CSN
# alfa

**Revista de seguridad nuclear y protección radiológica**
Consejo de Seguridad Nuclear
**Número 50**
**Mayo 2022**

¡N.º 50!

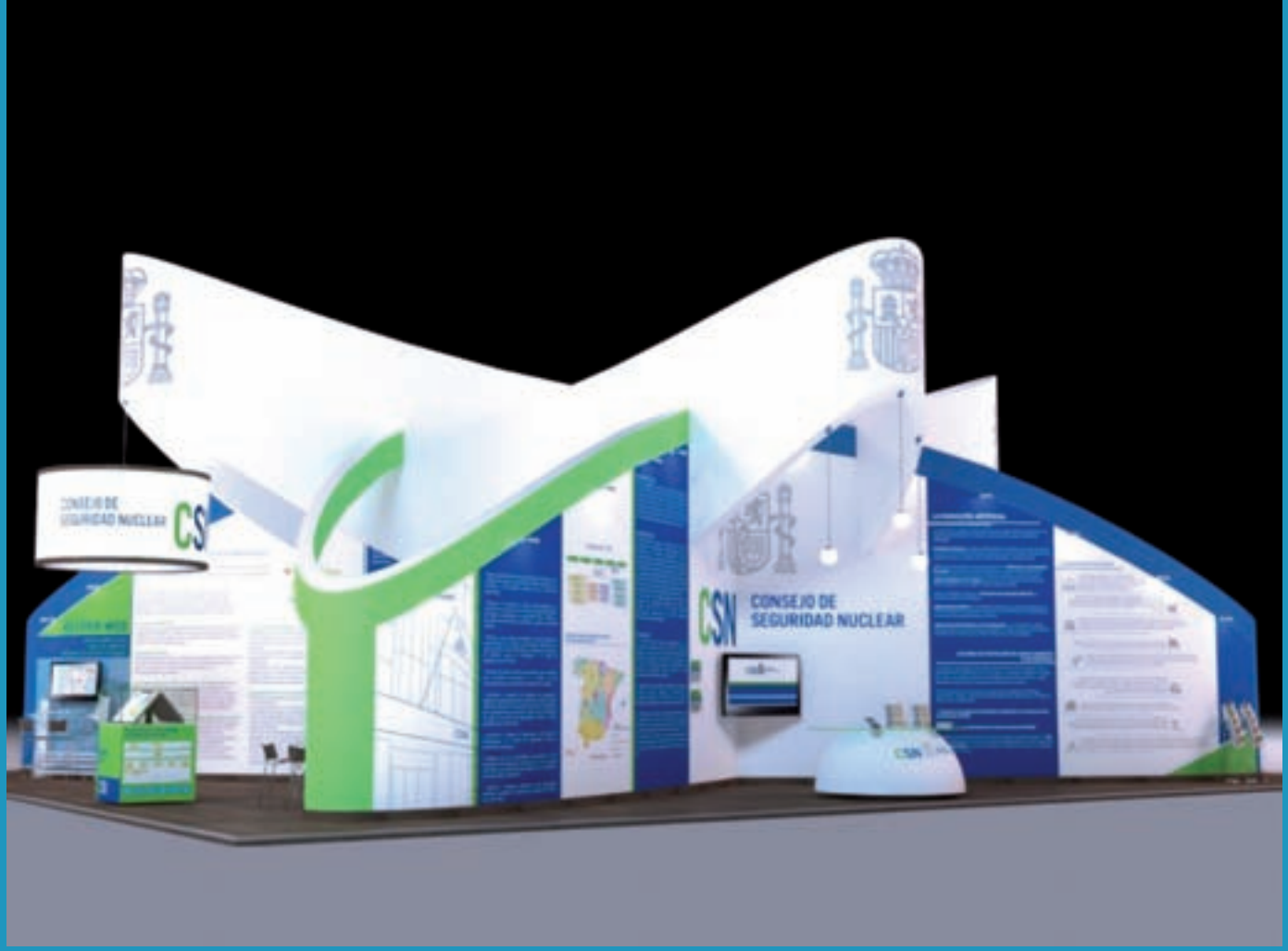


# Contra plagas, radiaciones

**Experiencia en el licenciamiento de bultos de transporte de combustible gastado**

**María Martinón, directora del CENIEH: "De alguna manera la compasión también fosiliza"**

**Biofísica: una mirada diferente sobre la vida y los sistemas biológicos**




# De congresos sin salir de casa

**El Consejo de Seguridad Nuclear dispone de un expositor virtual para ferias y congresos online. El diseño de la planta tiene forma de átomo, con el logotipo del CSN en el núcleo, y cuatro salas diferenciadas.**

**Este expositor virtual permite la realización de una visita interactiva en formato de imágenes 360° en 3D y es navegable desde diferentes dispositivos (ordenadores, tabletas y teléfonos móviles). En él se puede encontrar digitalizada toda la información que habitualmente muestra el CSN en los congresos, sustituyendo las imágenes de lonetas por infografías en las paredes de las salas virtuales. Además, contiene nuevos videos de carácter pedagógico que pueden ser visualizados dentro del mismo.**

**Acompáñenos en https://standvirtual.csn.es/**

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

# Medio millar de contenidos

Casi sin pestañear, *Alfa* ha llegado a su número 50. Esta publicación, nacida en 2008, se ha convertido en uno de los instrumentos de comunicación más conocidos del Consejo de Seguridad Nuclear. Catorce años en los que se han abordado materias relacionadas con la seguridad nuclear y la protección radiológica pero en los que también se ha reservado espacio en sus páginas para acercar contenidos de carácter científico e interés social.

Hablamos de cerca de 500 artículos y casi 200 autores (tanto de fuera del CSN como personal del Consejo) que, en solitario o de forma coral, han ido moldeando *Alfa* con sus textos hasta darle la forma que tiene hoy. Entre las páginas de este número redondo realizamos un recorrido a la trayectoria de esta publicación desde sus inicios.

Este número, que arranca con un recuerdo cariñoso —mediante esta presentación— a quienes diseñaron y pusieron en marcha *Alfa*, recoge el uso de las radiaciones para evitar plagas y luchar contra las enfermedades zoonóticas mediante la técnica del insecto estéril; nos acerca a los proyectos de carbono azul, que buscan apoyar la preservación y restauración de ecosistemas oceánicos como un recurso natural de captura y almacenamiento de gases de efecto invernadero; aborda un problema de salud mundial de creciente preocupación, el de las bacterias que han desarrollado resistencia a los antibióticos; y rescata el perfil de una pionera de la biología molecular en España: Margarita Salas.

Entrevistamos a María Martinón, directora del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana, que nos habla de los trabajos en los yacimientos de Atapuerca y en otros lugares del mundo para intentar entender el pasado remoto de nuestra especie. También describimos una disciplina joven, la biofísica, un campo de investigación que utiliza conocimientos y herramientas procedentes de la física para entender cómo funcionan los sistemas biológicos.

> Alfa *pretende transmitir el conocimiento de los especialistas del mundo nuclear y radiológico sin dejar de arrojar luz sobre otros terrenos que despiertan la curiosidad*

La parte más técnica de *Alfa* revisa la experiencia en el licenciamiento de bultos de transporte de combustible gastado de las centrales nucleares y explica el papel del CSN en el amplio Plan INVEAT, que prevé la incorporación al Sistema Nacional de Salud de más de 800 equipos de alta tecnología sanitaria de aquí a septiembre de 2023.

En la *Radiografía* se explica el proceso de notificación de sucesos de instalaciones radiactivas al CSN, con la descripción de los pasos a seguir para notificar aquellos que pueden suponer un riesgo de exposición indebida al público, los trabajadores o al medio ambiente.

Esperamos que *Alfa* llegue a cumplir los cien números con la misma salud que muestra a sus cincuenta, transmitiendo el conocimiento de los especialistas del mundo nuclear y radiológico, pero sin dejar de arrojar luz sobre otros terrenos que despiertan la curiosidad y que, con frecuencia, mantienen cierta relación con las radiaciones.

Nosotros seguiremos con la misma filosofía para *Alfa* de nuestro Nobel Santiago Ramón y Cajal cuando dijo aquello de que "discrepo de quienes sostienen que un buen especialista puede ignorar cuanto rebasa el círculo de su atención habitual. No, el sabio, además de la disciplina especialmente cultivada, queda obligado, si no quiere adocenarse, a saber algo de todo".

alfa

**Revista de seguridad nuclear y protección radiológica**
Editada por el CSN
**Número 50**
**Junio 2022**

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C125445

**Comité Editorial**
Juan Carlos Lentijo Lentijo
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
Teresa Vázquez Mateo
Javier Zarzuela Jiménez
J. Pedro Marfil Medina
Ignacio Fernández Bayo

**Comité de Redacción**
Ignacio Martín Granados
Natalia Muñoz Martínez
Vanessa Lorenzo López
Adriana Scialdone García
Arturo Fernández García
Juan Enrique Marabotto García
Ignacio Fernández Bayo

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

**Coordinación editorial**
Divulga S.L.
C/Diana, 16
28022 Madrid

**Fotografías**
CSN, Divulga, OIEA, DepositPhotos.

**Impresión**
Editorial MIC
C/Artesiano s/n
Pol. Ind. Trobajo del Camino
24010 León

**Fotografía de portada**
Daniel Feliciano / Wikimedia

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

© Consejo de Seguridad Nuclear

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

## REPORTAJES

CSIC



### 6 Superbacterias: invisibles pero mortales

La resistencia a los antibióticos desarrollada por todo tipo de cepas bacterianas empieza a ser considerada como la mayor amenaza para la salud mundial durante los próximos años. Según un estudio publicado en *The Lancet,* en 2019 estos microorganismos provocaron 1,27 millones de muertes, más que la suma del sida y la malaria.

### 12 Un puente de papel con la sociedad

El Consejo de Seguridad Nuclear edita Alfa, revista de seguridad nuclear y protección radiológica, como instrumento de divulgación e información de la sociedad en energía, investigación, tecnología, medio ambiente y salud, entre otros, con especial atención al uso de las radiaciones. Catorce años después, la revista alcanza su número 50.

DANIEL FELICIANO / WIKIMEDIA



### 31 La vida vista desde la física

La biofísica es un campo de investigación relativamente joven, que utiliza conocimientos y herramientas procedentes de la física para entender cómo funcionan los sistemas biológicos. Sus aplicaciones van desde la obtención de nuevos combustibles hasta nuevas tecnologías de diagnóstico de enfermedades y de tratamientos médicos.



### 50 La esterilización de insectos, una vía orgánica para luchar contra las plagas

El cambio climático, el aumento de las temperaturas y la globalización han repartido por el mundo plagas difíciles de erradicar, afectando a numerosos cultivos. La necesidad de garantizar el suministro de alimentos ha hecho que la FAO y el OIEA impulsen proyectos de aplicación pacífica de radiaciones para luchar contra estas plagas.

### 56 Carbono teñido de azul

Los proyectos de carbono azul buscan apoyar la preservación y restauración de ecosistemas oceánicos, como manglares, praderas marinas y marismas, capaces de absorber dióxido de carbono de la atmósfera y almacenarlo durante miles de años de forma más intensa y eficaz que los ecosistemas terrestres.

## CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

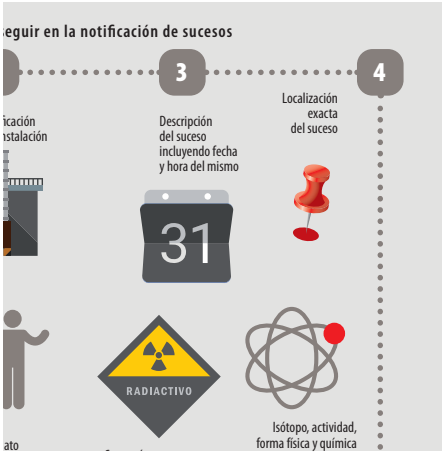
### 37 Margarita Salas, madre de la biología molecular española

Margarita Salas fue la pionera de la biología molecular en España. Ella y su marido, Eladio Viñuela, fueron discípulos del Nobel español Severo Ochoa y ella se convirtió en la científica española más universal, descubridora de una enzima utilizada en todo el mundo y la progenitora de varias generaciones de biólogas y biólogos moleculares.

## RADIOGRAFÍA


### 24 Proceso de notificación de sucesos de instalaciones radiactivas al CSN


Exposición de los criterios establecidos por el CSN y los pasos a seguir para notificar sucesos radiológicos, que son aquellos que afectan a estructuras, sistemas, equipos o componentes de las instalaciones radiactivas y pueden suponer un riesgo de exposición indebida al público, los trabajadores o al medio ambiente.




## ENTREVISTA


### 26 María Martinón, directora del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana


“De alguna manera, la compasión también fosiliza”


CENIEH

## ARTÍCULOS TÉCNICOS


### 16 Experiencia en el licenciamiento de bultos de transporte de combustible gastado


Las centrales españolas recurren al uso de contenedores para el almacenamiento de elementos combustibles gastados, para los que debe contemplarse también una alternativa para su transporte posterior. Describimos los principales cambios en el diseño de los bultos de transporte y su impacto en el proceso de licenciamiento.


### 43 Plan INVEAT: Actuaciones del Consejo de Seguridad Nuclear


El Plan INVEAT prevé la incorporación al Sistema Nacional de Salud de más de 800 equipos de alta tecnología sanitaria hasta septiembre de 2023. El CSN afronta el desafío de realizar las correspondientes evaluaciones de seguridad de todas ellas. El análisis de la situación y de cómo actuar ante este reto servirá, además, para optimizar los procesos de licenciamiento de instalaciones radiactivas médicas de cara al futuro.




63 **Reacción en cadena**

67 **Panorama**

69 **Acuerdos del Pleno**

70 **Publicaciones**

71 **Abstracts**



Placa de Petri con un cultivo de la bacteria *Klebsiella pneumoniae*.

CSIC

CSIC

Las bacterias resistentes a antibióticos causaron más de 1,27 millones de muertes en 2019

# Invisibles, pero mortales

Los antibióticos llegaron como una panacea contra las infecciones bacterianas; pero esta poderosa arma, que tantas vidas ha salvado a lo largo de los últimos 80 años, ha perdido eficacia por la aparición de organismos que han desarrollado resistencia a estos fármacos. Se conocen como superbacterias, y producen ya más muertes que el sida o la malaria. Un estudio publicado en el pasado mes de enero en la revista *The Lancet* indica que el número de muertes causadas directa o indirectamente por infecciones de estos microorganismos invisibles y multirresistentes es mucho mayor que el que se estimaba. Y su impacto no deja de crecer. Los científicos buscan vías nuevas para evitar esta amenaza, considerada ya más peligrosa que la actual pandemia por covid-19, y mucho más silenciosa.

Texto: **Noemí Trabanco** | Bióloga y periodista de ciencia

En 2021 fallecieron en España 1.021 personas por accidentes de tráfico. Las muertes debidas a infecciones por bacterias resistentes fueron cuatro veces más. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), unas 700.000 personas mueren al año en todo el mundo debido a este problema, y se estima que en 2050 el número podría rondar los 10 millones. El pasado enero se publicó un estudio a gran escala, realizado por un consorcio de especialistas en resistencia antimicrobiana, que eleva las cifras de mortalidad estimando que en 2019 fallecieron 1,27 millones de personas. El trabajo, publicado en *The Lancet,* cuenta con datos de 204 países y apunta a una mayor incidencia en algunos del África subsahariana, donde la asistencia sanitaria, los sistemas de depuración de aguas y las medidas de bioseguridad son insuficientes.

Las infecciones por bacterias resistentes son una realidad que en los últimos años tiene en alerta a profesionales y autoridades sanitarias de todo el mundo. El uso indiscriminado de antibióticos en la ganadería y la industria agroalimentaria y el uso inadecuado en humanos han fomentado la aparición de farmacorresistencia en un gran número de microorganismos, lo que supone un obstáculo al tratamiento de enfermedades infecciosas, con especial relevancia en ambientes hospitalarios. En Europa, este problema supone ya un coste de unos 1.500 millones de euros, debido a tratamientos más caros, más y más largas estancias hospitalarias y la aparición de infecciones recurrentes, especialmente en pacientes con otras patologías previas.

Las bacterias pueden adquirir resistencia a los antibióticos a través de dos vías diferentes: la mutación de los genes que codifican para las proteínas cuya función es inhibida por el antibiótico, o a través de lo que se denomina transferencia horizontal entre bacterias, es decir, la transmisión de material genético entre ellas. Esta transferencia se puede dar entre bacterias de distintas especies e, incluso, no emparentadas filogenéticamente. Para ello, las bacterias utilizan los plásmidos, moléculas circulares de ADN, independientes del cromosoma bacteriano. La adquisición de resistencia es un proceso natural, pero el abuso de antibióticos durante muchos años lo ha favorecido mediante la selección de los microbios más resistentes, capaces de soportar medios con alta presencia de antibióticos.



Bruno González Zorn, jefe de la Unidad de Resistencia Antimicrobiana de la Universidad Complutense.

## Preocupación internacional

La OMS, consciente del problema, lanzó en 2015 el Plan de Acción Mundial contra la Resistencia a los Antimicrobianos. Entre los objetivos de este plan está reforzar la vigilancia en el uso de antibióticos y mejorar la sensibilización ciudadana. En septiembre del año pasado se creó un grupo multidisciplinar e internacional de 15 expertos independientes para asesorar a este organismo, denominado Antibióticos críticos para el ser humano (AG-CIA), del que forma parte el investigador español Bruno González Zorn, jefe de la Unidad de Resistencia Antimicrobiana de la Universidad Complutense. "Nuestra principal misión es preservar la función de estos antibióticos críticos y dar recomendaciones sobre su uso según las regiones del planeta y su finalidad".

Según el investigador es muy importante ser conscientes de que la resistencia a antimicrobianos es un problema global y que hay que atajarlo, también, desde un planteamiento global. "El concepto One Health, que iniciamos en 2003, trata precisamente de incidir sobre la importancia de tratar salud humana, salud animal y medio ambiente de forma conjunta, porque son interdependientes. Por ello también creamos la asociación MedVetNet, para unir a médicos y veterinarios en la prevención de la farmacorresistencia".

En España es necesaria una prescripción médica para acceder a tratamientos antibióticos, pero los expertos reconocen que hay que mejorar la formación de prescriptores —especialmente de atención primaria—, farmacias y veterinarios. En el ámbito hospitalario el uso de antibióticos en España es similar al del resto de países europeos, pero en atención primaria somos el tercer país con mayor consumo. Jordi Vila, investigador en el Instituto de Salud Global (ISGlobal) de Barcelona y director de la Iniciativa contra la Resistencia Antimicrobiana señala que "esto se debe, principalmente, a tres factores: el tiempo de dedicación al paciente, que aquí es muy reducido; el uso

ISTOCK



Imagen de la bacteria *Escherichia coli.*

## Los principales enemigos

La OMS diferencia 3 grandes grupos de prioridad dentro de los que se incluyen las especies de microorganismos con capacidad patogénica.

**Grupo 1, de prioridad crítica.** Incluye las especies *Acinetobacter baumannii, Pseudomonas aeruginosa* y enterobacterias como *Klebsiella* o *Escherichia coli.* Pueden provocar infecciones graves y a menudo letales.

**Grupo 2, de prioridad elevada.** Incluye *Enterococcus faecium, Staphylococcus aureus, Helicobacter pylori, Campylobacter spp., Salmonellae* y *Neisseria gonorrhoeae.*

**Grupo 3, de prioridad media.** Incluye *Streptococcus pneumoniae, Haemophilus influenzae* y *Shigella spp.*

De acuerdo con el trabajo publicado en *The Lancet,* las prioridades deberían centrarse en *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Klebsiella pneumoniae, Streptococcus pneumoniae, Acinetobacter baumannii* y *Pseudomonas aeruginosa.*

de herramientas de diagnóstico rápido, que en España apenas de utilizan en atención primaria; y la educación sanitaria de la población".

En 2014 se aprobó el Plan Nacional de Resistencia a Antibióticos (PRAN 2014-2018), coordinado por la Agencia Española del Medicamento y Productos Sanitarios (AEMPS), con la intención de reducir el riesgo de selección y diseminación de resistencia a los antibióticos a través de 6 líneas de actuación: vigilancia, control, prevención, investigación, formación y comunicación. El actual PRAN 2019-2021 incluye entre sus iniciativas los Programas de Optimización de Uso de los Antibióticos (PROA), tanto en el ámbito hospitalario como en el de atención primaria, precisamente para perfeccionar la prescripción de antibióticos. Gracias a ello, en salud humana se ha reducido un 32 % desde 2014, mientras que en salud animal lo ha hecho en el 59 %. Aun así, el actual Pacto Verde Europeo plantea una disminución del 50 % adicional en ganadería para 2030.

La pandemia también ha tenido un impacto en el uso de antibióticos. Especialmente durante los primeros meses, cuando no se conocía bien la enfermedad, en los hospitales se incrementó el uso de antibióticos para prevenir lo que en aquel momento se creía que eran infecciones bacterianas secundarias. Además, aumentó el uso de antibióticos de último recurso debido a las altas tasas de ocupación de las UCI. Pero al mismo tiempo el confinamiento de la población, el uso de mascarillas y unas medidas de higiene más estrictas redujeron otras infecciones comunes y disminuyó la prescripción de antibióticos en atención primaria.

### Prevención, formación y control

Desde la OMS y los programas nacionales se insiste en la vigilancia, la prevención y el control como mecanismos para combatir este problema. La vacunación, tanto en humanos como animales, puede suponer un gran avance en la lucha contra infecciones de bacterias multirresistentes; por ejemplo la reducción del uso de antibióticos betalactámicos contra *Streptococcus pneumoniae* en Europa gracias a esta estrategia.

Tanto en grandes granjas de producción animal como en instalaciones sanitarias es imprescindible mejorar los protocolos para evitar la entrada de microorganismos, especialmente en países en desarrollo, donde las medidas higiénicas son aún muy deficientes y suponen un foco de aparición y propagación de resistencia a los antimicrobianos. En Ghana, un trabajo realizado por González Zorn sobre aguas residuales de hospitales ha detectado altos niveles de bacterias resistentes y de nuevos genes de resistencia.



Álvaro San Millán, investigador del Centro Nacional de Biotecnología.

La educación social es otro punto crítico que hay que trabajar. "Es

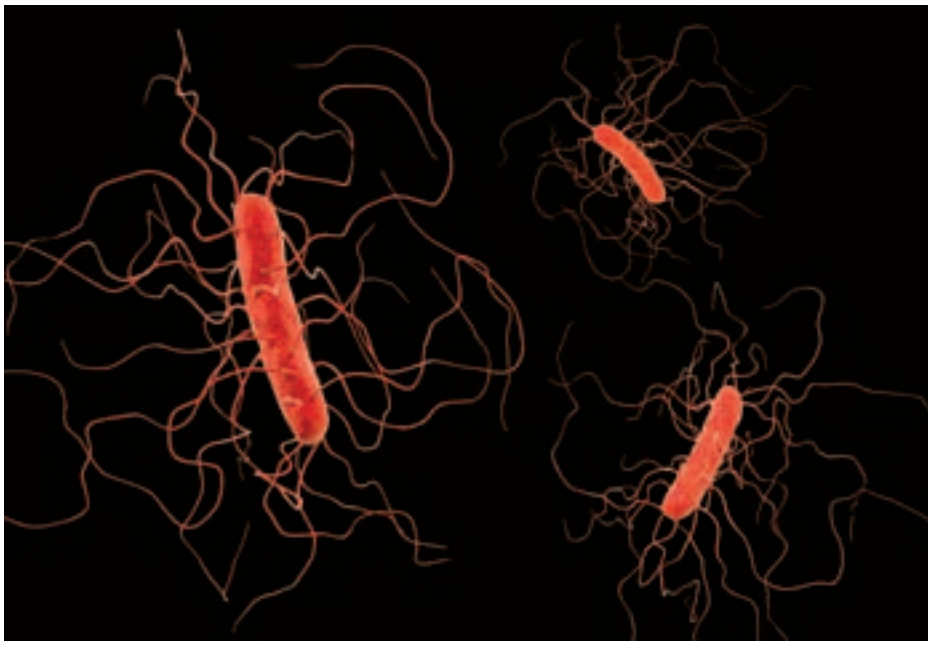


Imagen de *Clostridium difficile,* causante de la colitis infecciosa severa, que presenta resistencia a antibióticos en muchas de sus cepas.

importante que exista educación a nivel social, pero también de los prescriptores, tanto en salud humana como animal", indica Zorn. Existen múltiples iniciativas de concienciación, especialmente dirigida a la población joven, como el Proyecto MicroMundo, de la Universidad Complutense, en el que Zorn está implicado, que ha sido galardonado con uno de los premios PRAN 2021. Ese mismo galardón lo recibió, en 2019, el proyecto de lSGlobal, para difundir el problema entre los jóvenes mediante un juego de cartas. "En nuestra iniciativa un 20 % de la actividad se destina a proyectos de comunicación y educación, especialmente en jóvenes, para que entiendan la problemática y las futuras generaciones hagan un uso más consciente de estos fármacos", señala Vila.

