klug recibió el Nobel de Química (1982) por desarrollar las técnicas de microscopía electrónica cristalográfica y reconstrucción tridimensional que nacieron de aquella colaboración.

En los últimos años de su vida, Franklin extendió su conocimiento de los virus al estudio de agentes humanos, como la poliomielitis. Aunque la enfermedad le impidió concluir los experimentos, dejó protocolos y datos preliminares que su equipo desarrolló tras su muerte.

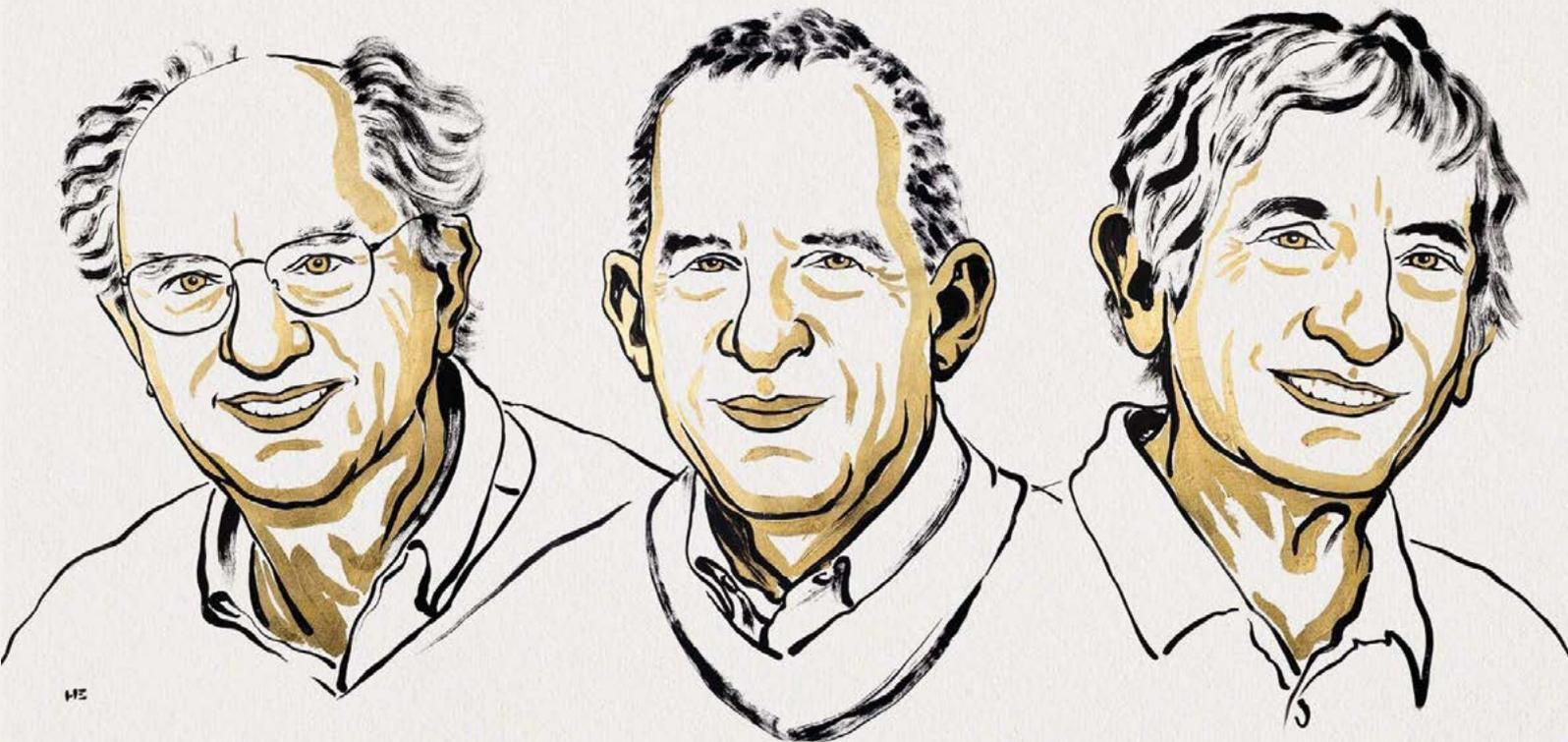
Legado tardío

Rosalind Franklin apenas recibió reconocimiento público en vida. Sus artículos sobre la estructura del ADN aparecieron en la revista *Nature*, pero su nombre permaneció prácticamente ausente del discurso científico más allá del entorno académico. Su muerte prematura, en 1958, la dejó fuera del debate científico y del Nobel de Fisiología o Medicina de 1962. Du-

rante casi dos décadas, su papel en el descubrimiento de la doble hélice permaneció en segundo plano.