Desde el punto de vista de la vigilancia y siguiendo las indicaciones del Plan de Acción Mundial, el Plan Nacional incluye la consolidación del sistema de vigilancia para monitorizar la prescripción de antibióticos, tanto en el ámbito público como privado. González Zorn va más allá y opina que "el nivel de control de dispensación de antibióticos debería ser igual al de los psicotrópicos". En el ámbito de la salud animal, el plan también incluye iniciativas para el control de la prescripción por parte de los veterinarios.

## Entender mejor la resistencia

Dado el impacto de estas superbacterias a nivel mundial, son muchos los investigadores que intentan entender mejor los mecanismos de adquisición de resistencia y cómo evolucionan estas poblaciones; e identificar alternativas al uso de antibióticos. El grupo de Jordi Vila investiga sobre las bases moleculares de la resistencia, que en algunos casos se desconoce. Además, desarrollan herramientas de diagnóstico rápido, especialmente para la neumonía. "Sabemos que la mortalidad se reduce enormemente si el tratamiento antibiótico se aplica lo antes posible. Estamos desarrollando un test para identificar en una hora (actualmente se tarda 24 horas) cuál es el microorganismo que está causando la patología y aplicar el tratamiento adecuado. Los resultados preliminares son prometedores". El grupo de Bruno Zorn también desarrolla investigación multidisciplinar, desde la biología molecular de los plásmidos hasta una perspectiva global, para entender el flujo de las bacterias multirresistentes a nivel mundial o el papel de los animales de compañía en su diseminación.

El grupo de Álvaro San Millán, del Centro Nacional de Biotecnología (CNB) estudia los plásmidos mediante los cuales las bacterias pueden adquirir genes de resistencia. "Los plásmidos pueden suponer una ventaja para la bacteria si les confiere resistencia a antibióticos, pero también suponen un coste biológico. Intentamos entender estos costes y cómo utilizarlo para eliminar estas bacterias específicamente en casos de infección". Otra de las líneas de investigación del grupo es intentar desarrollar herramientas biotecnológicas capaces de eliminar específicamente las bacterias que portan el plásmido de resistencia. "Uno de los problemas del uso de antibióticos es que pueden producir desequilibrios en la microbiota del paciente (lo que se conoce como disbiosis). De esta forma lograríamos eliminar el patógeno sin modificar la composición del resto de bacterias".

Además, entender mejor el funcionamiento molecular de los procesos bacterianos aporta pistas para el desarrollo de moléculas que permitan eliminar bacterias patógenas. En el Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas (CIB), el grupo de José Manuel Andreu intenta comprender de manera precisa el proceso de citoquinesis: la división del citoplasma durante la división celular bacteriana. En este proceso es imprescindible la proteína FtsZ (similar a la tubulina, que en nuestras células permite la separación de los cromosomas durante su división), que "forma unos filamentos que conforman los denominados anillos Z. Esta estructura recluta posteriormente al resto de proteínas que conforman el divisoma, la estructura formada por

## Radiaciones contra superbacterias

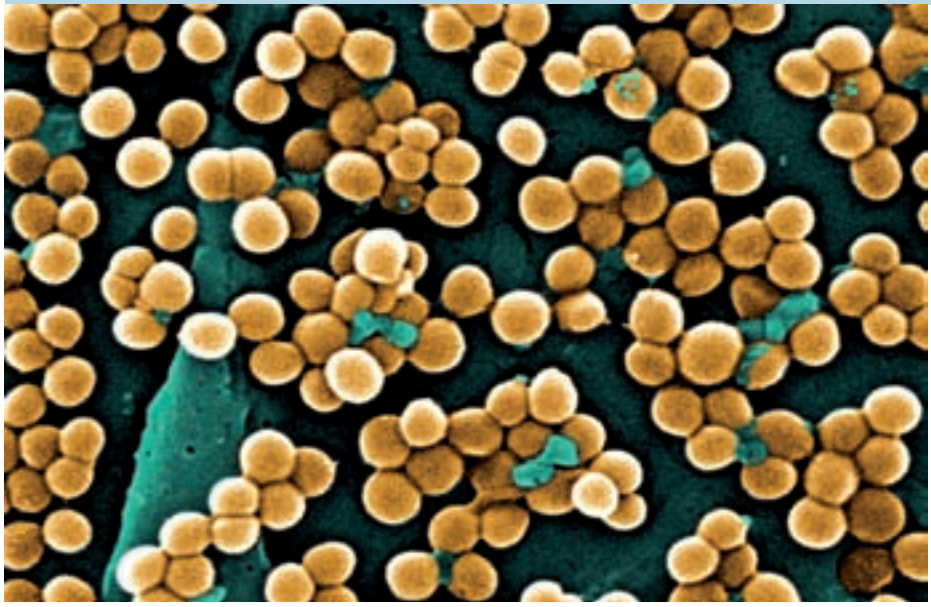
En 2018 un grupo de investigadores del Centro de Investigación Radiológica de la Universidad de Columbia (Nueva York), liderado por David Brenner, publicó un artículo en el que afirmaba que la luz ultravioleta lejana (UVC lejana) era capaz de eliminar *in vitro* a la bacteria resistente *Staphylococcus aureus,* apuntando al uso de esta radiación como un método óptimo de desinfección de microorganismos, en línea con lo que otros investigadores habían apuntado previamente.

La ventaja de esta técnica, en la que se utilizó una longitud de onda de 224 nm, respecto a la utilización de radiación UVC convencional, de 254 nm, que puede tener efectos dañinos sobre la piel y se ha demostrado que es carcinógena, es que la UVC lejana no dañaría las células humanas, ya que no puede penetrar a través de la capa externa muerta de la piel ni la capa externa del ojo, como sí hace la radiación UVC convencional.

Los autores de este trabajo, junto con investigadores de la Universidad de Dundee y la Universidad de Leeds publicaron el pasado mes de marzo otro estudio realizado en una cámara del tamaño de una habitación, en el que demuestran que la UVC lejana (en este caso con una longitud de onde de 222nm) reduce la cantidad de microbios activos en el aire interior hasta casi cero, haciendo que el aire interior sea tan seguro como el aire exterior. Esta radiación sería incluso más efectiva sobre los virus, incluido el SARS-CoV-2, causante de la covid-19.

En España, el Ministerio de Sanidad mantiene la precaución en su utilización en lugares con presencia de personas. En 2020 se elaboró una especificación UNE (Observatorio de Vigilancia de Mercado de la Asociación Española de Normalización) que regula los requisitos de seguridad para aparatos UVC utilizados para la desinfección de aire de locales y superficies (Especificación UNE 0068). La OMS, por su parte, advierte que estas tecnologías no sustituyen la limpieza manual, sino que la complementan.

JOSÉ MANUEL ANDREU (CIB)



Vista de estafilococos dorados resistentes a la meticilina.

múltiples proteínas implicada en la división de la bacteria", explica Andreu.

Su trabajo se centra en investigar los cambios conformacionales que permiten que la proteína se ensamble y desensamble. "Hemos sido capaces de crear un modelo a escala atómica del proceso de ensamblaje. La división celular no se utiliza hasta el momento como diana en clínica y creemos que es una alternativa para frenar el auge de los microorganismos multirresistentes. Pero para identificar posibles dianas es imprescindible entender el mecanismo". En su último trabajo, en colaboración con Carlos Fernández Tornero, también del CIB, utilizaron como modelo *Staphylococcus aureus*, resistente a meticilina, cuya infección causó 100.000 muertes en 2019, según el estudio de *The Lancet.*



Pilar García, del IPLA.

### Nuevos antibióticos y otras alternativas

La identificación y el desarrollo de nuevos antibióticos es un proceso difícil y costoso. Las farmacéuticas han reducido los proyectos para identificar nuevos

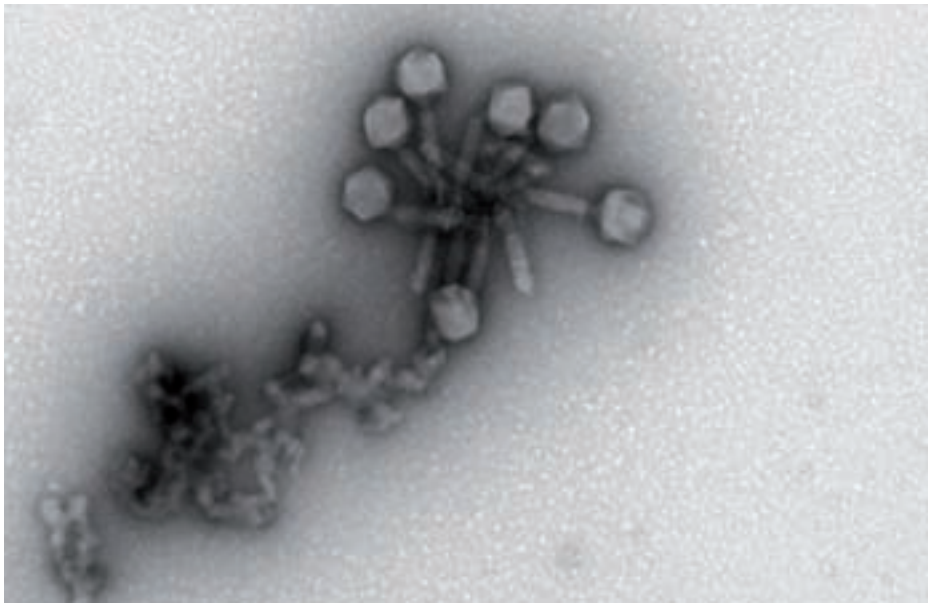


IMAGEN CEDIDA POR PILAR GARCÍA (IPLA)

Fagos observados al microscopio electrónico.

compuestos; porque no solo deben eliminar bacterias sino que no deben ser tóxicos para el organismo. En los últimos 30 años no se ha aprobado más que un antibiótico para su uso en humanos, las diarilquinolinas.

Actualmente la mayoría de iniciativas de búsqueda de nuevos antibióticos nacen en los grupos de investigación. Otra de las líneas de investigación del ISGlobal pretende la identificación de nuevos compuestos con interés terapéutico. "Estamos trabajando en un péptido cíclico para utilizar frente a bacterias multirresistentes. Estamos terminando la fase pre-clínica con buenos resultados", indica Vila. Uno de los problemas que sufren es la dificultad de realizar los ensayos clínicos. "Nosotros no tenemos capacidad. La estrategia es patentar el compuesto una vez finalizada la fase pre-clínica y vender la patente a una empresa con capacidad para este tipo de ensayos".

Otra de las alternativas que se plantean es utilizar virus bacteriófagos o fagos, que infectan exclusivamente a bacterias. Además de virus enteros, se pueden usar enzibióticos (proteínas derivadas de estos virus), principalmente endolisinas, que degradan componentes esenciales para



Simulación de la forma de un bacteriófago a partir de una imagen de microscopio electrónico.

estas bacterias. Denominada fagoterapia o terapia fágica, esta opción ha demostrado eficacia en ensayos *in vitro* y en modelos animales, e incluso hay ejemplos ya de su utilización en humanos con resultados exitosos.

Dentro de la Unión Europea, Bélgica y Francia ya utilizan la terapia fágica en pacientes con infecciones incurables y graves, para los que no existe alternativa. Hace años se lanzó la plataforma FAGOMA (Red española de bacteriófagos y elementos transductores) para impulsar el uso de la terapia fágica en España. Según Pilar García, que lidera esta red, "en los casos de pacientes con infecciones osteoarticulares o fibrosis quística, que presentan infecciones recurrentes y pasan largos periodos en el hospital, esta terapia podría mejorar su calidad de vida".

Una de las ventajas de esta alternativa es poder crear mezclas personalizadas para el paciente, con varios fagos específicos de la bacteria que causa la infección, evitando así que ésta posea resistencia, sin alterar el resto de la microbiota de su organismo. Varios grupos de investigación en España trabajan ya en la identificación de fagos y proteínas derivadas para su utilización en medicina, agricultura o alimentación. En el Instituto de Productos Lácteos de Asturias (IPLA), el grupo de Pilar García trabaja en fagos específicos contra *S. aureus,* tanto para un posible uso clínico como en seguridad alimentaria. Según dice, "podrían utilizarse como un conservante más. En países como Holanda ya se utiliza, pero en nuestro caso nos encontramos con la necesidad de modificar la legislación vigente.

"Algunos países utilizan ya los fagos en ganadería intensiva, puesto que el uso de antibióticos se ha tenido que reducir en gran medida", añade García. Respalda el uso de la terapia fágica en humanos un artículo recientemente publicado en *Nature Communications,* sobre un paciente de 56 años infectado por la bacteria multirresistente *Mycobacterium chelonae* y que tenía patologías previas. Su situación clínica había llegado a ser crítica, pero tras ser tratado con una única especie de fago, denominado Muddy, la bacteria ha sido eliminada de su organismo y el paciente se ha recuperado.




La revista *Alfa,* instrumento divulgativo del CSN, alcanza los 50 números

# Un puente de papel con la sociedad

El principal cometido del Consejo de Seguridad Nuclear es regular, vigilar y garantizar la seguridad de las actividades derivadas del uso de la energía nuclear y de las radiaciones ionizantes para las personas y para el medio ambiente. Pero no basta con realizar este trabajo de forma impecable; es también su obligación mantener debidamente informada a la sociedad de su actividad y contribuir a mejorar el conocimiento en los ámbitos en los que se desenvuelve: la energía, la ciencia, la tecnología, el medio ambiente y la salud, entre otros. Como parte de esa tarea de transparencia y comunicación, el Consejo edita *Alfa, revista de seguridad nuclear y protección radiológica,* un instrumento de divulgación general de esos ámbitos, con especial atención al uso de las radiaciones. Este instrumento, que pretende servir de puente entre el CSN y la sociedad, alcanza con este ejemplar su número 50, catorce años después de su aparición.

Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | periodista de ciencia

La actividad del Consejo tiene una amplia proyección en ámbitos a veces insospechados. La actividad más conocida es el control de la seguridad de las centrales nucleares y de las instalaciones que cubren todo el ciclo relacionado con ellas, desde la minería de uranio y la producción de combustible nuclear hasta la gestión de los residuos radiactivos y la clausura y desmantelamiento de instalaciones. También es conocido el uso de radiaciones ionizantes en medicina, tanto en diagnóstico -desde los tradicionales rayos X a técnicas avanzadas, como los aparatos de tomografía por emisión de positrones (PET) y de tomografía axial computerizada (TAC)-, como en tratamiento, mediante radioterapia. Otras son menos obvias. Las radiaciones ionizantes están presentes en multitud de actividades, como el control de llenado de las latas de refresco, la medida de densidad del suelo donde se instala una carretera, la detección de grietas en mate-

riales estructurales, la desinfección de sangre en laboratorios, el control de equipajes en aeropuertos, la lucha contra las plagas, etcétera. En estos y otros muchos casos, el Consejo de Seguridad Nuclear tiene asignada la misión de controlar que el uso de materiales nucleares y radiactivos no afecte a la salud de las personas ni al medio ambiente.

Para dar a conocer a la sociedad el papel que juega en áreas tan diversas, el CSN mantiene una política activa de comunicación, divulgación y transparencia. En esa línea, cuenta con un Centro de información donde se explican, a la manera de los museos interactivos de ciencia, las características y aplicaciones de los materiales nucleares y radiactivos, sus aplicaciones y la actividad que el CSN realiza para controlar la seguridad de su utilización. Su web tiene contenidos de divulgación y las notas informativas sobre la actividad cotidiana del organismo, además de ofrecer información sobre aspectos técnicos (inspecciones, actas, informes…), para cumplir con los requisitos de transparencia. Notas de prensa, publicaciones técnicas y divulgativas, presencia regular en las redes sociales, contacto habitual con los medios de comunicación y participación en los comités de información que se celebran en las localidades con instalaciones nucleares completan dicha política. Y también, claro está, la revista *Alfa*.

"La revista es un instrumento más de la política de comunicación del Consejo. No es el canal principal, pero complementa adecuadamente otras actividades. Y nos permite llegar a públicos que habitualmente son ajenos a la actividad del organismo, como periodistas, miembros de corporaciones locales, asociaciones, universitarios y otros colectivos", dice Ignacio Martín Granados, director del Gabinete de Presidencia del CSN.

La necesidad de disponer de un medio escrito periódico se puso pronto de manifiesto, aunque tardó en hacerse realidad. Bajo la presidencia de Juan Manuel Kindelán, en 1996 se lanzó *Seguridad Nuclear,* una revista trimestral de contenidos eminentemente técnicos, dirigida sobre todo a especialistas y personas interesadas, lo que en argot algunos denominan *stakeholders.* Buena parte de sus páginas recogía minuciosa información fija sobre la situación de las instalaciones nucleares, centrales e infraestructuras del ciclo, instalaciones radiactivas, estadísticas de todo tipo, incidentes y noticias relevantes y actuaciones de los diferentes departamentos del CSN. Eran tiempos en los que internet apenas empezaba a asomar en las actividades profesionales. Hoy, toda esa información de monitorización y control, y mucha más de carácter técnico, está disponible en la web del Consejo (www.csn.es).




Último número de Seguridad Nuclear y primero de Alfa.

## Espejos por ventanas

Con la idea de convertir la revista en un instrumento de acercamiento a la sociedad, en 2007 se puso en marcha su reforma, pensando en dar cabida a aspectos menos técnicos de la actividad del Consejo. Y para consagrar ese acercamiento, se decidió incluir reportajes, además de artículos, que fueran escritos preferentemente por periodistas especializados en ciencia y medio ambiente. Se decidió hacer un diseño más limpio y adecuado al nuevo propósito, una portada más dinámica e incluso se decidió cambiar su nombre. El número 1 de *Alfa, revista de seguridad nuclear y protección radiológica,* apareció en 2008. Según Carmen Martínez Ten, entonces presidenta, que fue quien impulsó este cambio, " *Seguridad Nuclear* era como un espejo en el que todo el sector se miraba y la idea era cambiar espejos por ventanas; que lo que el Consejo hace saliera del círculo de los expertos e intentara acercase al exterior y también que las cosas que interesaban a la sociedad entrasen en el Consejo".

Los primeros pasos en esta dirección fueron moderados y siguió prevaleciendo el contenido técnico, pero se sintió también que buena parte de los temas técnicos ya habían sido objeto de atención, tanto en *Seguridad Nuclear* como en *Alfa.* Ello fue abriendo paso a otros temas cercanos a la actividad del Consejo, pero con una proyección más amplia. A partir del número 17 se incrementó el número de reportajes con esta orientación. Por ejemplo, en ese mismo número se hablaba del radón, desde un punto de vista más social que técnico; de la neurociencia, destacando el papel de las técnicas de imagen que utilizan radiaciones para estudiar el funcionamiento del cerebro; la restauración de obras de arte, igualmente explicando el uso de rayos X para poder ver más allá de la superficie del cuadro; y la gestión de crisis, especialmente en el mundo de los reguladores.

Durante su trayectoria, se han tratado numerosos temas que aparentemente no guardan relación con la actividad del Consejo, pero ofreciendo siempre un punto




de conexión con ese ámbito; muchas veces en forma de lo que en el argot periodístico se conoce como "apoyos", es decir, texto separados, destacados gráficamente, con su propio titular, marcando esa relación. Porque el uso de la radiaciones ionizantes es casi universal. Lo hicimos hablando de arqueología subacuática, de inteligencia artificial, de terremotos, de balnearios, de la impresión 3D, de la robótica o de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, por poner solo unos ejemplos. En este mismo número se hace en los reportajes sobre las superbacterias, la esterilización de insectos, la biofísica e incluso en la entrevista a la paleoantropóloga de Atapuerca, María Martinón.

Con todo, los contenidos de la revista han sido objeto de polémica en diferentes ocasiones, entre la perspectiva de quienes querrían un contenido más técnico y quienes consideran que es preferible ese acercamiento a la sociedad. "La revista no deja de ser el producto de quienes forman el comité editorial en cada momento y según van cambiando los miembros del Pleno la van modulando a su imagen y semejanza y proponiendo diferentes temas. Yo creo que el debate le confiere dinamismo y es algo positivo", sostiene Martín Granados, .

Con el número 22 se produjo un cambio de diseño y una ampliación de los campos sobre los que versan los contenidos, que se han mantenido más o menos vigentes hasta ahora. Se han delimitado parcelas teniendo en cuenta la actividad del Consejo y por eso se suelen proponer un reportaje del mundo de la energía, dando cabida a las diferentes fuentes actuales o futuras; de física, especialmente la de partículas y altas energías; de medio ambiente, entendido en un sentido amplio; de tecnología; y de biomedicina. "Entendemos que los temas científicos que consideramos que son de nuestro interés pueden ser también interesantes para nuestros lectores. Es un complemento fantástico para seguir divulgando la labor del CSN", dice Pedro Marfil Medina, actual responsable del Área de Comunicación del CSN.

## Los ámbitos nuclear y radiológico

Por supuesto, la revista ofrece también espacio a los contenidos técnicos tratados con mayor profundidad. Actualmente, cada número incluye los denominados *Artículos* técnicos: un artículo propuesto y escrito por la Dirección Técnica de Seguridad Nuclear, y otro proveniente de la Dirección Técnica de Protección Radiológica. Así como los de la sección *Radiografía,* que explica de forma fundamentalmente gráfica alguna tecnología nuclear o radiológica o alguna actividad del CSN; la sección *Panorama,* con las noticias del Consejo más destacadas del trimestre anterior; la de *Acuerdos de Pleno* y la de *Publicaciones.*

Además, entre los propios reportajes con frecuencia se incluyen temas más directamente ligados al ámbito nuclear y radiológico: comités de información, radiación natural, fusión nuclear, protonterapia, minería de uranio, organismos internacionales de los que forma parte el CSN, IRRS, protocolo español de chatarras, protección radiológica en la enseñanza primaria y secundaria, mamografías, reactores de cuarta generación, centrales nucleares flotantes, el Cabril, convenciones internacionales, acuerdos de encomienda, cátedras del CSN y un larguísimo etcétera. Por otro lado, durante once números se pasó revista a las empresas o instituciones españolas más destacadas en innovación tecnológica nuclear, bajo el epígrafe común de *Tecnología nuclear española.* También se publicó durante 19 números (del 23 al 41) otra sección fija, denominada *El CSN*






*por dentro,* donde se contaba la labor que realiza cada área del organismo. Además, se incluye en cada número una sección más con etiqueta: *Ciencia con nombre propio,* donde se incluyen las biografías de científicos y científicas relevantes, especialmente quienes han destacado en la historia del descubrimiento de la radiactividad, las radiaciones ionizantes y de sus aplicaciones.

Especial relevancia se concede en cada número a la entrevista, entre las que predominan las realizadas a personalidades del mundo nuclear y radiológico, para empezar por los presidentes y consejeros del CSN, los tres directores generales del Organismo Internacional de Energía Atómica habidos en este tiempo, directores generales del Ciemat, del Instituto de Fusión Nuclear, de la ASN francesa, de la comisión de investigación de Fukushima, de la Comisión Nacional de la Energía, de Red Eléctrica, de la UME, de la Sociedad Nuclear Española, de Protección Civil e incluso de un ministro de Industria. Junto a ellos también han aparecido destacados científicos españoles, como Francisco Mojica, María Blasco, Joan Fuster, Mariano Barbacid, María José Blanco, José Manuel Sánchez Ron o María Martinón.

Más allá del debate sobre contenidos, la propia existencia de la revista ha sido a veces cuestionada. María Jesús González, miembro del Comité Asesor para la Información y Participación Pública del CSN, se pregunta si es un medio adecuado hoy día para la comunicación y si su contenido debería estar más centrado en la actividad del Consejo. Para Pedro Marfil, "la revista es otro canal de comunicación más que nos permite llegar a mucha gente alejada de nuestro entorno. No es un elemento esencial sino uno más, pero no detrae ni mucho tiempo ni fondos importantes del resto de actividades de comunicación y, por tanto, es útil, porque todas las herramientas que se puedan añadir son positivas".

También puede parecer que el formato en papel sea obsoleto, pero sigue siendo el preferido por una buena parte de los lectores. Y no impide que se haga una distribución específica a través del mundo virtual. "Se envía por correo electrónico en PDF, se sube a la web del Consejo, se puede leer cómodamente mediante la aplicación Calameo y se despieza para difundir los contenidos a través de las redes sociales, como Twitter y LinkedIn, para llegar a la gente más joven", explica Natalia Muñoz Martínez, asesora del Área de Comunicación del Consejo.

Cada formato permite alcanzar a diferentes públicos, pero cabe preguntarse a quienes llega la revista. El público objetivo está formado por miembros de asociaciones e instituciones de la sociedad civil, como sindicatos, industria y grupos ecologistas; cargos políticos y trabajadores públicos; pacientes y personal de los hospitales; políticos; estudiantes, periodistas... Este último grupo resulta de especial interés, dado que el Consejo, para bien y para mal, ejerce siempre una atracción especial entre los medios de comunicación y es importante que quienes vayan a cubrir la información sobre el mundo nuclear y radiológico conozcan la actividad que la institución realiza y la discriminen de la que realizan otras instituciones, asociaciones o corporaciones.

"Nuestra intención es que la opinión que los ciudadanos tengan sobre las actividades del Consejo sean opiniones informadas, por eso consideramos que la tarea de divulgación científica, tecnológica y ambiental es tan importante para nosotros. Debe facilitar un marco amplio en el que nuestro trabajo se comprenda mejor", concluye Ignacio Martín Granados.





Contenedor HI-STAR 100 en su posición de transporte.

# Experiencia en el licenciamiento de bultos de transporte de combustible gastado

Ante la falta de una instalación nuclear que pueda recibir los elementos combustibles gastados, las centrales españolas han recurrido, entre otras medidas, al uso de contenedores para su almacenamiento, para los que debe contemplarse una alternativa para su transporte posterior. Los diseños de los contenedores están evolucionando con el objetivo final de cargar todo el inventario almacenado. Esta evolución está suponiendo un aumento en la complejidad de los análisis de seguridad, con la incorporación de numerosas novedades metodológicas que implican, asimismo, una mayor dificultad en su evaluación por parte del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). En este artículo se describen los principales cambios en el diseño de los bultos de transporte en los últimos años y su impacto en el proceso de licenciamiento.

■ Texto: **García Leiva, Manuel; Alejano Monge, Consuelo; García Wolfrum, Alejandro** ■

El diseño de los bultos de transporte debe cumplir los requisitos definidos en los reglamentos modales de transporte (ADR, RID, Código IMDG e instrucciones técnicas del OACI), que incluyen los requisitos establecidos en el Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos del OIEA, Requisitos de Seguridad Específicos Nº SSR-6 [1], en el que se establecen normas funcionales en lugar de requisitos específicos de diseño, para demostrar que se cumplen las siguientes funciones de seguridad:

- El control de la tasa de dosis externa
- La contención del contenido radiactivo
- La prevención de los daños ocasionados por el calor
- La prevención de la criticidad

Su finalidad es permitir que el solicitante utilice prácticas de ingeniería aceptadas para evaluar un bulto de materiales radiactivos en todas las condiciones de transporte: rutinarias (libre de incidencias), normales (con pequeños incidentes) y de accidente). Los enfoques aceptables pueden incluir análisis de ensayos a escala o a tamaño real, cálculos y argumentaciones ra-

zonadas o una combinación de estos métodos.

Los ensayos asociados a bultos que contienen materiales radiactivos plantean una dificultad especial a causa del riesgo radiológico, por lo que en los análisis de seguridad suelen utilizarse modelos de cálculo, previamente validados, para garantizar el cumplimiento de los requisitos del Reglamento. Ante la falta de normativa específica en España, estos análisis se han llevado a cabo sobre la base de metodologías utilizadas en Estados Unidos y aceptadas por su organismo regulador, la Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Los modelos utilizados deben recoger con exactitud la geometría del bulto y las cargas mecánicas derivadas de los ensayos, y el contenido modelado debe representar conservadoramente las características más relevantes para los diferentes análisis de seguridad.

En el caso de combustible gastado, la normativa española requiere que el diseño del bulto de transporte, Tipo B(U)F, esté aprobado, siendo su período de validez de alrededor de 5 años.

El CSN ha editado la Guía de Seguridad 6.4 [2] con objeto de asegurar que se incluye en la solicitud toda la información del diseño del bulto, que permita garantizar el nivel de seguridad adecuado durante todas las condiciones de transporte, así como las características de seguridad y los controles operacionales necesarios para limitar la imposición de medidas especiales durante el transporte. De esta manera, la seguridad del transporte recae principalmente en el diseño del bulto.

## Evaluación de solicitudes de aprobación de diseño

El proceso de evaluación técnica que lleva a cabo el CSN sobre las solicitudes de aprobación de diseño de contenedores de transporte de combustible nuclear gastado examina los análisis soporte de seguridad presentados, incluyendo los modelos y las hipótesis iniciales, la metodología empleada y los resultados obtenidos, con el fin de verificar el cumplimiento de las funciones de seguridad (Figura 1).

Las características del combustible nuclear juegan un papel fundamental en su gestión, tanto en operación como posteriormente, cuando se convierte en combustible gastado.

El combustible (Figura 2) está formado por una matriz de barras constituidas por vainas de aleación de zirconio que contienen pastillas de óxido de uranio con un cierto porcentaje del isótopo U-235 (enriquecimiento), que es el que permite mantener la reacción de fisión nuclear. El combustible se considera gastado cuando es extraído permanentemente del núcleo de un reactor. Si además presenta defectos que comprometan su integridad, se califica como combustible dañado, debiéndose analizar su comportamiento de manera específica en los análisis de seguridad.

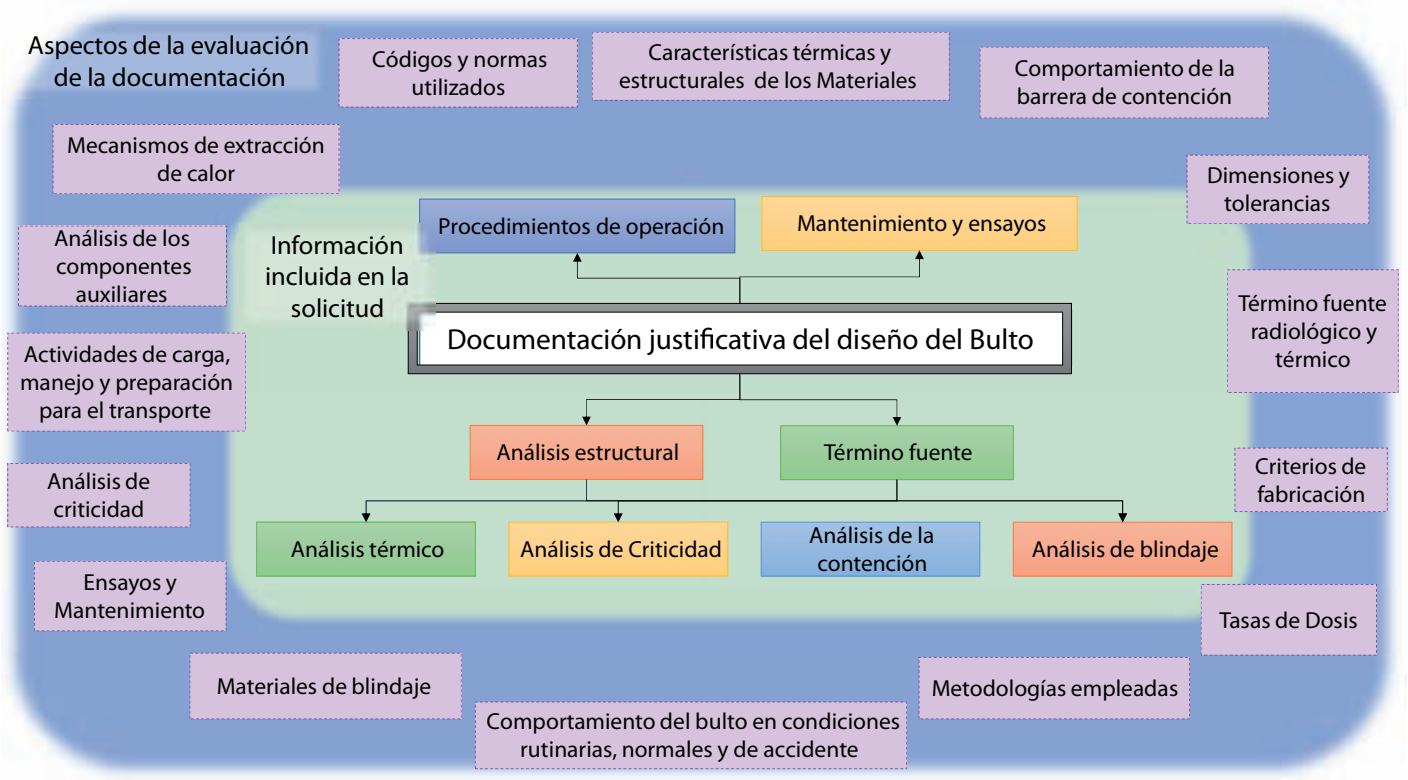



Figura 1: Aspectos de la evaluación de un bulto de transporte de combustible gastado.

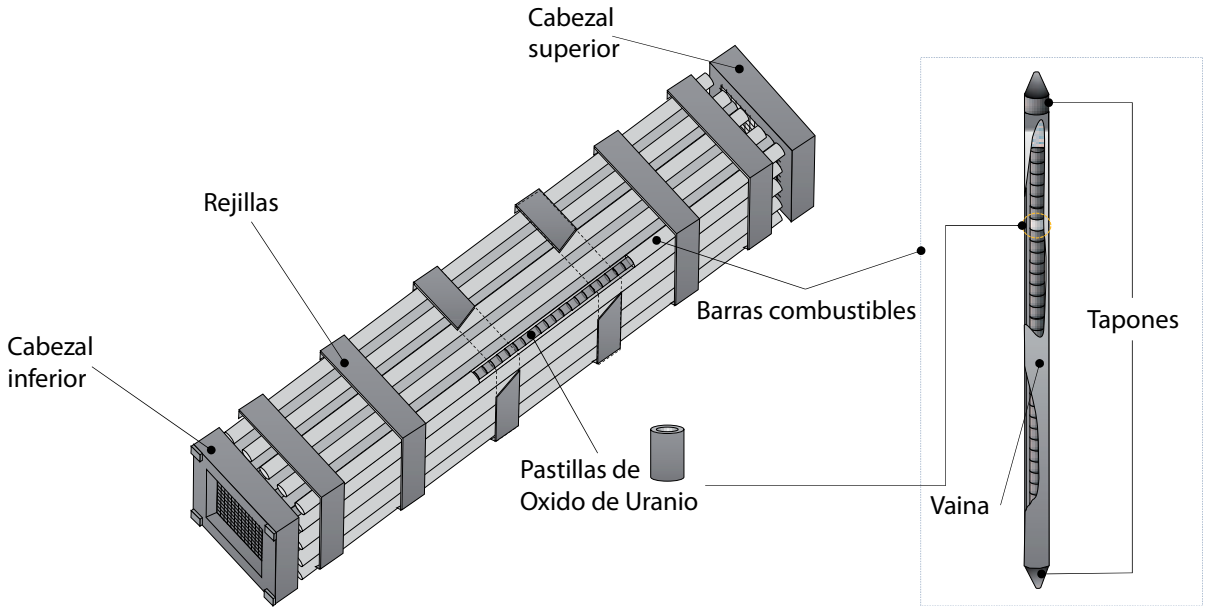



Figura 2: Esquema de elemento combustible

Uno de los parámetros más representativos para caracterizar un elemento combustible es el denominado "quemado", y representa la energía que ha producido por unidad de masa debido a la fisión nuclear durante su operación en el reactor (utilizándose como unidad el megavatio día por tonelada métrica de Uranio -MWd/TmU).

Los quemados de descarga han ido aumentando a lo largo de los años desde unos valores iniciales del orden de 28000 MWd/TmU en reactores de agua en ebullición (BWR) y 33000 MWd/TmU en reactores de agua a presión (PWR), hasta los valores actuales en torno a 55000-60000 MWd/TmU para ambos (Figura 3). Para poder conseguirlo, se ha ido aumentando el enriquecimiento inicial del combustible de un 2 % en peso a cerca del 5 % (Figura 4).

**Tabla 1**

| Tipo de contenedor/ Tipo de contenido | Modelo | Aprobación inicial (revisión vigente) | Puesta en marcha ATI (inicio de carga) | Máximo quemado medio de combustible (MWd/TmU) |
|---|---|---|---|---|
| EECC PWR | ENSA/DPT | 1997 (Rev. 5) | 2001 -CNTRI- (2003) | 49000 |
| EECC BWR | ENUN 52B | 2015 (Rev. 1) | 2018 -CNSMG)-(-) | 37500 |
| EECC PWR | ENUN 32P [1] | 2016 (Rev. 1) | 2001 (CNTRI) (2018) | 58000 |
| | | | 2018 (CNALM) (2018) | 45000 |
| EECC PWR | ENUN 24P | 2017 (Rev. 0) | (no usado en España) | 57000 |
| EECC BWR | HI-STAR 150 | 2022 (Rev. 0) | 2021 (CNCOF) (2021) | 55000 |
| EECC PWR | HI-STAR 100 [2] | 2009 (Rev. 3) | 2008 (JCA)(2009) [3] | 45000 |
| EECC PWR | | 2012 (Rev. 3) | 2013 (CNASC) (2013) [3] | 55000 |
| Residuos de alta actividad | | 2015 (Rev. 3) | 2008 (JCA)(2013) [3] | N/A |

[1] Dos tipos de contenido licenciado correspondiente a las centrales CN Almaraz (CNALM) y CN Trillo (CNTRI).
[2] Tres tipos de contenido licenciado: dos, de combustible de las centrales CN José Cabrera (CNJCA) y CN Ascó (CNASC), y uno de residuos de alta actividad de CNJCA. Revisión vigente de 2021.
[3] Se utilizan contenedores específicos de almacenamiento: HI-STORM 100Z (para CNJCA), HI-STORM 100 (CNASC) y HI-SAFE (residuos de alta actividad de la CNJCA).

Aunque las razones fundamentales del incremento del quemado de descarga han sido económicas, ello ha permitido la reducción de la cantidad de combustible gastado generada. Esto permite aumentar el margen de tiempo disponible para la planificación de la fase siguiente de su gestión, que durante un tiempo se ha asumido que iba a ser un almacén temporal centralizado, ya contemplado en el 5º Plan General de Residuos Radiactivos de 1999 [3].

Sin embargo, dado que esta instalación no se ha puesto en marcha en los plazos previstos, las centrales nucleares se han visto obligadas a ir aumentando su capacidad de almacenamiento de combustible gastado; entre otras, medidas mediante la construcción de almacenes temporales individualizados (ATI) en los propios emplazamientos, donde se emplean contenedores de almacenamiento de elementos combustibles (EECC).

En España, para la aprobación del uso de contenedores en un ATI de una central se debe garantizar que dichos contenedores puedan transportarse hasta una instalación temporal o definitiva (contenedores de doble propósito), o se disponga de una alternativa para transportar su contenido (bultos específicos de transporte).

La tabla 1 recoge los contenedores aprobados en España y las diferentes instalaciones donde se emplean. En general, los contenedores se diseñan para maximizar la cantidad de EECC cargados con objeto de reducir en lo posible su número, los costes asociados a su gestión y las dosis operacionales durante su manejo y transporte, manteniendo sus funciones de seguridad.

## Evolución de la normativa en Estados Unidos

En relación con el aumento del grado de quemado, no se podría entender la evolución de los procesos de licenciamiento en España sin conocer la evolución de la normativa en Estados Unidos. Para quemados inferiores o iguales a 45000 MWd/TmU, la NRC considera que existe una base experimental técnica suficiente como para concluir que los daños por irradiación en el combustible no afectan apreciablemente las propiedades mecánicas del mismo.

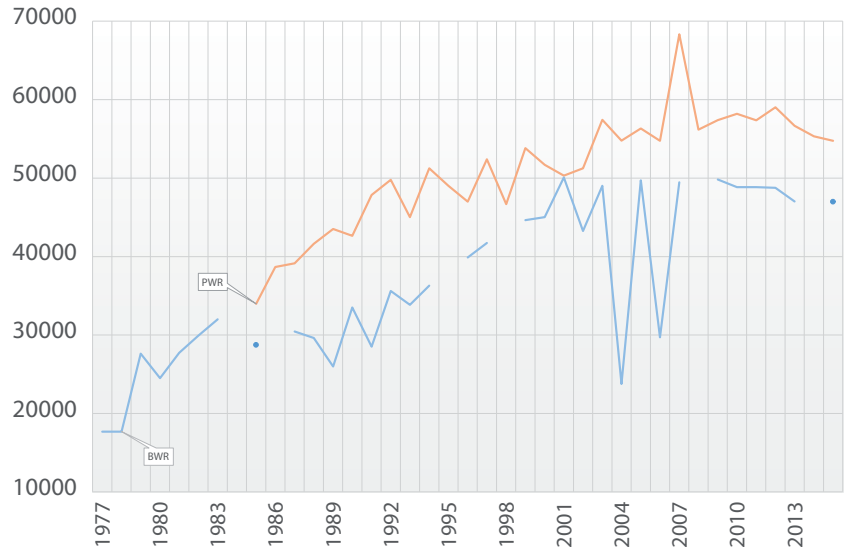



Figura 3: Evolución del quemado máximo de descarga en el parque de centrales nucelares españolas.

A medida que aumenta el quemado por encima de dicho valor (combustible de alto quemado), los daños por irradiación ya no pueden considerarse directamente despreciables debido a efectos como el aumento de la corrosión y la hidruración de la vaina, la mayor liberación de gases de fisión en el interior de la vaina y las deformaciones más acusadas del esqueleto del combustible.

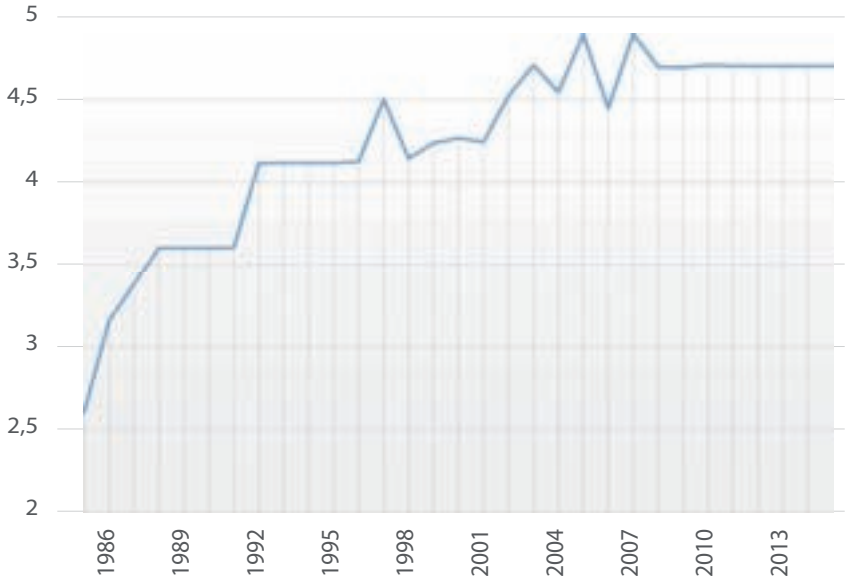



Figura 4: Evolución del enriquecimiento inicial máximo del combustible

La combinación de todos ellos puede producir un considerable impacto en las propiedades mecánicas del combustible, que son utilizadas como datos de entrada en los diferentes análisis de seguridad.

La aparición, durante la operación comercial del combustible, de defectos en los EECC se fue solventando con modificaciones de diseño de los mismos (p.ej., se redujo la presión interna inicial de vaina o se cambió el material de las mismas). No obstante, cierto número de EECC gastados del inventario actual de las piscinas españolas presenta defectos (exfoliación de la capa de óxido de la vaina —*spalling*—, corrosión localizada inducida por depósitos de crud —CILC—, agrietamiento intergranular por corrosión bajo tensión —IGSCC— en los manguitos de unión con el cabezal superior, etc...), que pueden afectar al cumplimiento de las funciones de seguridad en las fases posteriores de almacenamiento y transporte.

Tratando de aclarar cuestiones de licenciamiento no recogidas en su regulación, la NRC publicó diferentes revisiones de la Interim Staff Guidance ISG-11 Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel [4]. En la revisión 3 de la misma, se requirió la utilización de las características mecánicas reales del combustible de alto quemado en los análisis de seguridad y, dado que el nivel de daño del material de vaina depende de la composición y del proceso de fabricación así como del historial de irradiación, estableció la necesidad de que los procesos de licenciamiento asociados al transporte de este combustible se abordaran caso a caso, hasta la emisión de regulación que recogiera su tratamiento de una manera general.

En noviembre de 2020, la NRC publicó el NUREG 2224, Dry Storage and Transportation of High Burnup Spent Nuclear Fuel [5]. Su objetivo fue establecer nuevos requisitos de licenciamiento soportados por la base técnica actualizada sobre el comportamiento del combustible nuclear gastado de alto grado de quemado.

Este documento recoge una descripción de los resultados de los programas de investigación sobre el comportamiento mecánico del combustible de alto grado de quemado desarrollados hasta el momento de su edición y presenta ejemplos de enfoques para la concesión de licencias para su almacenamiento y transporte en EE. UU. En concreto, proporciona un planteamiento regulador diferenciado para el licenciamiento del almacenamiento y transporte de EECC almacenados durante menos de 20 años y otro para cuando se superan estos 20 años. En este último caso se requiere la demostración del cumplimiento de las funciones de seguridad aplicando propiedades mecánicas del combustible adecuadas al estado del mismo, basadas en resultados

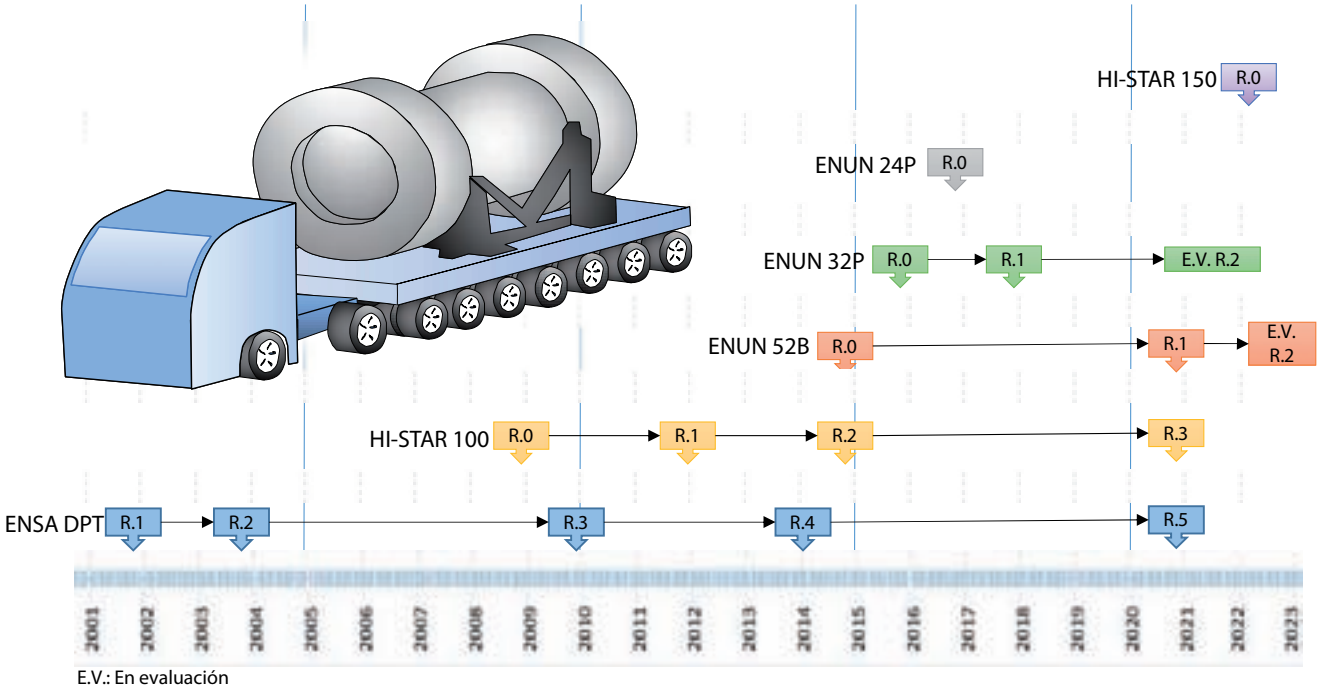



Figura 5: Licenciamientos de diseños de bultos de transporte de combustible gastado en España.