El proceso de restitución comenzó lentamente en los años setenta, impulsado por publicaciones como *Rosalind Franklin and DNA* (Anne Sayre, 1975), que cuestionaba la narrativa oficial del descubrimiento. Más de medio siglo después, su nombre se asocia a la exploración y al conocimiento de la materia viva.

En su lápida, situada en el cementerio de la sinagoga de Willesden (Londres), se lee la inscripción: «Científica. Su investigación y descubrimiento en los virus siguen siendo de beneficio para la humanidad». Murió sin el reconocimiento que le correspondía, pero la historia le ha devuelto *in memoriam* el lugar que le fue negado. Hoy, su legado se honra con instituciones, becas e incluso con el nombre del rover europeo *Rosalind Franklin*, destinado a la exploración de Marte. ■



La frontera cuántica se vuelve tangible

El Premio Nobel de Física 2025 reconoce a John Clarke, Michel H. Devoret y John M. Martinis por un descubrimiento que transforma la comprensión de los límites entre lo clásico y lo cuántico. En la década de los ochenta, los tres científicos lograron que un conjunto de electrones actuara como una sola entidad coherente, demostrando que los

efectos cuánticos pueden manifestarse en sistemas macroscópicos bajo condiciones de superconductividad. Mediante el estudio de circuitos eléctricos superconductores, consiguieron controlar y medir fenómenos como el túnel cuántico macroscópico y la cuantización discreta de la energía, tendiendo un puente entre el mundo visible y el subatómico. Su trabajo

sentó las bases de la computación cuántica moderna, una disciplina que redefine los límites del conocimiento y la información. Más que un logro técnico, su descubrimiento supone una revolución conceptual: revela que las leyes del universo microscópico gobiernan también la materia tangible, desdibujando la línea entre lo visible y lo invisible. ■

Descubren la segunda «luna» de la Tierra

La NASA ha confirmado la existencia de un pequeño cuerpo celeste que acompaña a la Tierra en su órbita alrededor del Sol. Se trata de 2025 PN7, una roca de apenas unas decenas de metros de diámetro que se desplaza casi al mismo ritmo que el planeta terrestre y permanecerá en esta posición hasta 2083. Aunque no es una luna en sentido estricto, su comportamiento la convierte en una cuasiluna o cuasisatélite, categoría reserva-

da a los objetos que comparten la órbita terrestre sin quedar atrapados por su gravedad. El cuerpo fue identificado por astrónomos de la Universidad de Hawái, pese a haber viajado junto a nosotros durante seis décadas sin ser detectado. Los expertos aseguran que no existe riesgo de colisión y que este fenómeno, aunque inusual, es estable y natural dentro del delicado equilibrio gravitatorio del sistema solar. ■



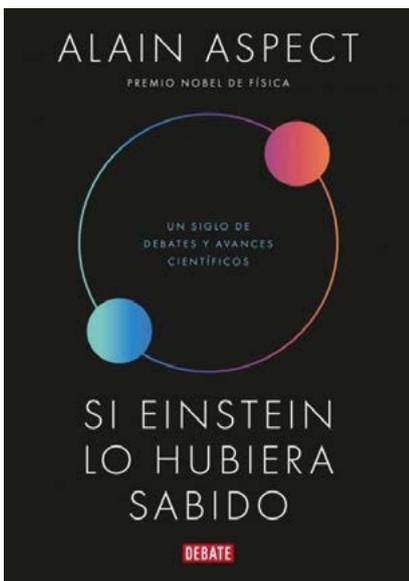


Cincuenta años del Programa Hidrológico Intergubernamental de la UNESCO

Se cumple medio siglo del Programa Hidrológico Intergubernamental (IHP) de la UNESCO, el único marco de cooperación científica a escala mundial dedicado por completo al estudio y la gestión sostenible del agua. Fundado en 1975, el IHP ha sido esencial para promover la investigación en hidrología, el desarrollo de tecnologías limpias y la educación ambiental en más de ciento setenta países. Durante estas cinco décadas, su labor ha evolucionado desde el análisis de los recursos hídricos hacia un enfoque interdisciplinar que integra agua, energía, alimentación y ecosistemas bajo el conocido *nexo WEF*. En las diversas conmemoraciones desarrolladas durante 2025, expertos internacionales revisaron los avances logrados y los desafíos futuros: la escasez de agua dulce, los efectos del cambio climático y la necesidad de una