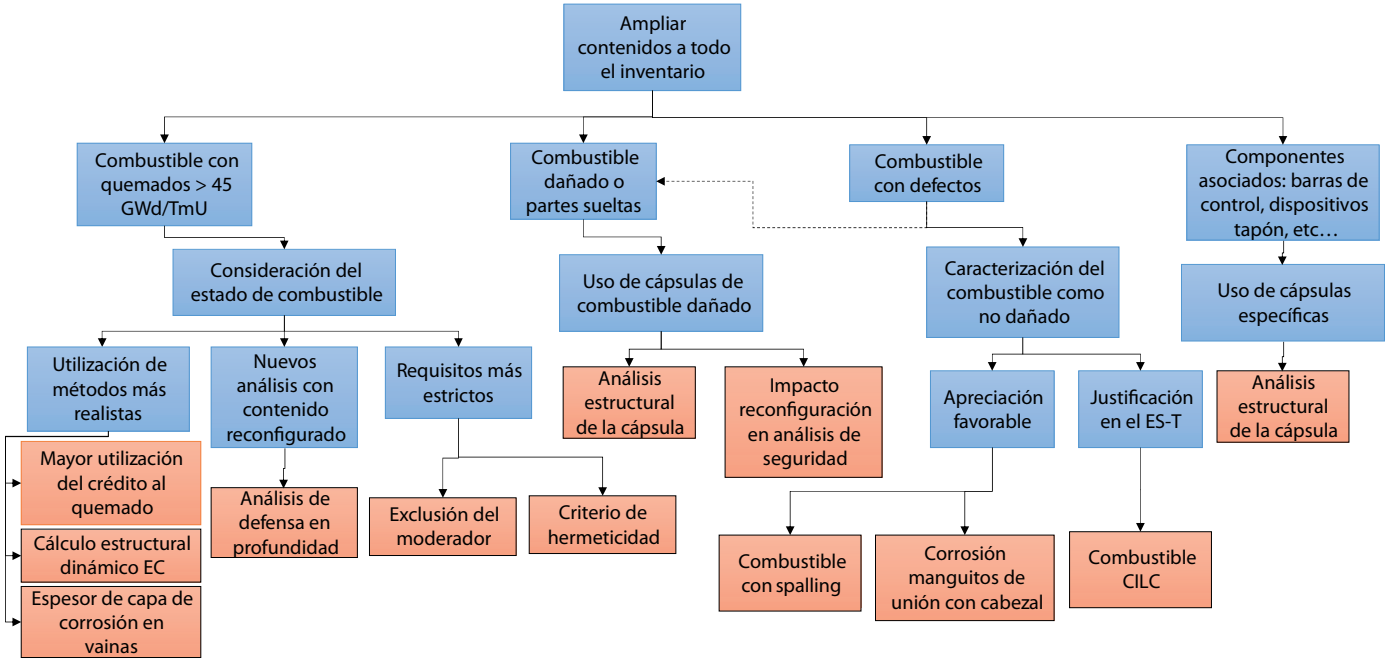



Figura 6: Impacto de la ampliación del contenido a todo el inventario sobre los análisis de seguridad.

experimentales, o considerando en los análisis de seguridad la pérdida de integridad del combustible, analizando escenarios con reconfiguración geométrica del combustible dentro del contenedor.

La falta de conocimiento del estado real del combustible de alto quemado, y de su comportamiento en condiciones de almacenamiento a largo plazo y posterior transporte, se refleja en el conservadurismo de los análisis de seguridad requeridos.

## Evolución del licenciamiento de contenedores en España

En España, las actividades de licenciamiento de contenedores de transporte de combustible gastado se han multiplicado en los últimos años (Figura 5) por dos motivos principalmente: la diversidad de los diseños de bulto y las modificaciones de los mismos para la ampliación del contenido licenciado al inventario almacenado en las piscinas.

El objetivo del primer diseño de contenedor (ENSA-DPT) licenciado en España fue evitar el llenado de la piscina de combustible gastado de la central nuclear de Trillo, de diseño alemán y capacidad reducida con respecto al resto de centrales españolas, de diseño americano, y la consecuente limitación de la operación de la planta.

En un primer momento, el contenido autorizado se ajustaba a un combustible no dañado, con quemados inferiores a 45000 MWd/TmU. Para este tipo de combustible, en un contenedor con una capacidad de 21 EECC, los análisis de criticidad y estructural consideraban las condiciones de combustible fresco en cuanto al enriquecimiento y a las propiedades mecánicas. En los diversos análisis de seguridad se aplicaron metodologías muy conservadoras, que simplificaban los cálculos y, por tanto, la evaluación del CSN. Desde entonces, los nuevos diseños de contenedores se han orientado a ampliar los contenidos a todo el inventario almacenado en las piscinas de EECC gastados, contemplando quemados cada vez mayores, combustible con defectos o dañado, y componentes asociados al combustible (Figura 6).

### Combustible dañado y componentes asociados

Previamente a su carga en un contenedor, debe realizarse una caracterización del combustible que permita su clasificación como combustible dañado o no-dañado. En el caso de que el combustible se clasifique como dañado debe cargarse en cápsulas o estuches específicos, autorizados en determinadas posiciones del contenedor, que garantice el cumplimiento de las funciones de seguridad

en cualquier condición de transporte. Se requiere la demostración de la capacidad estructural de esta cápsula, en cuyo interior debe considerarse el modelo de combustible dañado con el consiguiente impacto en los diferentes análisis de seguridad.

Por otra parte, dentro del inventario almacenado en las piscinas existen aditamentos de combustible tales como barras de control, dispositivos tapón, etcétera, que por sus características radiológicas están considerados como residuos de alta actividad. La carga de este tipo de material radiactivo como contenido autorizado en los contenedores licenciados se realiza en cápsulas similares a las de combustible dañado, o en los propios EECC.

**Combustible con defectos**

Una parte no despreciable del combustible almacenado en las piscinas presenta defectos producidos durante su operación comercial. Como ejemplo cabe destacar el combustible con *spalling*, el afectado por CILC, o el que presenta IGSCC en los manguitos de unión del cabezal. El combustible con defectos se considera inicialmente como dañado, al existir una incertidumbre en su comportamiento durante el almacenamiento a largo plazo y posterior transporte. Sin embargo, a la hora de decidir la clasificación de los EECC para su gestión, se ha evolucionado en la línea de la rev.2 de la ISG-1 [6], que basa dicha clasificación en la capacidad del EC para cumplir con sus funciones de seguridad, en lugar de fundamentarla en la tipificación del defecto. Esto permite clasificar los EECC con determinados defectos como no dañados, una vez demostrado mediante metodologías de análisis de seguridad aprobadas que, pese al defecto, cumplen con sus funciones de seguridad.

Desde el punto de vista del licenciamiento en España, este proceso se ha llevado a cabo mediante análisis específicos incluidos en los estudios de seguridad del bulto (como el caso de combustible con CILC en el contenedor HI-STAR 150) o mediante metodologías específicas, que han sido apreciadas favorablemente por el CSN siguiendo el artículo 82 del RINR [7]. Estas metodologías pueden ser evaluaciones de seguridad adicionales. Por ejemplo, combustible con *spalling* dentro de ciertos límites de Ascó en el contenedor HI-STORM 100/HI-STAR 100 (2018, 2020) y de Almaraz en el contenedor ENUN 32P (2021) o modificaciones del EC mediante la instalación de componentes adicionales que permiten el cumplimiento de las funciones de seguridad del combustible —como el dispositivo ESPIGA (2017)—, y el manejo mediante medios normales de los EECC afectados por IGSCC de los cabezales.

**Combustible de alto quemado**

El licenciamiento en España de algunos diseños de contenedores de almacenamiento y transporte se ha solapado con el proceso de revisión de normativa que se ha llevado a cabo en EE.UU., descrito anteriormente. En la actualidad el CSN acepta parcialmente el camino de licenciamiento definido en el NUREG 2224, con la consideración del impacto de la reconfiguración geométrica del combustible en los análisis de seguridad, en el caso de EECC de alto quemado, para solicitudes con un período de almacenamiento superior a 20 años, o de transporte después de más de 20 años de almacenamiento previo.

Dada la complejidad de esas evaluaciones, con reconfiguración de combustible de alto quemado, y el tiempo que conllevarían, el CSN limitó inicialmente el alcance de sus evaluaciones a combustible almacenado con menos de 20 años, con objeto de permitir analizar los resultados de los análisis experimentales que se estaban realizando en EE.UU. para más de 20 años. Esta condición permitió acortar los procesos de licenciamiento en marcha, difiriendo en el tiempo la evaluación del combustible almacenado con más de 20 años. Este tipo de evaluaciones se están comenzando a abordar en la actualidad.

El límite considerado por la NRC para considerar el combustible como de alto quemado, no es un límite internacionalmente reconocido, siendo más realista disponer de un criterio basado en las características mecánicas del combustible (ductilidad de la vaina).

A efectos de valores de propiedades mecánicas del combustible, el CSN ha aplicado este valor límite de quemado (45000 MWd/TmU) para todo el combustible de centrales con diseño americano. Sin embargo, en el caso de Trillo, el límite de alto quemado se ha establecido en un valor superior, teniendo en cuenta las características de diseño de su combustible. Esto ha dado lugar a un proceso de evaluación novedoso durante el licenciamiento, originando limitaciones específicas sobre los EECC gastados de esta central, en función del material de vaina utilizado.

La consideración de los efectos de los quemados altos ha dado lugar a modificaciones relevantes en los datos de entrada de los análisis de seguridad, que han supuesto reducciones del conservadurismo inicial, con el consiguiente aumento de la complejidad de los análisis y de la correspondiente evaluación. Para cumplir con los criterios de aceptación ha sido necesario revisar algunas metodologías, que están relacionadas con:

- El establecimiento de valores de espesor de corrosión de vaina en función del material y del historial de irradiación.

- La utilización de planteamientos más realistas en los cálculos estructurales, que demuestran el mantenimiento de la integridad geométrica del combustible, abandonando el empleo inicial de metodologías más simples y conservadoras.
- El establecimiento de criterios de aceptación más restrictivos en relación con los análisis de la contención para garantizar la hermeticidad, como consecuencia de la falta de datos técnicos sobre el término fuente en la atmósfera interior del contenedor.
- La consideración de una posible reconfiguración del combustible con el consiguiente impacto en los análisis de seguridad, que ha supuesto nuevas aproximaciones metodológicas, como, por ejemplo, garantizar la exclusión del moderador (imposibilidad de entrada de agua en el interior del contenedor), con las implicaciones de diseño necesarias.
- La revisión de las metodologías de análisis de criticidad con crédito al quemado, incluyéndose nuevos actínidos y productos de fisión convenientemente validados en las composiciones isotópicas aplicadas.

Por otro lado, algunos diseños de bulto han presentado enfoques metodológicos novedosos para garantizar la seguridad del diseño, respaldados por una serie de análisis complementarios adicionales, como, por ejemplo, cierto grado de reconfiguración del combustible. Estos análisis, denominados de "defensa en profundidad", constituyen en su conjunto una capa de seguridad complementaria, que pretende cubrir de manera razonable la posibilidad extrema de una situación no contemplada en la base de diseño, demostrando que el bulto sigue siendo seguro.

## Conclusiones

La gestión del combustible gastado en España ha ido evolucionando a lo largo de los años, pasando de solucionar problemas puntuales (saturación de algunas piscinas de combustible gastado) a gestionar el inventario completo, a través de la construcción de almacenes temporales individualizados de combustible en contenedores, que deberán transportarse en un futuro.

El incremento del quemado de descarga del combustible nuclear, junto con las circunstancias asociadas que se venían dando en paralelo (combustible con defectos, combustible dañado, incertidumbres en las características de las vainas...) han dado lugar a la evolución de los diseños de los bultos de transporte de combustible gastado y de los análisis que soportan su seguridad. De esta manera, los análisis de seguridad presentados para licenciamiento han sufrido modificaciones que han debido evaluarse específicamente, incluyendo la utilización de nuevas metodologías más realistas para demostrar el cumplimiento de requisitos reglamentarios y consideraciones más novedosas.

El CSN ha tenido que aprobar cada diseño, con el consiguiente aumento de las necesidades de recursos de evaluación y de las interacciones con el titular para solicitar aclaraciones o información adicional. Como resultado de estos procesos de licenciamiento, se han impuesto condiciones en los certificados de aprobación, que han afectado principalmente al contenido licenciado, y que no habían sido necesarias en los diseños iniciales, aptos sólo para una parte del inventario. Estas condiciones incluyen limitaciones adicionales de los quemados propuestos para el combustible, el establecimiento de un período máximo de almacenamiento antes de transporte (limitación a 20 años), e incluso la imposición de limitaciones específicas del espesor de la capa de óxido presente en las vainas del combustible en función del material utilizado.

Además de las evaluaciones de diseño de bulto, las condiciones del inventario de combustible han conducido a nuevos procesos de licenciamiento, con apreciaciones favorables de metodologías específicas asociadas al estado y clasificación del combustible, que se han utilizado posteriormente en los diseños de contenedores de almacenamiento o bultos de transporte. Este conjunto de procesos de licenciamiento, con el objetivo común de permitir el almacenamiento del inventario completo en cada ATI y garantizar su transporte posterior, supone un reto para el CSN, tanto por el volumen de solicitudes presentadas como por la complejidad técnica y lo novedoso de las mismas.

## Referencias


[1] OIEA; Reglamento para el Transporte Seguro de Material Radiactivo, revisión 1; SSR-6; 2018.

[2] CSN; "Documentación para solicitar autorizaciones en el transporte de material radiactivo, aprobaciones de bultos y autorización de expediciones de transporte"; Colección Guías de Seguridad GS 6.04

[3] Ministerio de Industria y Energía; Quinto Plan General de Residuos Radiactivos, 1999.

[4] NRC; "Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel"; Interim Staff Guidance - 11, Revisión 3, noviembre, 2003.

[5] NRC; "Dry Storage and Transportation of High Burnup Spent Nuclear Fuel"; NUREG 2224; noviembre, 2020.

[6] NRC; "Classifying the Condition of Spent Nuclear Fuel for Interim Storage and Transportation Based on Function"; Interim Staff Guidance – 1, Rev.2 mayo, 2007.

[7] Real Decreto 1836/1999 por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas; BOE núm. 313, de 31 de diciembre de 1999

# Proceso de notificación de sucesos de instalaciones radiactivas al CSN

Texto: **Arturo Fernández García** | Área de Comunicación del CSN

Sucesos radiológicos son aquellos que afectan a estructuras, sistemas, equipos o componentes de las instalaciones radiactivas y que, de forma real o potencial, pueden producir riesgo de exposición indebida al público, a los trabajadores o al medio ambiente.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) dispone de una Instrucción (IS-18) que recoge los criterios de notificación de estos sucesos exigidos a los titulares de las instalaciones radiactivas cuando ocurran en el ámbito de su instalación. Es de aplicación a todas las instalaciones radiactivas en funcionamiento en España, entendiendo por tales las de cualquier clase que contengan una fuente radiactiva, los aparatos productores de radiaciones ionizantes que funcionen a una diferencia de potencial superior a 5 kilovoltios y los locales, laboratorios, fábricas e instalaciones donde se produzcan, utilicen, posean, traten, manipulen o almacenen materiales radiactivos, excepto el almacenamiento incidental durante su transporte.

Las instalaciones se clasifican en tres categorías, en función del riesgo radiológico asociado a los equipos o materiales radiactivos que utilizan o almacenan. Las de primera categoría son las que comportan un mayor riesgo potencial, las de segunda tienen un riesgo intermedio y las de tercera un riesgo bajo.

Dentro de la notificación de los sucesos se excluyen los sucesos ocurridos en instalaciones con equipos de rayos X para diagnóstico médico, salvo los que sean de aplicación por estar incluidos en el criterio de exposición externa al que se hace referencia. Además, se excluyen aquellos sucesos ocurridos en el transcurso de las exposiciones médicas, siempre y cuando en el suceso no se hubiera producido ningún fallo por pérdida de barreras, degradación de sistemas, fallo de equipo o de procedimiento de protección radiológica operacional o se pudiera haber producido una exposición a terceros.

Las notificaciones al CSN pueden hacerse por teléfono pero posteriormente den realizarse por escrito e incluir la información indicada en la infografía.

## Criterios de notificación

Los sucesos notificables siguen unos plazos establecidos, que pueden ser de 24 horas o de una hora. Entre los primeros se incluyen aquellos que se producen en la instalación radiactiva y que, aunque puedan tener consecuencias radiológicas sobre las personas, dependencias, equipos o medio ambiente, no requieren la intervención inmediata desde el exterior.

Dentro de los sucesos notificables al CSN en 24 horas están, entre otros, los relacionados con exposiciones externas y contaminación que cualquier trabajador expuesto o miembro del público haya podido recibir y que sobrepase los límites establecidos en la legislación española, los operacionales donde exista un riesgo potencial de recibir una dosis indebida por fallo de algún equipo o error humano y la liberación de material radiactivo por pérdida de hermeticidad de la fuente, del vial o cualquier otro sistema de contención que den lugar a zonas de contaminación. Asimismo, se debe notificar cualquier aparición o desaparición de fuentes radiactivas encapsuladas de categoría 4 o cualquier suceso en el que el titular estime que se ha producido un fallo de control del material radiactivo o de los medios que garantizan la seguridad física de la instalación.

Por su parte, aquellos que deben notificarse en el plazo de una hora son los que se producen en la instalación radiac-



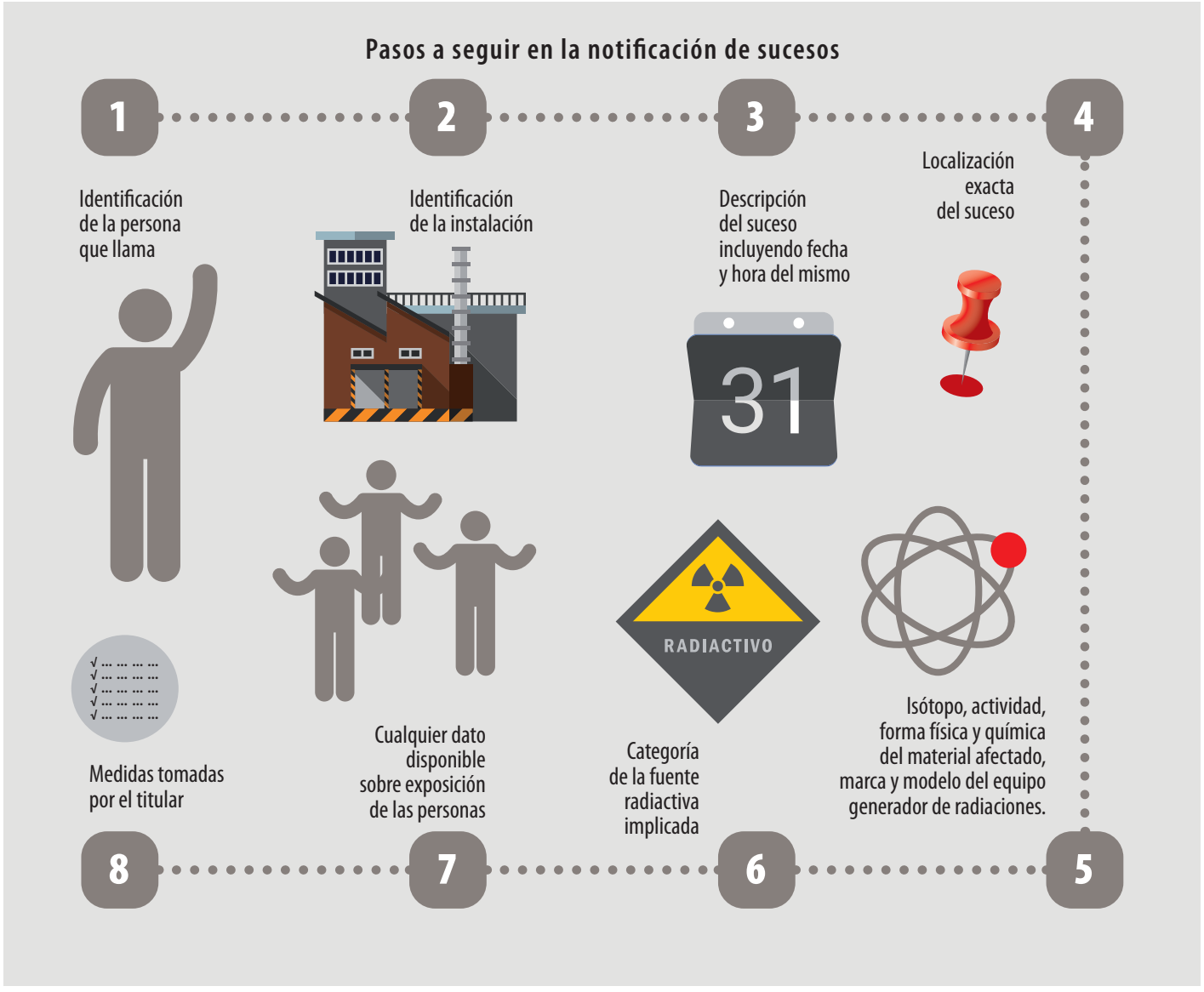
Equipo troxler para la medición de la humedad y la densidad del suelo, semejante al sustraído en marzo pasado.

tiva y que pueden precisar de intervención exterior, como policía o bomberos.

Los sucesos notificables en una hora pueden estar relacionados con sucesos internos a la instalación, cuyo control no está garantizado en algún momento y pueden constituir una amenaza para la seguridad, como un incendio con una duración superior a diez minutos, inundaciones internas cerca de la ubicación de los equipos o material radiactivo o liberación de sustancias tóxicas o explosivas. Los sucesos externos notificables en una hora están relacionados con fenómenos naturales que puedan constituir una amenaza para la seguridad de la instalación, tales como vientos o precipitaciones intensas, incendios no controlados próximos a la instalación, emisión de sustancias tóxicas o explosiones ocurridas en las proximidades.

Estos sucesos pueden estar relacionados con la seguridad física, como la desaparición (por pérdida o robo) o aparición de fuentes radiactivas de categoría 1, 2 o 3, como las que se usan en teleterapia: irradiadores, gammagrafía industrial, controles de procesos industriales, equipos de braquiterapia de alta tasa de dosis o sondeos. También se incluye dentro del criterio de notificación en una hora la amenaza a la seguridad física, como los intentos de intrusión o sabotaje de la instalación, degradación intencionada de la misma, bloqueos de acceso o amenaza de bomba.

De esta manera queda establecido el proceso de notificación al CSN, tanto en 24 horas como en una hora, dependiendo de su alcance e importancia, de los sucesos ocurridos en las instalaciones radiactivas, que tendrán la obligación de ser comunicados por teléfono en los tiempos mencionados.



Atapuerca es hoy un nombre clave en la investigación sobre los orígenes y evolución de nuestra especie de todo el mundo, que ha proporcionado las mayores y mejores concentraciones de homínidos de diferentes etapas del último millón de años. A su calor, la cercana ciudad de Burgos alberga dos instituciones punteras ligadas a los yacimientos, el Museo de la Evolución Humana y el Centro Nacional de Investigaciones en Evolución Humana (CENIEH). Este último está dirigido en la actualidad por María Martinón Torres (Orense, 1974), una licenciada en Medicina por la Universidad de Santiago de Compostela que desde el inicio de su actividad profesional se orientó hacia la paleoantropología. Aún no había terminado la carrera cuando, de la mano del catedrático Ángel Carracedo, se inició en la extracción de ADN de restos óseos antiguos. Luego hizo un máster en Antropología y Evolución Humana en Bristol (Reino Unido). El siguiente paso lo dio tras conocer a José María Bermúdez de Castro, codirector del Proyecto Atapuerca, que dirigió su tesis doctoral, junto a Carracedo, sobre Evolución del aparato dental de los homínidos. A lo largo de su trayectoria ha realizado aportaciones clave, como el hallazgo de un metatarso humano de 1,8 millones de años de antigüedad y el molar de un homínido que vivió hace dos millones de años, el resto humano más antiguo hallado fuera de África, ambos en Georgia. Luego, en diferentes trabajos en Asia, África y Europa, sobre todo en Atapuerca y especialmente sobre *Homo antecessor,* supuesto antepasado común de neandertales y *Homo sapiens.* Uno de los más recientes, el estudio de un niño de tres años de edad que fue enterrado en una cueva en Kenia hace 78.000 años, el caso más antiguo de enterramiento hallado en África.

## María Martinón, directora del Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana

# "De alguna manera, la compasión también fosiliza"

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** | Periodista de ciencia ■

**PREGUNTA:** *¿Qué le aporta a una paleoantropóloga haber estudiado medicina?*

**RESPUESTA:** Yo creo que proporciona un conocimiento base para entrar luego en un campo más específico, con aspectos como la anatomía, la fisiología, la embriología, la bioquímica, que son fundamentales en paleoantropología para 'devolver la vida' a los fósiles. Porque lo que intentamos es saber cómo eran cuando vivían. Nosotros hacemos una especie de deconstrucción hacia atrás en el tiempo. Y también aportamos una noción clave, que es la identificación de las enfermedades, una perspectiva que siempre ha sido vista como anecdótica pero que es crucial porque te proporciona una visión directa en el registro fósil de la lucha

por la adaptación y la supervivencia. La identificación de sus patologías nos dice cuáles eran las debilidades de cada grupo humano.

**P:** *De la enfermedad trata también su libro, recién aparecido,* Homo imperfectus *¿no?*

**R:** Trata del papel de lo que a veces llamamos imperfecciones o defectos, que esconden claves adaptativas y muestran el desajuste entre nuestro estilo de vida y el ambiente en que se originó nuestra especie, ya no somos cazadores recolectores que viven al aire libre. Y también habla de por qué la selección natural no ha eliminado todos esos defectos, por qué sigue habiendo cáncer o enfermedades neurodegenerativas. Son efectos colaterales de la evolución relacionados con la longevidad, porque están fuera de la selección natural al afectar a etapas post-reproductivas. Vivimos muchos más años que cualquier otra especie de primate, algo que sí ha propiciado la selección natural, pero también estamos sometidos a ambientes nuevos, con exposición a toxinas y teratógenos que no existían y nuestro cuerpo no ha tenido tiempo para adaptarse. Y explica por qué hay tantas alergias. Probablemente porque nuestro sistema inmune está optimizado para defendernos de parásitos que ahora ya han desaparecido y queda un exceso de respuesta colgando.

**P:** *La diabetes también es consecuencia de esos cambios.*

**R:** En especies longevas, como humanos y también delfines, se ha visto que ese alargamiento de la vida ha sido a costa de una mayor vulnerabilidad en el ciclo de regulación de la insulina, y además son más propensas a padecer alzheimer. Ocurre que algunas mutaciones pueden significar un beneficio para la especie, aunque sea un perjuicio para algunos individuos. Son los aranceles a pagar por la longevidad conseguida. Los cambios que hemos introducido han sido tan rápidos que subsisten mecanismos adaptativos que hoy no tienen sentido, como la fobia a las arañas y las serpientes. Se han hecho experimentos con niños de entre unos meses y dos años, a los que se muestran imágenes diversas y reaccionan con alerta ante la foto de una araña. Es algo instintivo, heredado, que no han aprendido.

**P:** *Usted está especializada en restos dentales y resulta sorprendente la cantidad de información que se puede obtener de ellos.*

**R:** Los dientes son los restos más abundantes, porque el esmalte es el tejido más duro del cuerpo y por tanto son los que mejor se preservan. En muchos casos únicamente disponemos de dientes. Y eso nos permite hacer un recorrido muy completo y amplio en el tiempo y en la geografía. Además, en los dientes no existe lo que se llama remodelación ósea; es decir, los huesos largos van a cambiar según el estilo de vida que tengamos: no es lo mismo el fémur de una persona que hace ejercicio que el de otra que no. Los dientes solo cambian por rotura, caries y desgaste. Tienen una serie de cúspides y surcos que son heredados y que son bastante con-



CENIEH

servadores en ese sentido y que no cambian con el estilo de vida. Esas características, que nosotros estudiamos minuciosamente reflejan su carga genética; podemos comparar individuos y deducir el nivel de parentesco, y como son muy conservadores, nos permiten caracterizar la especie a la que perteneció, que sería la taxonomía, y cómo se relaciona con otras especies, que sería la filogenia.

**P:** *Incluso permiten saber que el chico de Gran Dolina al final resultó ser chica.*

**R:** Claro, eso es muy interesante, porque eso es una línea que estamos desarrollando ahora, donde la medicina también me ha aportado mucho y que sería una aplicación forense. Los dientes están formados por dos tejidos, el esmalte y la dentina, que está debajo del esmalte. Hoy sabemos que la proporción de esos tejidos es característica y diferente en los grupos. Los neandertales tienen un esmalte relativamente muy fino y mucha dentina y nosotros, los sapiens, al contrario. Al estudiar esas proporciones de forma minuciosa vimos que también hay diferencias entre hombres y mujeres, de manera que los hombres tienen, como los neandertales, un esmalte relativamente fino sobre una dentina más grande y las mujeres tienen una dentina más pequeña y un esmalte relativamente más grueso. En el Grupo de Antropología Dental hemos desarrollado fórmulas para poblaciones actuales que permiten determinar el sexo de un resto con una certeza del 90%. Ahora estamos trabajando para ver si permite también determinar la edad.

**P:** *Los dientes también permiten saber la alimentación que tenían ¿no?*

**R:** Sí, podemos estudiar la dieta a partir del tipo de desgaste y micro desgaste. Dependiendo del uso que se haga de él se producen diferentes tipos de estrías microscópicas que quedan en la superficie. El esmalte permite saber si consumía mucha carne o tenía una dieta más vegetal. Además, el esmalte atrapa isótopos estables que nos indican si las plantas consumidas eran del tipo C3 o C4 (dos vías metabólicas de la fotosíntesis características de diferentes tipos de plantas) y por tanto el ambiente en el que se desenvolvía esa especie. Las plantas de tipo C3 se dan sobre todo en ecosistemas de altitudes altas y latitudes elevadas, como árboles, arbustos y plantas herbáceas, mientras que las de C4 son de ambientes más tropicales. Nos dan mucha información sobre el ambiente, la alimentación y los patrones de movilidad.

**P:** *Resulta sorprendente que de hallazgos aparentemente sencillos se puedan sacar conclusiones de tipo cultural o de creencias. Por ejemplo, que a partir de un bifaz hallado en la* Sima de los Huesos *se deduzca que era una forma de ritual. ¿No es excesivamente especulativo?*

> *"A través de simples huesos y piedras, puedes inferir una serie de atributos humanos"*

**R:** Estudiar cosas que por sí no fosilizan es uno de los grandes retos que tenemos. El comportamiento no fosiliza el cerebro no fosiliza, la compasión no fosiliza. ¿O sí? Porque puede hacerlo a través del impacto que tiene en la evidencia que nosotros encontramos. En el caso de la *Sima de los Huesos,* tras estudiar las marcas que hay en los huesos de la treintena de cuerpos acumulados, si están completos o partidos, si han sido comidos por un animal o están mordidos, y estudiando la geología del yacimiento, se puede deducir que es una acumulación intencional. Y que aparezca una única herramienta de piedra singular, la hipótesis más parsimoniosa es la excepcional, es decir, que podría haber algo de ritual. La manera en la que aparece un cuerpo o el contexto en el que aparece ya te va a dar información sobre el comportamiento de ese grupo.

**P:** *En el caso del niño enterrado en Kenia hace 78.000 años, la evidencia es más concluyente ¿no?*

**R:** En el caso de la *Sima de los Huesos* estamos hablando de hace entre 300.000 y 400.000 años y no podemos hablar de enterramiento, que es un esfuerzo deliberado de crear un espacio, de tapar, de cubrir. Pero si te encuentras un cuerpo de un niño en una cavidad que podemos demostrar que ha sido excavada exprofeso, que luego ha sido cubierta, porque el análisis de la tierra indica que es diferente, y sabemos que es una descomposición *in situ,* porque hemos visto la alteración que tienen los huesos y el sedimento, los productos químicos de desecho de las bacterias necrófagas, sabemos que ese cuerpo se ha depositado allí, no ha sido movido, en una posición flexionada, decúbito lateral con una almohada, con un sudario a un niño… Todo te está hablando de un comportamiento más evolucionado, de una población que tiene ya capacidad de introspección, empatía y que dedica a la muerte más tiempo y esfuerzo del que requeriría una necesidad práctica. A través de lo que parecen simplemente huesos y piedras, puedes inferir una serie de atributos humanos. La compasión, de alguna manera, también fosiliza.

**P:** *¿Tenemos acumuladas ya suficientes piezas de la evolución de los homínidos durante los últimos seis millones de años como para tener a grandes rasgos nuestro árbol genealógico?*

**R:** Yo creo que sabemos bastante, sobre todo de determinados períodos, pero nos falta muchísimo más por saber. Me

## Isótopos inestables para medir el tiempo

El CENIEH cuenta con varios laboratorios que utilizan isótopos radiactivos para diferentes tareas de datación de piezas, rocas y sedimentos, además de otras técnicas, como el paleomagnetismo y la resonancia paramagnética electrónica. "Somos un centro singular, porque aglutinamos en la misma localización todas las disciplinas clave para poder datar un yacimiento", dice María Martinón.

El Laboratorio de Datación por Luminiscencia se basa en la propiedad de algunos minerales, como cuarzo y feldespato, de acumular cargas eléctricas en su estructura, producto de la desintegración radiactiva de material contiguo. Estas cargas se liberan en forma de luminiscencia cuando se someten a un estímulo exterior, como la luz solar. Este sistema utiliza una instalación radiactiva (IRA 3015) y "sirve para datar yacimientos y sedimentos, pero también lo usamos para estudiar el esmalte dental".

El Laboratorio de Series de Uranio se emplea para dataciones de restos de una antigüedad superior a 50.000 años (para los más recientes se utiliza C-14) y se aplica de forma rutinaria a huesos y dientes. Se basa en medir la proporción uranio-torio y se combina con otras técnicas, como la resonancia Paramagnética Electrónica, para corroborar las dataciones. Es especialmente útil en materiales carbonatados, como rocas calizas y restos óseos.

El Laboratorio de Datación por Núclidos Cosmogénicos permite medir las edades de exposición de superficies, la edad de los sedimentos y las tasas de erosión de rocas y suelos en materiales que contengan cuarzo. Esta técnica se basa en medir la presencia de dos isótopos inestables, berilio-10 y aluminio-26, que se generan por reacciones de los rayos cósmicos que impactan en la atmósfera y en la superficie terrestre y cuyas tasas de producción, que se conocen con precisión, dependen del campo geomagnético, el tiempo de exposición y la tasa de erosión. Según Martinón, "ahora estamos trabajando para utilizar también isótopos meteóricos, que te permiten también la reconstrucción de cambios en el paisaje".

El uso de radiaciones en el CENIEH incluye también, como algo ya rutinario, el uso de rayos X para analizar piezas de forma no destructiva. El Laboratorio de Microscopía y Microtomografía Computerizada, permite obtener imágenes de muchísima resolución del interior de cualquier estructura: fósiles, objetos metálicos y rocas. "Realmente puedes cortar el diente, medir volúmenes de tejidos y sin tocarlo. Actualmente cualquier fósil que se encuentre se escanea", dice la directora del centro. Y aunque dice que hasta ahora no han necesitado utilizar radiación sincrotrón, dice que tiene ya prevista una visita al sincrotrón Alba para ver qué posibilidades les ofrecería.



María Martiñón en las excavaciones de Atapuerca.

SUSANA SANTAMARÍA

gustaría que aparecieran fósiles para cubrir esos periodos, pero mientras tanto, con lo que hay, se trata de hacer el retrato más coherente que explique la evidencia disponible. Trabajamos con hipótesis y si un nuevo dato no encaja hay que cambiar esa interpretación, pero eso también es un avance en el conocimiento. Por ejemplo, cuando le dijimos a Bermúdez de Castro que según los datos que habíamos obtenido, *Homo antecessor* no venía de África sino de Asia, él no solo lo aceptó, como debe hacer un científico, sino que se le veía incluso ilusionado con el cambio de perspectiva.

**P:** *Sobre* Homo antecessor, *se ha cuestionado que realmente sea un antepasado común de neandertales y sapiens, ¿cómo esta ahora esta cuestión?*

**R:** Es una hipótesis que se propuso en 1997, hace ya 25 años y creo que ahora

está ampliamente aceptada. En 2020 se publicó el primer proteoma de la especie, en *Nature,* a partir del material más antiguo que se ha recuperado y el análisis de esas proteínas le colocan en el análisis filogenético muy cerca de lo sugerido a partir de la evidencia fósil, el nodo del que saldrían sapiens, neandertales y denisovanos.

**P:** *¿Podemos decir que el antecessor que tenemos en Burgos, es el que dio lugar a sapiens y neandertales?*

**R:** No, La paleontología no funciona así. Lo que estamos viendo es que este antecessor de aquí pertenece a una población que o está en el nodo del que salieron sapiens y neandertales o muy cerca. Realmente nunca vamos a encontrar grupos puros, poblaciones que van evolucionando y se convierten en otra cosa.

**P:** *¿Se han localizado otros restos de antecessor en el mundo?*

**R:** Hay diferentes yacimientos, en China y en Italia, con fósiles que potencialmente podrían ser de *Homo antecessor.* El problema que tenemos es que básicamente estos fósiles son calotas craneales y precisamente en Gran Dolina lo que nos falta son cabezas de adulto, por el canibalismo, sobre todo con niños. Y tenemos realmente pocos fósiles que puedan ser directamente comparados. Pero son fósiles que ocupan, digamos, el mismo espacio filogenético que antecessor. Son restos que empiezan a tener lo que nosotros hemos definido como la cara moderna. Esperamos que en los próximos años pueda aparecer aquí en Atapuerca, en la Gran Dolina, un cráneo completo de adulto para poder hacer esas comparaciones directas.

**P:** *El primer resto hallado de antecessor tenía 800.000 años. ¿Han aparecido otros de mayor antigüedad?*

**R:** En la Sima del Elefante apareció una mandíbula humana y una falange de una mano que tienen 1,2 y 1,4 millones de años. Cuando se publicó la mandíbula, que fue portada de *Nature,* le asignamos provisionalmente a antecessor, por una característica en el interior de su mandíbula, lo que llamamos una síntesis muy vertical, un toro alveolar muy pronunciado y esta mandíbula no lo tenía y antecessor tampoco. Ahí vemos un vínculo, una característica nueva común. Una mandíbula sola es una evidencia insuficiente para poder decir que pertenecen exactamente a la misma especie, pero comparten cosas en común y posiblemente ambas estén emparentadas.

**P:** *La genética y los restos fósiles no siempre ofrecen conclusiones similares. ¿Ha mejorado el encaje entre ambas fuentes?*

**R:** Cada vez más. Hubo un período demasiado largo en el que no había una comunicación fluida entre ambos campos. Es decir, la evidencia genética se interpretaba como la prueba de la verdad contra la que los otros paleontólogos teníamos que contrastar nuestros datos. Nos pasaba, por ejemplo, con *Homo sapiens,* que la genética dice que la salida de África fue hace 50.000, pero yo te estoy enseñando fósiles que tienen 80.000 y son de *Homo sapiens* que están fuera de África. Lo mismo ocurría cuando la genética databa la divergencia de sapiens y neandertales en 300.000 años cuando teníamos en la Sima de los Huesos restos de 400.000 con características neandertales. Ahora estamos en un momento mucho más positivo que hace una década. Hay un diálogo para ver las hipótesis, porque las estimaciones genéticas también son hipótesis, y tratar de encajar lo que dicen ambas fuentes.

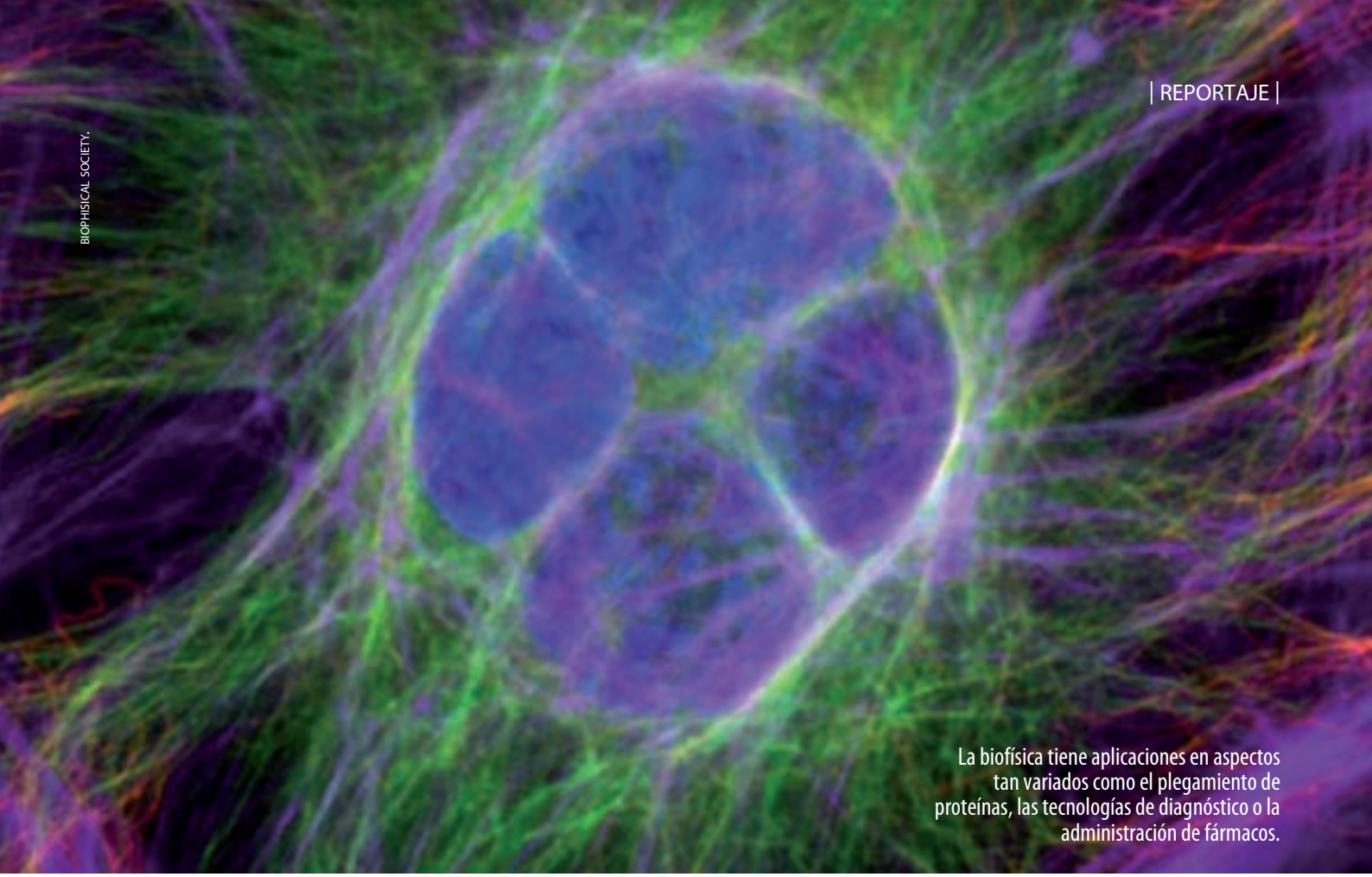
> *"Ahora ya hay dialógo entre la genética y los restos fósiles para tratar de encajar sus hipótesis"*

**P:** *En toda la historia de estos seis o siete millones de años siempre ha habido varias especies de homínidos conviviendo, ¿por qué desde hace más de 30.000 años solo hay una?*

**R:** Bueno, es muy difícil saberlo. Esta es una de las preguntas del millón. Creo que la clave para que pudiera haber varias especies en el mismo territorio físico es que cada una ocupaba un nicho ecológico, un modo de vida diferente y por tanto no compiten. Hay espacio para todos. Eso lo vemos, por ejemplo, cuando el género homo coexistió un tiempo en África con el parántropo, que era una especie exclusivamente vegetariana, muy especializada en frutos secos, tubérculos, raíces, etcétera. Y probablemente no molestaba al sapiens, que era más generalista. Es lo que ocurre en la vida actual, en el día a día. Competimos con aquel que quiere lo mismo que nosotros. *Homo sapiens* es una especie con una capacidad de adaptación tan extensa que no deja prácticamente ningún nicho ecológico sin invadir. Así es muy difícil que deje espacio para otra especie.

**P:** *El caso que siempre se esgrime es el de neandertales y sapiens.*

**R:** No digo que sea necesariamente un tema de confrontación violenta. De hecho, sabemos que hubo hibridación entre sapiens y neandertales, que se ha cuidado de esa descendencia, si no, no tendríamos el ADN neandertal. No necesitamos pensar en una extinción por confrontación violenta, pero probablemente *Homo sapiens* le fue comiendo el terreno a una especie que no estaba pasando su mejor momento, porque llevaba cientos de miles de años aislada en Europa y progresivamente castigada por el frío y la endogamia genética. Ahora me parece difícil pensar que *Homo sapiens,* con un estilo de vida capaz de adaptarse prácticamente a cualquier ecosistema, deje espacio para otra especie humana.



BIOPHISICAL SOCIETY.

La biofísica tiene aplicaciones en aspectos tan variados como el plegamiento de proteínas, las tecnologías de diagnóstico o la administración de fármacos.

La biofísica aplica una mirada diferente para entender los sistemas biológicos

# La vida vista desde la física

La biofísica es un campo de investigación relativamente joven en el que científicos de muchos campos, por supuesto física y biología, pero también matemáticas, química, ingeniería, medicina, ciencia de los materiales…, exploran y crean nuevas herramientas para entender cómo funcionan los sistemas biológicos: desde una célula tumoral a un ecosistema complejo, es decir, la vida entera. Su campo de aplicación es inmenso y en la actualidad, utilizando los fundamentos de esta disciplina, los biofísicos diseñan sistemas de bionanotecnología para administración de fármacos, materiales para prótesis, combustibles inspirados en la vida, modelos informáticos para estudiar el plegamiento de proteínas o la expansión de enfermedades infecciosas como la covid-19, así como nuevas tecnologías de diagnóstico de enfermedades y de tratamientos médicos.

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

"Hasta la segunda o tercera década de este siglo los sistemas biológicos (un virus, una célula, una palmera, un sistema nervioso, un tumor, un sacristán, los niños de una escuela, un bosque, todos los bosques, el equipo de tercera de Atlanta, los vegetales, la humanidad, toda la biosfera) parecían constituir una violación tan flagrante de la segunda ley de la termodinámica que el propio Lord Kelvin limitó su enunciado a 'entidades materiales inanimadas'. En realidad, puesto que ningún sistema vivo es un sistema cerrado no se le puede aplicar así no más la segunda ley. Sin embargo, esta escapatoria legalista no nos deja muy conformes en vista de que en un mundo que tiende a desorganizarse, los sistemas biológicos siguen el curso opuesto: un espermatozoide más un óvulo, se convierten con el tiempo en un elefante de varias toneladas." Esta cita insuperable es de Marcelino Cereijido, investigador emérito de fisiología y

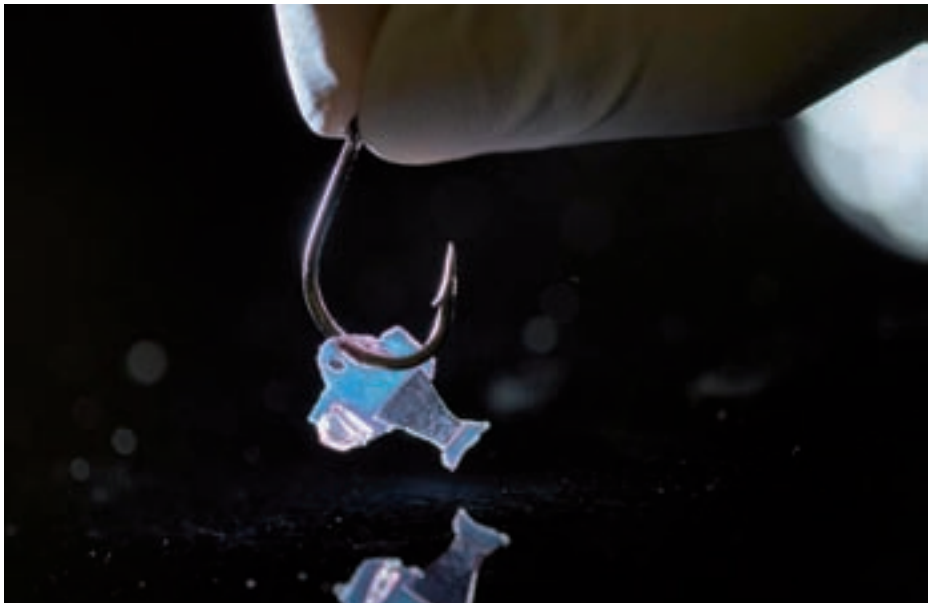
biofísica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México.