gobernanza más equitativa. Con veintinueve centros asociados y decenas de cátedras en todo el mundo, el IHP celebra su 50 aniversario reafirmando el papel del conocimiento científico como herramienta esencial para preservar uno de los recursos más valiosos del planeta. ■



Si Einstein lo hubiera sabido

El Nobel de Física Alain Aspect conduce al lector por un siglo de debates que transformaron la comprensión del universo. Desde los orígenes de la teoría cuántica con Max Planck, pasando por las célebres controversias entre Einstein y Bohr, hasta las formulaciones de John Stewart Bell, el autor entrelaza historia, pensamiento y experimentación para mostrar cómo la ciencia actual reinterpreta el legado cuántico. En estas páginas, Aspect revisita los experimentos sobre entrelazamiento cuántico que le valieron el Premio Nobel de 2022, y que desafiaron la visión determinista de Einstein. Con un tono divulgativo y una precisión conceptual admirable, el ensayo se erige en una obra de referencia para quienes buscan comprender no solo el «qué» de la física, sino también el «cómo» y el «porqué» de sus revoluciones intelectuales. ■

Aspect, A. (2025)
Si Einstein lo hubiera sabido
Editorial Debate, 400 pp.



EN RED

Nuevas evidencias de vida en las Marianas

Un estudio reciente documentó una biosfera microbiana profunda alojada en los volcanes de lodo serpentinitico del antearco de las Marianas, sostenida por hidrógeno y metano de origen abiótico generados durante la serpentinización del manto. Los biomarcadores lipídicos evidencian una transición desde una metanogénesis hidrogenotrófica inicial hacia la oxidación anaerobia del metano acoplada a la reducción de sulfato, respaldada por fuertes depleciones en ¹³C. Las membranas muestran adaptaciones extremófilas —éteres insaturados, GDGT acíclicos y glicolípidos— que permiten enfrentar un pH hiperalcalino y la escasez de nutrientes, mientras la presen-



cia de GDGT ramificados apunta a bacterias aún no caracterizadas. En conjunto, este sistema confirma que la vida puede persistir con biomasa mínima y energía exigua, constituyendo un modelo valioso para la habitabilidad del subsuelo terrestre y de otros mundos. ■

Más información: <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02667-6>



Terapia génica contra la inmunodeficiencia infantil

El *New England Journal of Medicine* ha publicado un estudio internacional que marca un antes y un después en la historia de la medicina genética. Investigadores del Great Ormond Street Hospital, la University College London y la Universidad de California en Los Ángeles han demostrado que una terapia génica basada en un vector lentiviral —una versión modificada e inofensiva del virus VIH— puede restaurar el sistema inmunitario de niños con inmunodeficiencia combinada grave por déficit de adenosina desaminasa (ADA-SCID), una enfermedad que condena a los pacientes a vivir

aislados y sometidos a tratamientos paliativos de por vida. Durante más de siete años de seguimiento, 59 de los 62 pacientes tratados recuperaron una función inmunitaria normal y estable, con una supervivencia del 100 % y sin efectos adversos graves. El procedimiento consiste en modificar células madre hematopoyéticas del propio paciente para incorporar una copia funcional del gen *ADA*, evitando así la necesidad de un trasplante de médula ósea. El éxito es doble: la terapia ha demostrado eficacia tanto con células frescas como criopreservadas, lo que facilitará su implementación global. Este avance abre la puerta a tratamientos personalizados para otras inmunodeficiencias hereditarias y consolida la madurez de la ingeniería genética como medicina curativa y motor de esperanza clínica. ■

Más información: *Long-Term Safety and Efficacy of Gene Therapy for Adenosine Deaminase Deficiency* | *New England Journal of Medicine*



REDES



Cosas Que Sabemos

El periodista y divulgador Mauricio José Schwarz ofrece en este canal cápsulas de divulgación científica que combinan historia del conocimiento, perfiles destacados de la ciencia y el impacto de sus ideas en la sociedad. Con un formato breve y accesible (alrededor de siete minutos por episodio), convierte el conocimiento en un ejercicio crítico, riguroso y ameno.



Hablemos de Neurociencias, Psicología y Salud Mental

Este grupo público con casi sesenta mil miembros está creado para quienes sienten fascinación por el funcionamiento de la mente, el comportamiento humano y las neurociencias. Se comparten artículos de investigación, noticias, consejos prácticos y debates sobre psicología, salud mental y últimos avances científicos. Ideal para profesionales e interesados que desean aproximarse con rigor y curiosidad a los entresijos de la ciencia y del pensamiento humano.



@BigVanCiencia

Colectivo de científicos y comunicadores que convierte la investigación en espectáculo y humor inteligente. A través de charlas, vídeos y publicaciones en redes, traducen conceptos complejos de física, biología, matemáticas o química en historias accesibles y divertidas. Su lema podría resumirse como «ciencia con risas y rigor», y su comunidad en esta red social refleja el éxito de un formato que acerca la curiosidad científica a todos los públicos.



@laura_egiptologia

Laura Huertas es egiptóloga y arqueóloga que traslada con precisión y entusiasmo el fascinante mundo del antiguo Egipto a las redes sociales. A través de su perfil, comparte hallazgos arqueológicos, detalles de jeroglíficos, mitología y vida cotidiana faraónica con una narrativa accesible y visualmente atractiva. Su misión: acercar esta civilización milenaria al público hispanohablante, combatiendo mitos y despertando curiosidad.



@todoesrelativo_

Sergio Guerra convierte la astronomía y la física en un espectáculo fascinante para los más de un millón de seguidores que siguen su perfil. Desmonta mitos y aprovecha cada vídeo para despertar curiosidad por el universo, desde la Tierra hasta el Big Bang. Con estilo directo, visual y riguroso, invita a indagar más allá del simple clic, y recuerda que la ciencia es, ante todo, la capacidad de dudar y preguntarse.

Petición de informe preceptivo sobre la prórroga de explotación de Almaraz



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) recibió del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) la petición de informe preceptivo sobre la solicitud de modificación de la autorización de explotación de la central nuclear Almaraz, que afecta a ambas unidades. El pasado 30 de octubre, el titular de la instalación solicitó al Ministerio modificar la autorización de explotación para permitir la operación de ambas unidades hasta el 8 de junio de 2030, y dicha solicitud fue trasladada al CSN para la emisión del correspondiente informe preceptivo. El Consejo responderá a la petición, de acuerdo con la normativa y procedimientos vigentes.

Una vez que el regulador apruebe el informe preceptivo asociado a la solicitud, este será remitido al Ministerio. Con esta información, el MITERD podrá tomar una decisión informada sobre la continuidad de la explotación de la instalación.

La Ley de creación del CSN establece que es el organismo regulador quien debe emitir informes al MITERD relativos a la seguridad nuclear, protección radiológica y protección física, previos a las resoluciones que dicho ministerio adopte en materia de concesión de autorizaciones para las instalaciones nucleares. Dichos informes, que son de carácter preceptivo, son además vinculantes –en caso de ser negativo–, o estableciendo los límites y condiciones necesarios. ■



El CSN aborda la coordinación en emergencias con delegaciones del Gobierno

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebró en noviembre un encuentro en su sede con los titulares de las delegaciones y subdelegaciones del Gobierno de las provincias con centrales nucleares para abordar la coordinación en la gestión de emergencias. A la reunión asistieron los representantes del Gobierno en Castilla y León, Extremadura y País Vasco; las subdelegaciones en Burgos, Cáceres, Guadalajara, Tarragona y Valencia, así como de la delegación del Gobierno en Cataluña. Los participantes reconocieron la utilidad de la jornada y manifestaron la importancia de mantener una coordinación ágil con el regulador y otras autoridades como el 112 o la Dirección General de Protección Civil y Emergencias.

Durante la visita a la Sala de Emergencias (SALEM), el subdirector de emergencias del CSN, Javier Ramón, expuso el papel del regulador en estas situaciones, explicando los procedimientos vigentes y la intensa colaboración que la institución mantiene con otras entidades involucradas como las fuerzas y cuerpos de seguridad del Estado, la Unidad Militar de Emergencias, el Ministerio del Interior o Cruz Roja.