En su texto ¿Qué es la biofísica?, Cereijido se remonta a lo que muchos científicos consideran "uno de los comienzos de la biofísica", el libro ¿Qué es la vida? del físico cuántico Erwin Schrödinger, premio Nobel de Física en 1933. Schrödinger se tomó en serio este aparente desafío de los seres vivos a la segunda ley de la termodinámica y quiso responder en términos físicos a la cuestión filosófica intemporal de qué demonios es la vida, que el químico James Lovelock, autor de la hipótesis de Gaia, definió como "algo comestible, amable o letal". El 5 de febrero de 1943, Schrödinger pronunció la primera de tres conferencias en el Trinity College de Dublín sobre un asunto inusual para un físico: ¿Qué es la vida? Un año después, las conferencias se convirtieron en el libro que por primera vez fusionó la física y la biología.

Casi noventa años después de esta pregunta clave, la biofísica se ha convertido en una disciplina amplia y multidisciplinar que tiene el objetivo de comprender el cuerpo humano y el resto de seres vivos en términos físicos. Joven como área académica, la biofísica experimentó un auge importante a partir de la II Guerra Mundial y en 1958 se creó la Biophysical Society, cuya sede está en la ciudad de Rockville, Estados Unidos. La Sociedad de Biofísica de España se creó casi treinta años después, en 1986.



María José Gálvez, catedrática de Física Aplicada en la Universidad de Granada.


MICHAEL ROSNACH, KEEL YONG LEE, SUNG-JIN PARK, KEVIN KIT PARKER

Pez biohíbrido en un anzuelo.

Como todas las moléculas de la vida se basan en interacciones biofísicas y bioquímicas, todas son susceptibles de ser analizadas bajo la luz del punto de vista físico. La biofísica suele dividirse en tres ámbitos atendiendo a los niveles de estructuración de un sistema biológico: biofísica molecular, biofísica celular y biofísica de los sistemas complejos (organismos, especies, ecosistemas). Su campo de observación es tan amplio como la misma vida: desde cómo se comunican las células nerviosas o se pliegan las proteínas, hasta la forma en la que las células vegetales capturan luz para transformarla en energía, por qué ciertos desafortunados cambios en el ADN de células sanas las mutan en cancerosas, cómo funcionan nuestros sistemas circulatorio, nervioso o inmunitario, la expansión de las infecciones o la evolución de ecosistemas con muchas especies interaccionando entre sí y muchas variables influenciando su futuro. También interviene en investigaciones que producen ingentes cantidades de datos,

## Biofísica de las radiaciones

Como ciencia, la biofísica de las radiaciones se ocupa de la acción de las radiaciones ionizantes sobre los sistemas biológicos. A diferencia de la radiobiología, que se ocupa de las consecuencias biológicas y médicas de las radiaciones, la biofísica de las radiaciones se ocupa principalmente de los procesos físicos y químicos primarios, a los que se atribuyen los efectos biológicos. Otros campos vecinos son la química de las radiaciones y la fotobiología: la primera porque las alteraciones químicas inducidas por las radiaciones suelen iniciar los efectos biológico-metabólicos de las radiaciones, y la segunda porque la luz visible y también, y especialmente, la ultravioleta, suelen ser capaces de generar efectos similares a los de las radiaciones ionizantes.

El interés científico por la biofísica de las radiaciones proviene, en primer lugar, de la necesidad de reconocer y cuantificar los procesos primarios que inician una cadena de reacciones biológicas y que conducen finalmente a un efecto de la radiación que es reconocido y utilizado médicamente. Por otra parte, existe la posibilidad de obtener información sobre procesos metabólicos a través del agente de la radiación y aprender sobre su variabilidad bajo influencias externas. Además, siempre hay que tener en cuenta la posibilidad de que se produzcan daños causados por las radiaciones y la adopción de medidas de protección eficaz. Interesante desde el punto de vista físico y biológico es también el hecho de que aquí, mínimas cantidades de energía, a través de complicadas cadenas de reacción, pueden liberar efectos macroscópicos sustanciales.

como la secuenciación completa del genoma humano o el proyecto Human Cell Atlas. Y así hasta cada problema biológico que se nos ocurra. En definitiva, lo que ha dejado claro la biofísica en estos años que han pasado desde la pregunta de Schrödinger es que, para entender los procesos biológicos, también hay que saber de física.

### El mundo bionano

María José Gálvez es catedrática de Física Aplicada en la Universidad de Granada, donde puso en marcha las asignaturas de biofísica y bionanotecnología. Lleva más de treinta años haciendo física aplicada a sistemas biológicos. Su tesis doctoral trató la formación de cálculos biliares y las interacciones entre los diferentes componentes que intervienen, como colesterol y ácidos biliares. En los últimos años, investiga la aplicación de técnicas de nanotecnología al mundo biológico. En concreto trabaja en el desarrollo de sistemas nanotransportadores, vehículos de escala nanométrica -una millonésima de milímetro- capaces de transportar fármacos a órganos específicos. "Empecé con un fármaco antiobesidad y ahora ya llevamos casi ocho años dedicados al transporte de fármacos anticancerígenos", cuenta Gálvez en conversación telefónica.

Lo que esta física y su equipo multidisciplinar —médicos, biotecnólogos, químicos, bioquímicos...— hacen es diseñar un sistema diminuto y estable que transporte el fármaco, capaz de superar todas las barreras biológicas que se encontrase en un recorrido real por el interior del cuerpo humano, y que además funcionalizan para que se dirija exclusivamente al órgano afectado. "Así conseguimos que los tratamientos sean, primero, más efectivos, más eficaces, porque el fármaco va protegido y por tanto se requiere menos dosis, y además evitar los terribles efectos secundarios porque nuestro sistema no afectaría a las células sanas", explica Gálvez. Dentro de esta línea, en una de las tesis doctorales que dirige esta investigadora, comparan la interacción de diferentes fármacos anticancerígenos con membranas reales de células enfermas, cancerígenas, y con membranas reales de células sanas. También estudian la forma de administración del fármaco por vía oral para lo que realizan simulaciones de digestiones *in vitro*.

Parece un sueño difícil de mejorar y desde hace décadas, todo un ejército de investigadores de todo el mundo, como Gálvez, trabaja para conseguir transportar estos fármacos de una manera selectiva, especialmente en cáncer. Pero la realidad está mostrándose tozuda: muy pocas de estas investigaciones llegan a los ensayos clínicos. "Terapias que se basen en nanopartículas habrá no más de ocho. El problema fundamental es que hay un desconocimiento grande de cómo interacciona cualquier tipo de material en el sistema biológico. Nosotros en este proyecto trabajamos con médicos y con especialistas en células madre cancerígenas. Toda la investigación la dirigimos, precisamente, a ir contra esa subpoblación inicial del tumor que son las células madre cancerígenas y llegamos a hacer ensayos *in vitro* e *in vivo* con modelos animales, pero llegar a un ensayo clínico realmente es muy complejo. Conocer la acción de un material, nanotransportador o fármaco, sobre

## ¿Qué hacen los biofísicos?

Los biofísicos son profesores e investigadores de biología, física, ingeniería y muchos otros campos. Trabajan en universidades, hospitales, empresas tecnológicas y compañías de ingeniería. Éstas son algunas de sus áreas de trabajo:

- **Moléculas en movimiento.** Se trata de estudiar el movimiento a nivel molecular de distintas sustancias biológicas, por ejemplo, hormonas y lípidos, o cómo las células se comunican entre sí. Mediante el uso de etiquetas fluorescentes, los biofísicos han podido hacer que las células brillen como luciérnagas bajo el microscopio y conocer sus sofisticados sistemas de tránsito interno.

- **Bioingeniería,** bionanotecnología y biomateriales. La biofísica es fundamental para entender la biomecánica, es decir, el análisis y la descripción del movimiento del cuerpo humano, y para aplicar este conocimiento a la solución de problemas prácticos, por ejemplo, el diseño de mejores prótesis. La biofísica también trabaja en el diseño de nuevos materiales, como nanomateriales capaces de transportar y liberar fármacos sólo en aquellos órganos que lo necesiten.

- **Aplicaciones médicas y diagnóstico por imagen.** El desarrollo de tratamientos y dispositivos tan esenciales para la vida humana como la diálisis renal, la radioterapia, los desfibriladores cardíacos y los marcapasos tienen su origen en la biofísica. También técnicas de diagnóstico por imagen tan sofisticadas como las resonancias magnéticas, los TAC (tomografías computarizadas) y los escáneres PET. Los biofísicos desarrollan modelos informáticos llamados redes neuronales para modelar el funcionamiento del cerebro y del resto del sistema nervioso y entender, por ejemplo, cómo se procesa la información visual y auditiva.

- **Ecosistemas.** La biofísica medioambiental se centra en el estudio del medio ambiente en su sentido más amplio: desde la estratosfera hasta el profundo lecho del océano. Algunos ejemplos de esta disciplina son el estudio de microorganismos en lugares inhóspitos del planeta como la Antártida, el seguimiento de contaminantes en la atmósfera y la búsqueda de nuevos biocombustibles, por ejemplo, a partir de algas.

- **Modelización informática.** Los biofísicos desarrollan modelos informáticos para ver y manipular las formas y estructuras de moléculas biológicas como proteínas, virus y otras moléculas complejas, información crucial para desarrollar nuevas dianas farmacológicas. También modelizan sistemas complejos como los modelos de expansión de enfermedades o de evolución de ecosistemas con muchas especies.

diferentes entidades biológicas es precisamente un tema propio de la biofísica, y aún queda mucho por investigar para conocer todos los procesos implicados y poder ofrecer alternativas a las actuales terapias anticancerígenas".

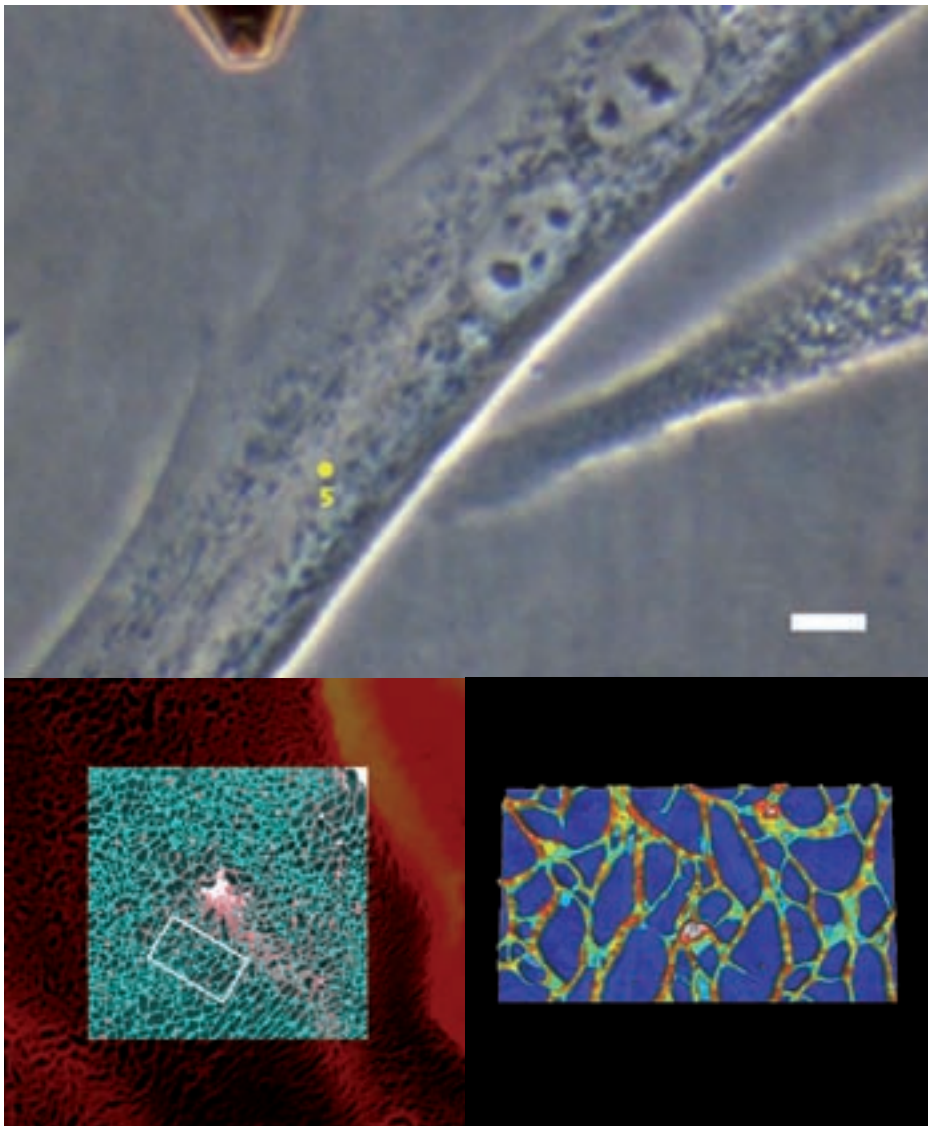
### Corazones robot

La biofísica está detrás del desarrollo de tratamientos y dispositivos tan esenciales para la vida humana como la diálisis renal, la radioterapia, los desfibriladores cardíacos, los marcapasos y las válvulas cardiacas artificiales. Una temprana ambición de la medicina era fabricar órganos artificiales completos y, entre ellos, la aparente sencillez del corazón —en principio apenas se una bomba con cuatro cámaras— y la enorme magnitud de sus problemas —la OMS estima que las enfermedades cardiovasculares representaron alrededor de un 31% de todas las muertes registradas en el mundo en 2015— hizo que a principios de los años 80 pareciera un desafío posible. Como en el caso de los bionanotransportadores, y por razones parecidas, esto está resultando de la mayor dificultad.

En 1982, un dentista de Seattle llamado Barney Clark se convirtió en el primer receptor de un corazón mecánico permanente. Sobrevivió 112 días en condiciones miserables y no pudo llegar a salir del hospital. El corazón mecánico que mantuvo a Clark con vida durante esos días se llamó Jarvik-7 por su inventor, Robert Jarvik. Según Scientific American, cuatro pacientes más recibieron corazones Jarvik-7 y uno llegó a sobrevivir 620 días, pero la calidad de vida era tan pobre y la imagen pública de estos corazones tan mala –los 112 días de Clark se siguieron casi de forma diaria en los telediarios– que, en 1990, la FDA estadounidense retiró el permiso para fabricar más.

Hoy los científicos consideran que

BRUKER



BRUKER

BRUKER

Aplicaciones del microscopio de fuerza atómica. Arriba, medida de elasticidad celular; abajo, estudio de estructuras nanométricas.

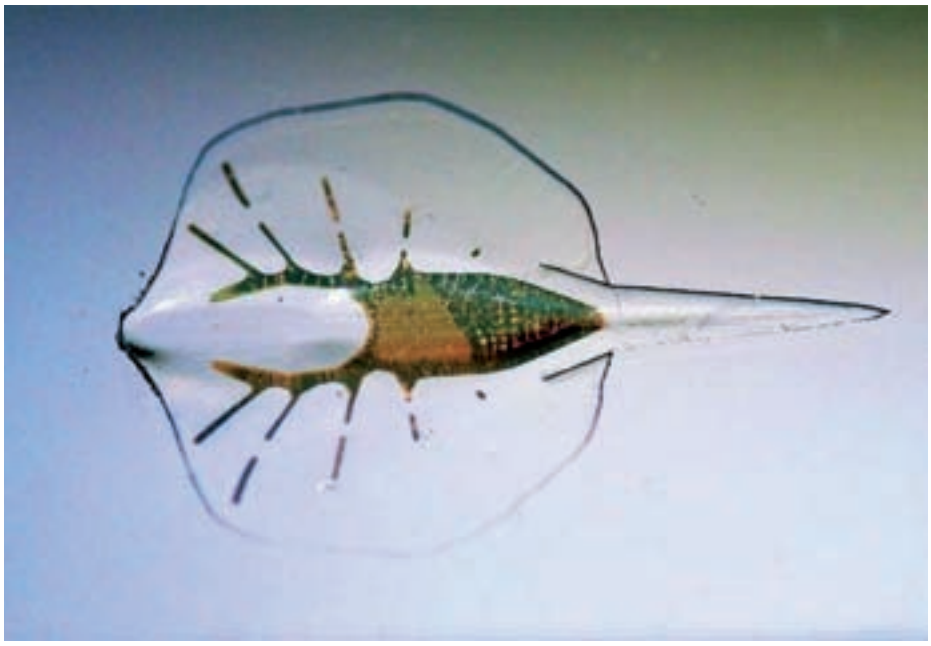
el problema de los Jarvik-7 fue cierta ingenuidad de sus diseñadores ante la complejidad dinámica del órgano y de la física del flujo sanguíneo, el comportamiento de las plaquetas... es decir, de la biofísica del corazón y de su relación con el resto de complejidades del cuerpo humano, la vida. De hecho, las dos amenazas más peligrosas para la supervivencia de los receptores de estos sistemas fueron los problemas de coagulación, que provocaban accidentes cardiovasculares, y las infecciones. Se han diseñado otros modelos de corazones mecánicos permanentes mejorados - AbioCor, por ejemplo, que estuvo en ensayos clínicos entre 2001 y 2004 y los recibieron 14 personas, y CardioWest, usado solo como un paso previo al trasplante- pero el sueño de fabricar corazones mecánicos permanentes a pleno funcionamiento sigue siendo sólo eso, un sueño.

Kit Parker es catedrático de bioingeniería y física aplicada en la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas John A. Paulson de la Universidad de Harvard. El pasado mes de febrero, Parker y su equipo, en colaboración con biofísicos de la Universidad de Emory, publicaron en la revista *Science* la creación de una máquina única: el primer pez biónico fabricado con células cardíacas humanas, que nada de forma totalmente autónoma siguiendo el latido de las células. La visión de uno de estos peces, de aspecto similar a un extraño pez cebra, es fascinante: impulsado por células musculares cardíacas, que derivan de células madre humanas, el pez biónico nada recreando las contracciones musculares de un corazón humano latiendo.

El desarrollo de este sistema único acerca al equipo al desarrollo de una bomba muscular artificial más compleja y constituye una plataforma, un modelo, sobre el que estudiar enfermedades cardíacas como, por ejemplo, la arritmia. Algunos años antes, en 2012, estos investigadores ya utilizaron células musculares cardíacas de rata para construir una bomba biohíbrida parecida a una medusa y en 2016 crearon una raya artificial nadadora con el mismo procedimiento. Pero, sobre todo, este extraño pez es un paso más hacia la construcción de un corazón artificial. La aspiración de Parker y su equipo es construir un corazón artificial que sustituya corazones con malformaciones en niños. De menor tamaño, estos corazones suponen aún más complejidades que los órganos adultos. Jarvik-7, por ejemplo, era tan grande como una nevera.

Para Parker, la dificultad para construir un órgano artificial vuelve a estar en la comprensión de su compleja biofísica. “Puedes cultivar algunas células tumorales al azar en una placa hasta convertirlas en un bulto palpitante y llamarlo organoide cardíaco, pero ninguno de esos esfuerzos va a recrear, por su diseño, la física de un sistema que late más de mil millones de veces durante su vida mientras reconstruye simultáneamente sus células sobre la marcha. Ese es el reto. Ahí es donde nos ponemos a trabajar”, explicó Parker en

DISEASE BIOPHYSICS GROUP. HARVARD SEAS



Una raya artificial obtenida a partir de células de músculo cardíaco de rata.

una nota de prensa. "La mayor parte de los trabajos de construcción de tejidos cardíacos o de corazones se centran en replicar las características anatómicas o el simple latido del corazón en los tejidos diseñados. Pero aquí nos inspiramos en la biofísica del corazón, lo que es más difícil. En lugar de utilizar las imágenes del corazón como modelo, estamos identificando los principios biofísicos clave que hacen que el corazón funcione, utilizándolos como criterios de diseño, y replicándolos en un sistema, un pez vivo y nadador, donde es mucho más fácil ver si tenemos éxito", explicó. El siguiente paso que se plantean es construir dispositivos biohíbridos aún más complejos partiendo también de células cardíacas humanas.

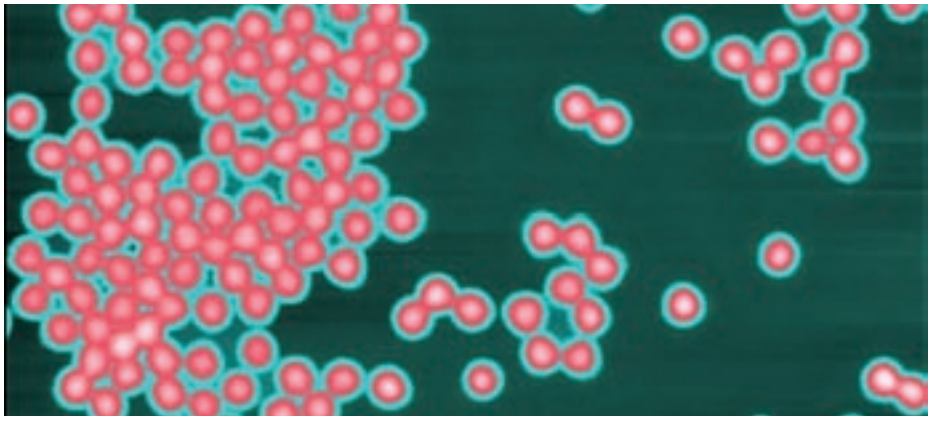
## El horizonte

La perspectiva de observar el mundo vivo incluyendo su variable física proporciona una imagen más completa, real y también más compleja de la vida, y está transformando nuestra comprensión del mundo biológico. Como muestran las citadas investigaciones con bionanomateriales y con sistemas que intentan recrear la biofísica de órganos complejos, la biofísica es un campo científico a la vanguardia para solucionar problemas humanos tan antiguos como la enfermedad, pero también problemas del acuciante presente y del incierto futuro, como la energía o la escasez de materiales.

Para María José Gálvez se trata de una ciencia de frontera donde su carácter multidisciplinar es fundamental, pero también causa de alguno de sus problemas. "Se tienen que construir muy bien los equipos de investigación. Nosotros en nuestro proyecto estamos trabajando médicos, bioquímicos, químicos, biotecnólogos, físicos… Y claro, el problema está en el encaje académico porque nosotros trabajamos en un departamento de Física Aplicada. No existe ningún departamento de Biofísica, que yo sepa, en España, ni un grado de biofísica. Existe en Estados Unidos, pero la semana pasada la Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina decía que la biofísica está muy poco representada dentro del currículum de física, y una serie de investigadores reclaman que se considere un área específica análoga a la materia condensada o la física nuclear".

Esta situación hace que la biofísica sea difícil de situar, sobre todo en el mundo universitario donde se hace investigación y también docencia. "En España normalmente las plazas se dotan con perfiles docentes. Entonces, tener un grupo de investigación multidisciplinar en un departamento que no tiene ese carácter multidisciplinar complica las cosas, evidentemente", explica. También están las dificultades a la hora de buscar financiación. "Yo trabajo en un departamento de Física Aplicada, es decir, tenemos que aplicar la física que hacemos, y para mí es mejor llevar a cabo una investigación que, aunque sea investigación básica como hacemos nosotros, tenga un carácter aplicado, porque eso me permite obtener más financiación", concluye.

BRUKER



Partículas vistas con microscopio de fuerza atómica.



# Margarita Salas, madre de la biología molecular española

En 1969, se celebró en Madrid el congreso de la Federación Europea de Sociedades Bioquímicas, al que asistieron personalidades de renombre, como Severo Ochoa. En una foto del evento, destaca una joven de mirada vivaz, pelo y falda a la moda. A su izquierda, de chaqueta y corbata, está el bioquímico Masayasu Nomura y el biólogo molecular Charles Weissmann. A su derecha, su marido, el investigador Eladio Viñuela. Ella es Margarita Salas, pionera de la biología molecular en España. Ambos eran discípulos del Nobel español y ella se convirtió en la científica española más universal, la madre de varias generaciones de biólogas (y biólogos) moleculares.

Texto: **Mar de Miguel** | Periodista científica

"Margarita y Eladio Viñuela", señala Enrique de la Rosa, director del Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas (CIB), "trajeron la biología molecular a España, al CIB, donde volvieron tras su postdoctorado en Nueva York con Severo Ochoa. Fue un hito, porque la biología molecular es una manera de profundizar en el conocimiento de los procesos biológicos. Se pasó de su descripción a analizar los mecanismos subyacentes", destaca de la Rosa.

Salas y Viñuela estudiaron en la Complutense, hicieron juntos el doctorado en el CIB con Alberto Sols y se casaron. Para trabajar con Sols, Severo Ochoa tuvo que recomendar a Salas; después, los aguardó en EE.UU. para que ambos se incorporaran a su laboratorio al acabar sus tesis, en 1965. A su regreso

a España, en el 67, trajeron consigo esa nueva visión de la ciencia.