La jornada continuó en la sede de la Dirección General de Protección Civil y Emergencias donde les recibió su directora general, Virginia Barcones, abordaron los planes de emergencia nuclear y visitaron el Centro Nacional de Seguimiento y Coordinación de Emergencias (CENEM). ■

El CSN lamenta el fallecimiento de Donato Fuejo, expresidente del organismo regulador

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear lamenta el fallecimiento de Donato Fuejo Lago, expresidente del CSN entre 1987 y 1994. Antes de ocupar la presidencia, fue nombrado consejero del organismo en octubre de 1984 y, en mayo de 1985, vicepresidente durante la presidencia de Francisco Pascual. Nacido en Vigo, fue doctor en Medicina especializado en pulmón y corazón. Asumió la presidencia del CSN en



octubre de 1987, ocupando así la segunda presidencia del organismo regulador desde su creación en 1980. DEP.

El CSN abre su Plan Estratégico a la participación del Comité Asesor



El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebró el 20 de noviembre la 30.ª reunión de su Comité Asesor para la información y participación pública. En el transcurso de la reunión, los representantes del CSN recordaron que catorce de las quince recomendaciones realizadas por el Comité Asesor (el 93,3 %) desde su creación han sido resueltas.

El actual Plan Estratégico de la institución detalla cómo el consejo debe cumplir con su misión, estableciendo los objetivos a alcanzar, los medios para lograrlos y la manera de evaluar su cumplimiento. Más allá de la cultura de seguridad como eje de actuación del CSN, existen otros objetivos supeditados a este como son la credibilidad, la eficacia, la eficiencia y la independencia del organismo.

Dentro del orden del día, la subdirección de Protección Radiológica Operacional presentó el trabajo del Consejo para controlar la exposición a la radiación cósmica del personal de tripulación de aeronaves. El resultado de estos trabajos fue la circular sobre los programas de protección radiológica a implantar por las compañías aéreas, donde se establecen los criterios para la elaboración de un Programa de protección radiológica de la tripulación de aeronaves. ■

ACUERDOS DEL PLENO DEL CSN

Convenio con la AEMET sobre asesoramiento meteorológico y protección radiológica

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) dio luz verde a la firma de un convenio con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para el desarrollo de actividades conjuntas en materia de meteorología, seguridad nuclear y protección radiológica. Tendrá validez de cuatro años, que se prorrogarán previo acuerdo expreso de ambas instituciones.



Acceso a todas las actas

Informe favorable a la autorización del sistema HI-STORM FW en los ATI de las centrales nucleares

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear informó favorablemente, con límites y condiciones, la concesión de la autorización del sistema HI-STORM FW versión G como paso previo a su uso en los almacenamientos temporales individualizados (ATI) de combustible nuclear gastado de las dos unidades de las centrales nucleares Almaraz y Ascó; y de Cofrentes y Vandellós II.

In memoriam



Con profundo respeto y afecto, despedimos a nuestra querida compañera y amiga, Lola Aguado, quien falleció el pasado 9 de octubre.

Lola comenzó su carrera en el CSN en enero de 1989, un momento que compartió con muchos de nosotros cuando tomamos posesión juntas. Bióloga de formación, pronto demostró su valía y dedicación en el ámbito de la protección radiológica.

Su larga carrera en el CSN la definió como una profesional dedicada al servicio público. Desempeñó puestos cruciales como inspectora y jefa del Área de Instalaciones Radiactivas Industriales. Su conocimiento especializado en control de fuentes también fue fundamental en la Subdirección de Protección Radiológica Operacional, donde ocupó el puesto de coordinadora técnica. Su solvencia técnica y profesional fue altamente valorada en el ámbito internacional, llevándola a presidir el grupo de HERCA para este tipo de instalaciones y a participar en el grupo de seguridad física del FORO iberoamericano.

Lola también compartió su conocimiento y rigor técnico en las páginas de la revista *Alfa*, contribuyendo a la difusión de las mejores prácticas de su campo profesional.

Quienes compartieron proyectos con ella, incluyendo a numerosos colegas internacionales, tuvieron la oportunidad de apreciar no solo su profesionalidad y devoción por el servicio público sino también su calidad humana. Lola siempre estaba dispuesta a ofrecer un buen consejo y una orientación constructiva, su sonrisa sincera hacía sentir acogido a quien tenía enfrente.

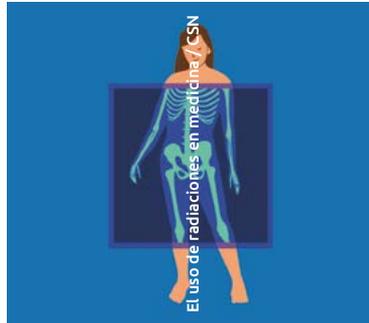
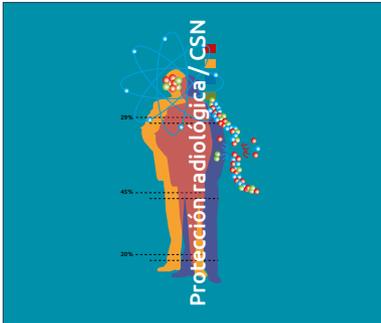
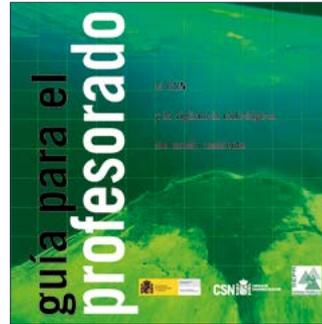
Echaremos de menos su vasta experiencia y conocimiento. Pero, sobre todo, extrañaremos inmensamente a Lola, nuestra amiga.

Mariles Ramírez

Jefa de Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas del Consejo de Seguridad Nuclear de España



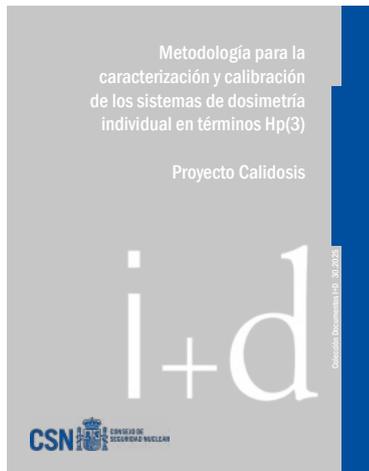
ÚLTIMAS PUBLICACIONES



Catálogo de publicaciones

CSN

CONSULTA EL CATÁLOGO DE PUBLICACIONES DEL CSN.
Disponible en:

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 > Advanced technology fuels:
new field within nuclear research**

The so-called advanced technology fuels seek to increase operating margins and performance, and improve the system's response in the face of extreme situations without needing to redesign current reactors.

REPORTS**14 > Radionuclides against
poaching: South African
experiment with rhinoceroses**

Project Rhisotope proposes to inject small amounts of radionuclides in rhinoceroses' horns to make them traceable through the global nuclear-security infrastructure.

**22 > Nuclear security's new
challenges: protection and
prevention in conflict areas**

Different events in the current international crisis context are dangerously normalising the involvement of civil nuclear facilities in armed conflicts.

INTERVIEW**28 > Isabel Fariñas Gómez**

Cell Biology professor at the University of Valencia.

TECHNICAL ARTICLES**32 > CSN–UC collaboration:
ten years driving fire CFD
simulation in nuclear power plants****41 > Monitoring of environmental
radioactivity in Spain: CSN's role****SCIENCE AND ART****47 > What art conceals**

Science at the service of heritage preservation: several methodologies allow for understanding pictorial works in detail and safeguarding their survival for future generations.

RADIOGRAPHY**52 > 400kV substations**

Connecting a Spanish nuclear power plant to the electric transportation network.

CSN I+D**54 > Radiological characterization
of karst areas and their impact
on radon****ENTITIES****56 > Observatorio Astronómico
de Calar Alto (CAHA)**

Fifty years as European benchmark in optical and infrared astronomy

NAMES IN SCIENCE**60 > Rosalind Franklin:
the forgotten DNA architect**

Her mastery in X-ray crystallography was decisive to unravel DNA's double helix structure, cornerstone of modern molecular biology



**I PLAN de
IGUALDAD
del Consejo
de Seguridad
Nuclear**

Periodo 2023-2026