"Eran como Isabel y Fernando, los Reyes Católicos. Todo juntos", bromea Jesús Ávila, primer doctorando de Margarita Salas (1968) y exdirector del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa (CBMSO). "Una cosa que hizo Ochoa cuando llegaron a Nueva York fue separarlos para que se desarrollaran por sí solos". Al volver al CIB, por la poca financiación que tenían, primero aunaron esfuerzos; después, investigaron virus diferentes. Ella, eligió el bacteriófago phi-29. Él, el de la peste porcina africana.

Del CIB se trasladaron al recién creado Centro de Biología Molecular, un edificio más específicamente orientado a esta nueva disciplina, con mejores dotaciones, espacio y enclavado en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Corría el año 1977 y el grupo de Salas ya había publicado su trabajo sobre la ARN polimerasa de phi-29. En su nueva ubicación, descubrió la ADN polimerasa de este virus, una enzima que marcó su trayectoria científica.

En el CBM, Salas comenzó con un grupo pequeño: el insustituible José María Lázaro (técnico de laboratorio de Salas durante más de 40 años) y dos doctorandos, Juan Antonio García y Miguel Ángel Peñalva. Este último, ahora investigador del CIB, evoca aquellos tiempos. "Fui la última persona a la que Margarita ayudó con sus propias manos durante su tesis", sostiene. Sus experimentos eran complejos y Salas le ayudaba. "Margarita era la persona más hábil con las manos que haya visto trabajar en el laboratorio jamás".

## Margarita y Eladio

Margarita Salas nació en 1938 en Canero, un pueblecito asturiano próximo a Luarca. Procedía de una familia culta. Su padre era psiquiatra y su madre profesora de escuela. Vivían en Gijón, en la primera planta del sanatorio de su padre, una finca ajardinada con pista de tenis, origen de su afición a ese deporte. "Era forofa de Rafa Nadal", asegura su hija Lucía Viñuela, que dibuja su personalidad a través de sus gustos. "Le encantaba el arte y la música y los fines de semana acudía al Auditorio Nacional y estaba abonada a Scherzo. Le gustaba quedar con amigas para comer. Tenía pequeños placeres".



ARCHIVO SEBBM

Eladio Viñuela, Margarita Salas, Masayasu Nomura y Charles Weissmann en el VI Congreso Europeo FEBS de Bioquímica en Madrid durante el año 1969.

Salas disfrutaba almorzando con ellas todos los fines de semana. Viñuela también recuerda a su madre de pequeña, estudiando la asignatura de química, que no se le daba bien. "La recuerdo explicándome la tabla periódica". Crecer en una familia de científicos fue fácil, afirma: "Para mí no eran ni Margarita Salas ni Eladio Viñuela. Eran mis padres. Aunque trabajaban los dos, los fines de semana tenían todo el tiempo del mundo para mí".

Por su origen en un pueblecito asturiano y dedicar toda una vida a la ciencia, una fundación llevará su nombre. Salas pensaba que las mujeres de entornos rurales no tenían las mismas oportunidades que las de grandes ciudades y la nueva entidad intentará acercarles su gran pasión. La idea parte de los discípulos de Salas Luis Blanco, Jesús Ávila y la exministra Cristina Garmendia. "La fundación nace para conservar, proteger y divulgar el legado científico de Margarita Salas. Además, queremos despertar vocaciones científicas", expone Viñuela, quien la presidirá.

Eladio Viñuela (Ibahernando, 1937-Madrid, 1999), también fue un científico extraordinario y ejerció una gran influencia sobre su esposa. "Eran complementarios y su muerte le afectó mucho porque estaba estrechamente ligada a él, tanto desde el punto de vista personal como científico, y sentía una gran admiración por él", comenta Peñalva.

Viñuela fue otro adelantado a su tiempo. La decisión de dedicarse al virus de la peste porcina africana la tomó por el impacto que tuvo este patógeno en Extremadura, su tierra natal. "Hizo grandes descubrimientos -dice Ávila- y ahora que hay tanta peste porcina africana en China, han venido de allí para ver si sus herederos científicos pueden ayudarles".

Ávila rememora las conversaciones científicas entre Salas y Viñuela. "Daba gusto oírlos. Aprendías mucho". Tam-

bién recuerda una discusión entre Viñuela y Severo Ochoa. "Aunque se molestaran, los dos acababan reconociendo cuando el otro tenía razón. En un seminario, de repente Eladio dijo: 'creo Don Severo que eso no es así'. 'Pero ¿qué dices, jodido?', le respondió Ochoa. Al rato, asintió. 'Es verdad. Tienes razón'. Lo primero era la ciencia, antes que la soberbia y las personas".



CIB MARGARITA SALAS

Margarita Salas y otros investigadores en las escaleras del CIB de la calle Velázquez en 1968. La acompañan, entre otros, Eladio Viñuela, Jesús Ávila, Enrique Méndez, Antonio Talavera, José Gómez-Acebo, Lola Hermoso, Roberto Parrilla, Juanjo López Fando, Matilde Salinas y José Luis Rodríguez Candela.

Hija única, Lucía Viñuela ofrece una visión más íntima de sus padres. "Ellos hablaban de ciencia, porque los dos eran científicos, pero cuando estaban conmigo se hablaba de cualquier otra cosa". La ADN polimerasa no era un tema familiar. "Entre ellos sí, pero cuando estábamos juntos, hacíamos planes o pasábamos el fin de semana en la Sierra, y allí no se hablaba de experimentos".

## Pequeñita, pero matona

La investigación de Margarita Salas se adentra en lo más profundo de la ciencia básica. Ávila la compara con la música y dice: "Le gustaba desde la clásica hasta el flamenco. Recuerdo comentar con ella que, en la música, la labor importante es la del compositor; luego, las orquestas tocan esa música". Con la ciencia ocurre lo mismo, añade. "La investigación básica es la que da el conocimiento que no existe antes; luego, viene la aplicada".

Este razonamiento se cumplió. A mediados de los 80, el grupo de Salas hizo un importante descubrimiento: la ADN polimerasa de phi-29 servía para hacer copias de ADN. Hoy, se utiliza en todos los laboratorios para hacer las famosas PCR, estudios oncológicos o pruebas de paternidad. Su fidelidad es altísima porque corrige sus propios errores. En los últimos años, se usa para obtener ADN a la carta, en terapias génicas o producción de vacunas de ADN o ARN. "Funciona de maravilla. Es pequeñita, pero matona", dice con guasa Luis Blanco, el investigador del CBMSO que la descubrió junto con Salas.

La importancia de estos trabajos y del equipo de Salas lo resume por correo electrónico Bruce Stillman, presidente del Cold Spring Harbor Laboratory, una de las instituciones científicas más prestigiosas de EE.UU., hogar de ocho premios Nobel. La propia Salas estudió los virus bacterianos allí y varios de sus discípulos (Manuel Serrano, María Blasco, José Antonio Esteban, Juan Méndez o Marisol Soengas) hicieron allí un postdoctorado.

"Margarita Salas fue pionera de la biología molecular española. Estudió cómo un virus bacteriano copia su genoma cuando infecta a bacterias", describe Stillman. "Al hacerlo, no solo entrenó a algunos de los científicos españoles de mayor talento, sino que descubrió las enzimas que duplican el genoma del virus. Una de ellas, la ADN polimerasa de phi-29, ha demostrado ser un reactivo muy valioso para estudios genómicos a gran escala y diagnósticos médicos. El impacto de su investigación va más allá de comprender el crecimiento de virus en bacterias".

## La patente prodigiosa

La ADN polimerasa surgió en 1984 con la tesis de Blanco, pero no se patentó. Antes, solo se registraban organismos mutantes, no secuencias salvajes como la de phi-29, considerada algo natural, pero sí se admitía patentar aplicaciones. En 1989, con el auge de la secuenciación, se patentó con ese uso y se incluyó la posibilidad de utilizarla para amplificar (hacer copias de ADN). Esta enzima no necesita conocer la secuencia del ADN para copiarlo, una virtud que no tienen otras. El incluir la amplificación en su registro fue la clave de la patente más rentable del Consejo Superior de Investigaciones Científica (CSIC) de todos los tiempos.

"Cuando en un congreso conté cómo amplificaba la polimerasa de phi-29, a una persona de la primera fila se le pusieron los ojos como platos. No exagero si digo que vi el reflejo de un dólar en sus ojos", recuerda Blanco. Aquella persona tenía la patente de la Universidad de Harvard para la secuenasa, una enzima

que se usaba en secuenciación. A través de él se escribió la patente española, con la particularidad de la amplificación, bien protegida y con altas regalías, un 10% de las ventas netas.

"No hay forma de amplificar un genoma completo con más fidelidad que con ella. No ha sido superada desde que la patentamos", subraya Blanco. En los 20 años que estuvo vigente su explotación (expiró en 2009), produjo para el CSIC un beneficio de 6,6 millones de euros. "Por eso, a la ADN polimerasa de phi-29, el CSIC la llama 'la patente'", comenta sonriente. Aunque los derechos sobre su explotación concluyeron, su uso sigue vigente. Ahora incluso se emplea para detectar el SARS-CoV-2. Blanco y Cristina Garmendia fundaron una empresa en 2008 para desarrollar esas aplicaciones. Luego se sumó Salas.

Blanco también recuerda otra faceta de Salas: "Margarita decía que un país sin ciencia era un país sin desarrollo", una frase de Severo Ochoa que Margarita hacía propia. "En sus últimas etapas estaba por encima del bien y del mal, ejercía el corporativismo porque su voz era escuchada", dice Blanco. "Si de verdad creéis en la ciencia, tenéis que apostar por ella", decía reivindicando una mayor inversión en I+D en España. "Siempre que tenía oportunidad lanzaba el mensaje, a quien fuera pertinente. Si había que firmar una carta dirigida al Ministerio, ahí estaba ella la primera", asegura Viñuela. "Muchas grandes figuras, más que una reivindicación pública, prefieren una privada para sus grupos; Margarita no. Ella salió a la palestra y pidió financiación para toda la ciencia española", recalca de la Rosa.

"Pero hablaba de la ciencia básica, porque por experiencia sabía que desde ella surgía la aplicada" puntualiza Blanco. Un buen ejemplo era *la patente,* que devolvió con creces a la sociedad la inversión recibida. "La ciencia son semillas de fructificación lenta. A veces son rápidas, otras



CIB MARGARITA SALAS

Margarita Salas y Eladio Viñuela en el laboratorio del CIB durante su tesis doctoral. Madrid, 1962.

menos, pero si no las plantas, alguien lo hará en otro lugar y se llevará el fruto. Hay que invertir en investigación básica como germen de la aplicada. Es lo que decía Margarita", concluye.

## Creando escuela

En sus más de 50 años de carrera profesional, Margarita Salas formó a más de un centenar y medio de científicos. Coloquialmente, a sus discípulos se los conoce como los margaritos. Entre todos forman la escuela que atesora los principios que les inculcó: rigor, trabajo, respeto, cariño, tiempo y pasión por la ciencia. La huella que dejó en ellos es imborrable.

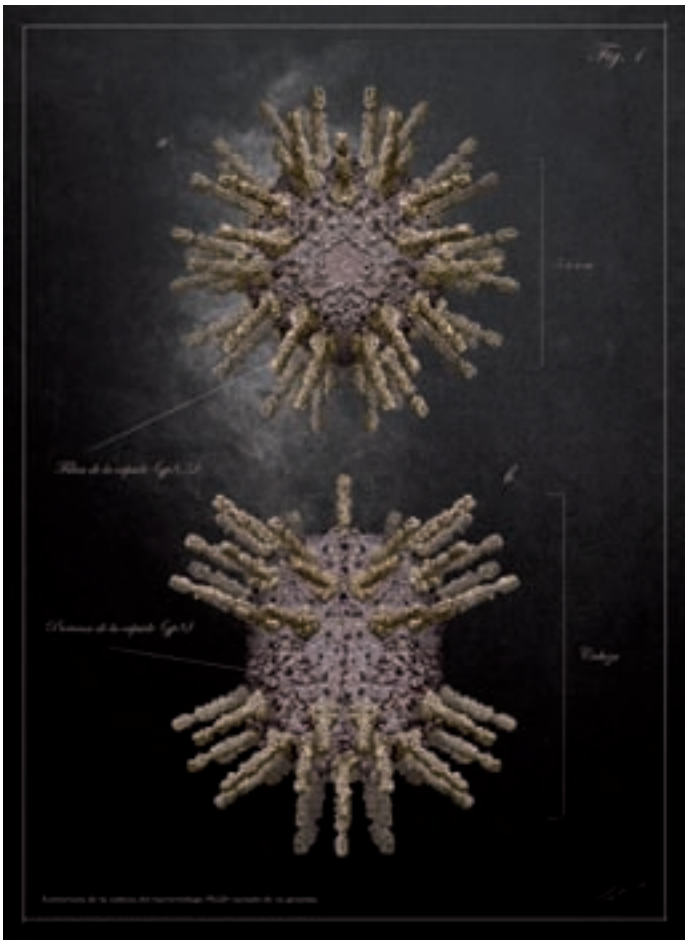
María Blasco, directora del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO), lo describe así: "Margarita Salas fue mi madre científica, mi maestra. Me formé como bióloga molecular de su mano, en su laboratorio y obtuve el doctorado con ella. Ha sido mi referente principal, mi ejemplo a seguir, y también es un referente de la biología molecular en España y en el mundo. Además, ha generado escuela, de la que yo formo parte. De hecho, en el centro que dirijo, el CNIO, algunos de los científicos y las científicas más sobresalientes somos discípulos/as de Margarita Salas".

LUIS BLANCO



Margarita Salas y Luis Blanco (CBMSO) asistiendo a un congreso científico.

YOLANDA GONZÁLEZ



Estructura tridimensional del virus bacteriano phi-29.

Del CNIO es también Marisol Soengas, directora del grupo de Melanoma, que coincidió con Blasco en el grupo de Salas. Se incorporó en 1991 como estudiante de biología y pronto vio que "era un laboratorio adelantado a su tiempo". Los mejores expedientes de cada promoción, estudiantes internacionales, seminarios en inglés, una estructura piramidal supervisada a todos los niveles... Salas delegaba, cuenta Soengas, en sus investigadores sénior, que se encargaban de los predoctorales y postdoctorales. "La marca de la casa era el rigor. Al grupo de Margarita nos llamaban los margaritos. La palabra clave era cuantificar, repetir y que el experimento fuera reproducible. Ese rigor nos lo llevamos todos".

Según Ávila, esa pasión por la ciencia y su forma de transmitirla le venía a Salas del espíritu que le inculcó Severo Ochoa y que, a su vez, a él le imbuyeron Gerty y Carl Cori, dos premios Nobel con los que trabajó. Los margaritos recogieron el testigo para los que vinieron detrás, porque la escuela de Margarita Salas, según Ávila, sigue el modelo de la escultura de la Complutense: los portadores de la antorcha, que representa la transmisión del conocimiento entre generaciones.

Para Peñalva, pasar el testigo es una obsesión. "Margarita es la escuela de biología molecular en España. Generó tal capital humano que la diáspora es impresionante, con gente por todo el mundo. Nunca llegaré a ese nivel, pero me guio por sus principios", asegura. Peñalva y Blanco también se declaran hijos científicos de Salas. "Era una directora dura cuando tenía que serlo y una supervisora comprensiva con la vida de cada uno", afirma Peñalva. "Yo tuve la suerte de tener dos madres, la natural y la científica. Siempre la llamaba mi madre de Madrid, porque así me trató. Hasta me pagó el arreglo del coche cuando me arrolló un autobús", cuenta Blanco.

Con los años y la jubilación a las puertas, Salas, una enamorada de su trabajo, se resistía a quedarse en casa. Para continuar con su laboratorio usó la figura de profesor *Ad Honorem*. Planeaba agotar hasta la última de sus prórrogas. Su meta era seguir los pasos de uno de sus referentes en la vida, la premio nobel Rita Levi-Montalcini, que iba todos los días al laboratorio hasta su fallecimiento, a los 103 años. Según Viñuela, Margarita era fan de Rita Levi-Montalcini, quien decía que lo importante no eran las arrugas del rostro, sino las del cerebro, un mensaje que caló en la científica española. "Si estoy bien mental y físicamente por qué tengo que quedarme en mi casa apartada del mundo laboral, cuando es mi pasión y todavía puedo hacerlo", se preguntaba Salas.

Salas, como Levi-Montalcini, fue al laboratorio todos los días, mientras le renovaron un permiso que, de seguir con vida, lo habría agotado, pues su último plazo cumplía en 2020. "Desgraciadamente, falleció el 7 de noviembre de 2019 y su grupo se disolvió", explica su hija. Su legado, recogido en centenares de publicaciones de alto impacto y reconocido con numerosos galardones, tiene un cierto sabor agridulce. "Ella decía que, de joven, la habían discriminado por ser mujer", señala Ávila, recordando que su director

CARLOS ORDÓÑEZ



Grupo de investigación de Margarita Salas en el CBMSO (23 de abril de 2019), con sus últimos doctorandos Ana Lechuga (primera por la izquierda, delante), Carlos Ordoñez (segundo por la izquierda, detrás), su codirector Modesto Redrejo (tercero por la izquierda, detrás) y su última postdoc Alicia del Prado (quinta por la izquierda, detrás).

de tesis se dirigía a ella a través de su marido. "Y que al final, la habían discriminado por ser mayor". Tenía 80 años.

Soengas destaca el peso de Salas como referente de mujer en la ciencia. "Para muchas es un ejemplo de liderazgo. Margarita es a lo que aspiramos". Viñuela asiente: "Independientemente de que fuera mi madre, siempre me ha parecido una gran luchadora".

## Los últimos margaritos

El laboratorio de Margarita Salas recibió su fallecimiento con nerviosismo. "Sabíamos que estaba en el hospital. No era la primera vez, pero siempre volvía. No nos lo creíamos", comenta Carlos Ordóñez. Es, junto con Ana Lechuga, uno de los dos últimos doctorandos de Salas en el CBMSO, compañeros de Alicia del Prado, postdoctoral del grupo. A Ordóñez y a Lechuga su muerte les cogió en plena tesis. "Ana iba a empezar la escritura. Yo estaba en mi tercer año. Al proyecto le quedaban las últimas pinceladas".

De que todo saliera bien se encargó Modesto Redrejo, profesor de la Facultad de Medicina de la Autónoma de Madrid, quien hizo la tesis con los hermanos de Salas, José y María Luisa, y fue postdoc de Margarita hasta 2018, cuando se incorporó a la UAM. Con ella codirigió las tesis doctorales de los últimos margaritos: Mónica Berjón (2017), Ana Lechuga (2020) y Carlos Ordóñez (2022). Esa colaboración se mantiene incluso después de fallecida, con la publicación póstuma de sus últimos trabajos.

Para que Ordóñez y Lechuga acabaran, el Ministerio de Universidades mantuvo sus becas FPU y Redrejo hizo el resto: "Me lo pusieron fácil porque son buenos estudiantes. Para ellos fue más duro porque su fallecimiento coincidió con que ya me había ido del laboratorio. Se encontraron algo solos".

Lechuga recuerda a Salas con cariño. "Me impresionó ver que hasta el último momento estuvo haciendo ciencia, lo que le gustaba e importaba. Esta pasión era inspiradora". A estas cualidades añade humanidad y profesionalidad. "Una de sus grandes prioridades era la gente de su laboratorio. Era muy amable y atenta, una gran mentora", dice. Como sus predecesores, también destaca su rigor. "Te pedía todos los controles y experimentos necesarios para no dejar ningún cabo suelto. Incluso con toda la experiencia que ella tenía, no daba nada por sentado".

# Plan INVEAT: Actuaciones del Consejo de Seguridad Nuclear

El plan INVEAT de renovación de equipos de alta tecnología sanitaria prevé la incorporación al Sistema Nacional de Salud, antes de septiembre de 2023, de más de 800 equipos, cuya instalación está sujeta a evaluación de seguridad por el CSN. Llevar a buen término este plan supone, a la vez, una gran oportunidad para el sistema sanitario español, y un gran reto para todos los implicados (hospitales, profesionales sanitarios, suministradores y fabricantes), así como para las entidades administrativas autonómicas y estatales que forman parte de los procesos de autorización y evaluación. Este artículo resume brevemente el enfoque y trabajos realizados en el CSN, que centraliza las evaluaciones de seguridad, para afrontar el desafío que supone INVEAT, y aprovechar para optimizar los procesos de licenciamiento de instalaciones radiactivas médicas de cara al futuro.

Texto: **Maria Luisa Ramírez Vera, Asunción Diez Sacristán, Ana Blanes Tabernero, Arturo Pérez Mulas, Alfonso Uruburu Rodriguez, Cristina Koren Fernandez; Miguel Posadas Arias** | Área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas

El Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria en el Sistema Nacional de Salud (Plan INVEAT) es una de las seis inversiones en las que se sustenta el componente número 18 (Renovación y ampliación de las capacidades) del Pacto por la Ciencia y la Innovación y Refuerzo del Sistema Nacional de Salud, sexta de las diez políticas tractoras del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia aprobado por el Gobierno de España el 27 de abril de 2021 (ver figura 1).

El objetivo principal del Plan INVEAT es "incrementar la supervivencia global y la calidad de vida de las personas mediante el diagnóstico de enfermedades en estadios tempranos, posibilitando la intervención terapéutica rápida, con especial atención a las patologías de mayor impacto sanitario, presente y futuro, del Sistema Nacional de Salud (SNS), como son las enfermedades crónicas, las enfermedades oncológicas, las enfermedades raras y las enfermedades neurológicas. Todo ello, consolidando la equidad en el acceso a la alta tecnología y mejorando la calidad asistencial y la seguridad de pacientes y profesionales".

Sus objetivos específicos son:

- Reducir la obsolescencia del parque tecnológico de equipos de alta tecnología del SNS, garantizando la renovación del 100% de los equipos (instalados en centros de titularidad y gestión pública, y siendo de explotación pública) que tienen 12 o más años y, adicionalmente, de los aceleradores lineales y equipos de tomografías computarizadas de 10-11 años, en línea con las recomendaciones de las sociedades científicas.
- Elevar, como mínimo, un 15 %, la tasa media de densidad de equipos de alta tecnología por 100.000 habitantes, con objeto de mejorar la equidad en el acceso en todo el territorio nacional, acercar el servicio a los y las pacientes y situar al SNS, de forma progresiva, en la media europea.




Figura 1. Portada del documento "Plan INVEAT", del Ministerio de Sanidad

El Ministerio de Sanidad, tras un análisis de la situación actual y del entorno, definió un modelo basado en criterios objetivos para la priorización de las inversiones en el Sistema Nacional de Salud y determinó qué nuevos equipos serían necesarios y cuáles deberían renovarse. También estableció un calendario para la instalación y puesta en marcha de los equipos identificados, que contempla septiembre de 2023 como fecha máxima.

## Licenciamiento de las instalaciones radiactivas

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) tiene como fin primordial velar por la

seguridad nuclear y la protección radiológica de las personas y del medio ambiente.

La misión del CSN y su objetivo único y fundamental es «proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, consiguiendo que las instalaciones nucleares y radiactivas sean operadas por los titulares de forma segura y estableciendo las medidas de prevención y corrección frente a emergencias radiológicas, cualquiera que sea su origen». (Plan estratégico del CSN. 2020-2025) [2]

En el artículo 2 de la Ley 15/1980, de creación del CSN, se recogen sus funciones, entre las que se encuentra: "b) Emitir informes al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio[1], relativos a la seguridad nuclear, protección radiológica y protección física, previos a las resoluciones que este adopte en materia de concesión de autorizaciones para las instalaciones nucleares y radiactivas".

En el punto 2 del artículo 36 del Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas (RINR) [4], se establece que «las instalaciones radiactivas con fines científicos, médicos, agrícolas, comerciales o industriales requerirán una autorización de funcionamiento, una declaración de clausura y, en su caso, una autorización de modificación y de cambio de titularidad».

En nuestro país, por tanto, no se licencian equipos sino las instalaciones que albergan esos equipos. La autorización de las instalaciones radiactivas médicas implica en primer lugar la evaluación y análisis, por parte del área de Instalaciones Radiactivas y Exposiciones Médicas (IREM) de la Subdirección de Protección Radiológica Operacional del CSN, del proyecto en lo relativo al diseño, blindaje, sistemas de seguridad, organización y sistema de gestión en funcionamiento normal y accidentes, a fin de comprobar que cumple la normativa. Si la evaluación es favorable, el órgano ejecutivo de Industria de las comunidades autónomas y del Ministerio concede la autorización de funcionamiento o modificación y, tras las comprobaciones realizadas en la inspección previa, el CSN emite la notificación de puesta en marcha.



Equipo TAC multicorte.

En los artículos 38 y 40 del RINR, se recoge la documentación que deberá acompañar a la solicitud de autorización de funcionamiento o de modificación de una instalación radiactiva con fines médicos.

| | ALE | Braquiterapia | TC de planificación | PET-TC | SPECT-CT |
|---|---|---|---|---|---|
| Renovaciones | 62 | 25 | 27 | 15 | 91 |
| Ampliaciones | 24 | 5 | 7 | 30 | 12 |
| **Total** | **86** | **30** | **34** | **45** | **103** |

**Tabla 1. Número total de solicitudes por tipo de equipo.** Número total de equipos a renovar y ampliar, y número total de equipos que será objeto de evaluación por parte del CSN considerando todas las comunidades autónomas e incluyendo aquellas en las que existen acuerdos de encomiendas de funciones de evaluación (actualmente, Baleares, Cataluña y País Vasco).

[1] Actualmente Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico



Arriba, sala digital de un hospital infantil; abajo TAC de torax (izquierda) y radiografía digital de tobillo.





Asimismo, el Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones, los materiales nucleares y de las fuentes radiactivas [5], exige a las instalaciones en las que se utilicen o almacenen fuentes radiactivas de alta actividad que elaboren un Plan de Protección Física, que deberá ser presentado junto con las solicitudes previstas en el RINR.

Por su parte, el CSN ha publicado una serie de guías de seguridad, de carácter recomendatorio, para facilitar la elaboración de la documentación a presentar junto con las solicitudes de autorización, en función del tipo de instalación que se desee autorizar.

Además, el CSN cuenta con una serie de documentos internos que definen las pautas del proceso de evaluación de las solicitudes, y en los que se establecen los criterios de evaluación en cada una de las etapas del proceso.

El documento Plan INVEAT, desarrollado por el Ministerio de Sanidad [1], recoge los proyectos seleccionados por las comunidades autónomas. Estos proyectos comprenden la adquisición o sustitución de más de 800 equipos generadores de radiación o que implican el uso de fuentes radiactivas de uso médico de alta tecnología. A partir de la información proporcionada en el Plan, el área de IREM ha identificado aquellos equipos (tabla 1) que requerirán autorización de instalación radiactiva, de acuerdo con el RINR, y, por tanto, los equipos cuya adquisición (por renovación o ampliación) dará lugar a la evaluación de la solicitud correspondiente. Estos equipos son los siguientes:

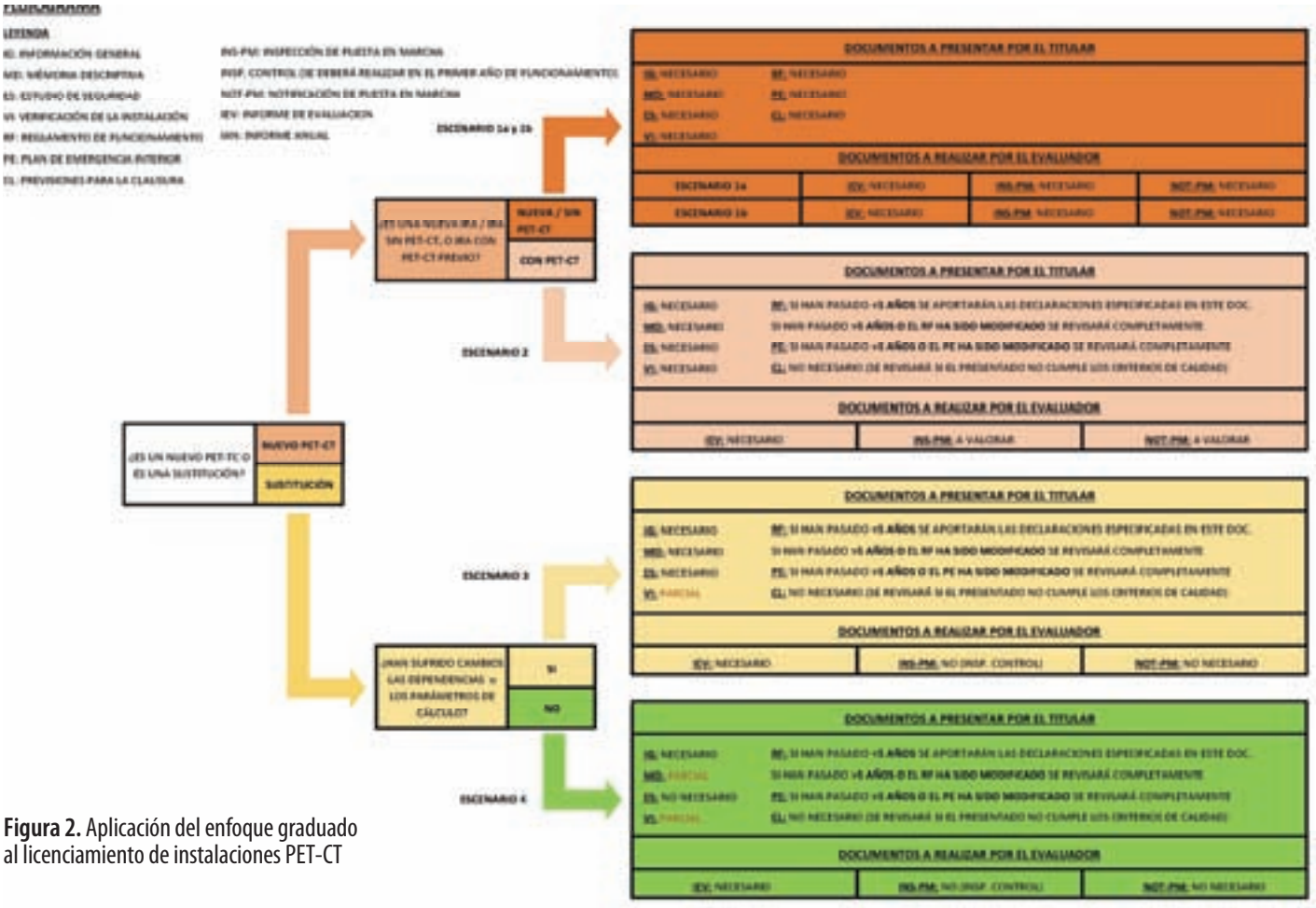



**Figura 2.** Aplicación del enfoque graduado al licenciamiento de instalaciones PET-CT

— Aceleradores lineales de electrones (en adelante, ALE o Linacs),
— Equipos de braquiterapia de alta tasa de dosis (en adelante, braquiterapia o braquiterapia HDR),
— Equipos híbridos de tomografía por emisión de positrones y tomografía computarizada (en adelante, PET-CT),
— Equipos híbridos de tomografía por emisión de fotón único y tomografía computarizada (en adelante, SPECT-CT).

Cabe señalar que no se han incluido en el listado anterior ciertos equipos médicos que serán también objeto de renovación tecnológica, según las previsiones del Plan INVEAT, como equipos de tomografía computarizada o equipos de rayos X para intervencionismo. Esto se debe a que dichos equipos e instalaciones están regulados por el Real Decreto 1085/2009, de 3 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico y, por tanto, están sometidos a un proceso de declaración por sus titulares y de inscripción en el registro correspondiente de la comunidad autónoma, en lugar de a un proceso de autorización, que requiere del preceptivo informe del CSN.

## Actuaciones del CSN

Dado el gran volumen de solicitudes de autorización de funcionamiento y de modificación de instalaciones radiactivas médicas que habrán de ser gestionadas en un plazo de tiempo corto, el área de IREM de la Subdirección de Protección Radiológica Operacional ha llevado a cabo una profunda revisión del proceso de evaluación implantado en la actualidad para estas solicitudes, así como un análisis de la carga de trabajo que representa el Plan INVEAT.

El proceso de revisión se ha centrado en cuatro áreas de trabajo aplicando, entre otros, criterios de información a los titulares/interesados, enfoque gradual (con un alcance adecuado a la complejidad), armonización de criterios de evaluación y estandarización de los formatos.

Las áreas de mejora identificadas son las que se indican a continuación:

a Información a los titulares, con la publicación, en la página web del CSN y dirigido a los Servicios de Protección Radiológica (SPR) y Unidades de Protección Radiológica (UTPR) en el campo de aplicación de instalaciones médicas, sociedades profesionales y suministradores, de un formato estándar de la documentación técnica a presentar por los titulares para so-

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | **1. MEMORIA DESCRIPTIVA** |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 2.1. EQUIPO Y MATERIAL RADIACTIVO SOLICITADO(*) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 2.2. EQUIPOS QUE SE RETIRAN |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 2.3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN |
| 1 | 2 | 3 | 4 | a. Dependencias |
| 1 | 2 | 3 | 4 | b. Ubicación y disposición de las dependencias |
| 1 | 2 | 3 | 4 | c. Materiales constructivos y revestimientos |
| 1 | 2 | 3 | 4 | d. Detectores de radiación ambiental y contaminación superficial |
| 1 | 2 | 3 | 4 | e. Medios de protección para minimizar la exposición y prevenir la contaminación |
| 1 | 2 | 3 | 4 | f. Medios para la descontaminación de personas y superficies |
| 1 | 2 | 3 | 4 | g. Sistema de ventilación, tipo de ventilación |
| 1 | 2 | 3 | 4 | h. Medios de protección contra incendios |
| 1 | 2 | 3 | 4 | i. Planos |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | **2. ESTUDIO DE SEGURIDAD(*)** |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 3.1. SISTEMAS DE SEGURIDAD ASOCIADOS A LA INSTALACIÓN Y A LOS EQUIPOS |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 3.2. IDONEIDAD DE LOS BLINDAJES ESTRUCTURALES |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 3.3. ESTIMACIÓN DE LAS DOSIS RECIBIDAS POR LOS TRABAJADORES |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | **3. VERIFICACIÓN DE LA INSTALACIÓN** |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 4.1. INSTALACIÓN Y ACEPTACIÓN DEL EQUIPO |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 4.2. MANTENIMIENTO, GARANTÍA Y CONTROL DE CALIDAD |
| 1 | 2 | 3 | 4 | a. Mantenimiento |
| 1 | 2 | 3 | 4 | b. Garantía y Control de calidad |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 4.3. PROGRAMA Y PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACIÓN |
| 1 | 2 | 3 | 4 | a. Programa de verificación de los sistemas de seguridad |
| 1 | 2 | 3 | 4 | b. Programa de verificación de los niveles de radiación en la instalación y en sus áreas anexas |
| 1 | 2 | 3 | 4 | c. Programa de verificación de la ausencia de contaminación superficial y personal al finalizar la jornada de trabajo |
| 1 | 2 | 3 | 4 | d. Programa de calibraciones y verificaciones periódicas de los detectores de radiación y contaminación |
| 1 | 2 | 3 | 4 | e. Programa de verificación de la hermeticidad de las fuentes radiactivas encapsuladas |

**Figura 3.** Detalle de la aplicación del enfoque graduado al licenciamiento de instalaciones PET-CT en relación a la documentación a aportar (extracto del "Formato y contenido estándar de la solicitud de equipos híbridos PET-CT")

licitar la autorización de los equipos de radiación de uso médico [6].

b Procedimientos internos de evaluación, adaptándolos a los diferentes escenarios, de acuerdo con la experiencia en seguridad y protección radiológica en instalaciones médicas del área IREM, superior a 20 años en licenciamiento. Asimismo, se pretende tener en consideración el elevado nivel de conocimiento de los servicios de protección radiológica de los titulares.

c Actualización del informe de evaluación para aprobación por el Pleno, con el desarrollo de nuevos formatos que faciliten la redacción por los técnicos del área IREM y que reflejen los criterios de evaluación.

d Optimización del proceso de notificación de puesta en marcha con inspección previa, acortando esta etapa y realizándose la inspección previa cuando se considere técnicamente imprescindible a juicio de las áreas IREM e INRA.

La primera de las áreas de mejora se basa en la premisa de que proporcionar información adecuada a los titulares sobre la elaboración de la documentación a remitir junto con las solicitudes de autorización de funcionamiento y de modificación favorece que la documentación enviada sea completa, clara y precisa. Esto a su vez facilita el análisis por parte del área IREM, evita la necesidad de pedir información adicional y favorece la reducción del tiempo de evaluación y, por lo tanto, de la concesión de las autorizaciones. Asimismo, el objeto de mejorar las directrices técnicas de dicha remisión es proporcionar a los usuarios una referencia útil que complementa las guías de seguridad.

Los requisitos exigidos por el CSN en los documentos de formato estándar publicados han sido planteados, para cada uno de los equipos antes mencionados, en función de cuatro escenarios genéricos previamente definidos que representan, a juicio del área IREM, las situaciones más habituales que afectan a las instalaciones radiactivas médicas. De mayor a menor alcance, los escenarios considerados son los siguientes:

— Escenario 1: Nuevo equipo en nueva instalación o en una instalación existente sin equipos del mismo tipo que el solicitado.
— Escenario 2: Nuevo equipo en instalación existente con otros equipos del mismo tipo que el solicitado.
— Escenario 3: Sustitución de equipo con modificación de la sala en la que está instalado.
— Escenario 4: Sustitución de equipo sin modificación de la sala en la que está instalado.

Las diferentes secciones comprendidas en los formatos estándar describen de forma detallada el contenido de la documentación completa que deben remitir los titulares. Al final de cada sección se ha incluido el apartado *Observaciones,* en el que se especifica qué información, de toda la referida en dicha sección, debe adjuntarse a la solicitud en cada uno de los escenarios citados. Además, los formatos incluyen, en los anexos, detalles sobre cómo presentar la información asociada al estudio de seguridad y al programa de verificación, así como el formato administrativo en el que deben remitirse los documentos de apoyo a la solicitud. Por último, se incluye un anexo que recoge, de forma visual, la documentación que se debe enviar en cada uno de los escenarios, y se muestra el enfoque gradual de cada escenario en función del riesgo. Las figuras 2 y 3 muestran cómo se aplica el enfoque gradual sobre la do-

cumentación solicitada y las diferentes fases del proceso de licenciamiento; por ejemplo, para las instalaciones de PET-CT.

Los formatos estándar se pueden encontrar dentro de la página web del CSN http://www.csn.es, en el apartado *DOCUMENTACIÓN PARA PROFESIONALES* y, dentro de ella, en equipos de radiación de usos médicos.

Como se ha comentado anteriormente, se identificaron, además, aspectos susceptibles de mejora en los procesos internos de evaluación. Los trabajos realizados en IREM en estas áreas no son menores. La revisión de los procedimientos de evaluación del CSN tiene por objeto, además de aplicar el enfoque gradual de forma sistemática, armonizar y precisar mejor los criterios de evaluación. El resultado de este trabajo permitirá disponer de unos procedimientos de evaluación actualizados, adaptados a la experiencia de los titulares, los SPR y el área IREM del CSN. Con el objetivo de agilizar aún más las autorizaciones, el informe de evaluación que se somete a la aprobación del Pleno del CSN está siendo revisado a fin de simplificar y facilitar su elaboración por parte de los técnicos del área IREM y optimizar, de este modo, los recursos disponibles en el CSN.

Por último, se han desarrollado nuevos criterios para requerir la inspección previa a la puesta en marcha, con objeto de llevar a cabo dicha inspección únicamente cuando sea necesario. En particular, dichos criterios han quedado recogidos en el documento formato y contenido estándar de la documentación de apoyo a las solicitudes con equipos híbridos PET-CT, donde se incluye un diagrama que muestra gráficamente el enfoque gradual adoptado para el proceso de evaluación y de necesidad de inspección previa a la puesta en marcha de las instalaciones radiactivas que cuentan con dichos equipos, según los escenarios anteriores.





Arriba, acelerador lineal de teleterapia; abajo, equipo de carga diferida de braquiterapia.

## Contratación externa

Como se ha indicado previamente, el área IREM, en base a su experiencia, superior a 20 años, ha llevado a cabo una estimación de la carga de trabajo derivada de las solicitudes resultantes de la incorporación de los equipos financiados por el Plan INVEAT.

Los resultados de la estimación del esfuerzo previsto, junto con el análisis de los recursos disponibles, han puesto de manifiesto la necesidad de contar con un apoyo técnico externo para hacer frente al compromiso de fechas establecido en el Plan INVEAT. En base a ello, el CSN publicó una licitación para la contratación de recursos externos por un periodo de dieciocho meses, de modo que se garanticen los recursos humanos necesarios, tanto en el área IREM como en las tres comunidades con encomienda de funciones del CSN: Baleares, Cataluña y País Vasco.

Sin embargo, en el punto 2 del artículo 9 del Real Decreto Legislativo 5/2015, de 30 de octubre, por el que se

aprueba el texto refundido de la Ley del Estatuto Básico del Empleado Público [7], se indica: «el ejercicio de las funciones que impliquen la participación directa o indirecta en el ejercicio de las potestades públicas o en la salvaguardia de los intereses generales del Estado y de las Administraciones Públicas corresponden exclusivamente a los funcionarios públicos, en los términos que en la ley de desarrollo de cada Administración Pública se establezca».

El punto 2 del artículo 49 del Real Decreto 1440/2010, por el que se aprueba el Estatuto del Consejo de Seguridad Nuclear [8], se expresa en los mismos términos.

La función de las empresas adjudicatarias (en este caso, la adjudicación de los contratos ha recaído en dos unidades técnicas de protección radiológica) será por tanto, teniendo en cuenta la legislación antes mencionada, realizar una revisión independiente de la documentación que aporte el titular con su solicitud en el marco del proceso de evaluación que llevará a cabo el propio CSN. De forma específica, serán responsables de comprobar que la documentación presentada por el titular contiene todos los aspectos requeridos por el documento de evaluación aplicable al tipo de instalación y al tipo de solicitud. De igual forma, deberán comprobar que el contenido es acorde a la normativa vigente en materia de protección radiológica y a los procedimientos de evaluación del CSN. Todo ello, con el fin de que se facilite la posterior labor de evaluación de la solicitud por parte del CSN.

La asignación es excluyente; es decir, se tendrá un apoyo técnico externo de una UTPR para las solicitudes que afectan a las instalaciones radiactivas de radioterapia (aceleradores lineales de electrones y braquiterapia de alta tasa) y otro para las de medicina nuclear; es decir, equipos PET-CT y SPECT-CT.

El CSN ha establecido, como no podría ser de otra manera, unos requisitos elevados de solvencia técnica así como un requisito de independencia por el que las UTPR contratadas no podrán revisar la documentación de ninguna solicitud de autorización o modificación en cuya elaboración hayan participado.

## El futuro

El Plan INVEAT va a suponer un avance tecnológico extraordinario para el Sistema Nacional de Salud, pero a su vez significa un enorme reto para todos los agentes sociales. Implica a hospitales, profesionales sanitarios, suministradores y fabricantes de equipos radiológicos; pero, además, también es un reto para las diferentes instituciones administrativas que intervienen en un proceso que, por su propia naturaleza, es complejo. El CSN ha contemplado este desafío como parte de una política de mejora continua y la oportunidad de actualizar y optimizar el proceso de evaluación, siempre con la misión de garantizar a la sociedad un uso seguro de las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en el campo médico, dentro del marco de sus competencias. Para ello, el CSN está en contacto frecuente con el Ministerio de Sanidad, así como con los interlocutores designados por las autoridades sanitarias de las comunidades autónomas, con el objetivo de coordinar las actividades necesarias para la obtención de las autorizaciones que se requieren.

Todas las actuaciones llevadas a cabo en el CSN en torno al plan INVEAT, que han sido descritas más arriba, se han realizado con el objetivo de que redunden en la optimización de los procesos de licenciamiento de todas las instalaciones radiactivas médicas, más allá del ámbito inmediato y urgente del plan INVEAT. Y con esa idea en mente se han planteado desde su origen. Se ha trabajado con la certeza de que la revisión de procedimientos, modelos de informe, procesos de evaluación y documentación requerida agilizarán, facilitarán la comunicación y, sobre todo incrementarán la calidad del trabajo, tanto del CSN como de las propias instalaciones.

## Bibliografia


[1] Plan INVEAT. Inversión en Equipos de Alta Tecnología Sanitaria en el Sistema Nacional de Salud. Ministerio de Sanidad. Gobierno de España. Disponible en: https://www.sanidad.gob.es/profesionales/prestacionesSanitarias/PlanINVEAT/pdf/Plan_INVEAT.pdf. [Consulta: 24 de mayo de 2022]

[2] Plan estratégico del CSN. 2020-2025. Consejo de Seguridad Nuclear. Disponible en: https://www.csn.es/documents/10182/1470017/Plan%20Estrat%C3%A9gico%202020%20-%202025.pdf. [Consulta: 24 de mayo de 2022]

[3] Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear.

[4] Real Decreto 1836/1999, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas.

[5] Real Decreto 1308/2011, de 26 de septiembre, sobre protección física de las instalaciones y los materiales nucleares y de las fuentes radiactivas.

[6] Formato y contenido estándar de solicitudes de equipos radiactivos de uso médico. Consejo de Seguridad Nuclear. Disponible en: https://www.csn.es/documents/10182/1010776/Formato+y+contenido+est%C3%A1ndar+de+solicitudes+de+equipos+radiactivos+de+uso+m%C3%A9dico/cf838ab6-4dfe-dc05-fae6-3bbda115575b. [Consulta: 24 de mayo de 2022]

[7] Real Decreto Legislativo 5/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley del Estatuto Básico del Empleado Público.

[8] Real Decreto 1440/2010, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Estatuto del Consejo de Seguridad Nuclear.



DANIEL FELICIANO / WIKIMEDIA

# La esterilización de insectos, una vía orgánica de luchar contra las plagas

Cada vez que hay alguna crisis, y últimamente se suceden, se pone en evidencia la necesidad de una agricultura y una ganadería que nos permita disponer de una fuente saludable de alimentos, fundamental para garantizar la salud humana. La población mundial va en aumento así que son sectores claves para la economía. Junto con el cambio climático y el aumento de las temperaturas la globalización ha repartido por el mundo plagas que muchas veces son difíciles de erradicar y que afectan a numerosos cultivos. Por ello, la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) impulsan desde hace años proyectos encaminados a la aplicación pacífica de las radiaciones para disponer de una buena agricultura y también luchar contra las enfermedades transmitidas por insectos mediante las técnicas de esterilización.

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

Las plagas son responsables, junto con otras enfermedades vegetales, de la pérdida del 40% de los cultivos alimentarios en todo el mundo cada año, según cálculos de la FAO. Las enfermedades que padecen las plantas cuestan anualmente a la economía mundial más de 220.000 millones de dólares y los insectos invasores al menos de 70.000 millones. Además, muchas enfermedades, sobre todo tropicales, son transmitidas por moscas, mosquitos y otros insectos, como la malaria, la fiebre amarilla y la enfermedad del sueño. Entre las actuaciones que la FAO y el OIEA han puesto en marcha para atajar estos problemas está la técnica del insecto estéril, que es utilizada con mucho éxito en la lucha contra un buen número de plagas, por ejemplo contra la mosca tsé-tsé, la mosca del ganado, o la mosca mediterránea de la fruta. Su utilización se da ya en los cinco continentes.

La técnica del insecto estéril (TIE) consiste en la cría masiva de insectos de la misma especie a combatir que, tras ser esterilizados mediante irradiación, son liberados sobre la superficie de los cultivos afectados por la plaga. De esta manera, los insectos estériles se acoplan con los insectos silvestres, obteniéndose como resultado de estas cópulas huevos que no llegan a desarrollarse. Con el paso de generaciones esto provoca que la población del insecto plaga disminuya. Se trata de una acción preventiva, selectiva y ecológica. Gracias a esta herramienta, los machos son esterilizados con radiación ionizada y liberados para aparearse con las hembras, que no pueden reproducirse, lo que provoca una reducción de la población a tratar.

La técnica requiere la producción masiva de machos estériles de alta calidad, lo que significa que deben ser capaces de volar, sobrevivir y dispersarse en el medio ambiente, mezclarse con la población silvestre de su especie y competir en el cortejo, apareamiento e inseminación de hembras salvajes, para reducir así la probabilidad de que esas hembras se apareen con machos salvajes fértiles.



TRAGSA

Biofábrica de Caudete de las Fuentes.

La mosca mediterránea de la fruta, la *Ceratitis capitata,* es una plaga endémica en las áreas frutícolas españolas, sobre todo en el litoral mediterráneo. En la Comunidad Valenciana representa un serio problema en el cultivo de cítricos y numerosas especies frutales. La Consejería de Agricultura de la Comunidad Valenciana, con objeto de minimizar el uso de productos fitosanitarios y promover técnicas de lucha respetuosa con el medio ambiente, se decidió a implantar un programa de control integrado de esta especie mediante TIE. Valencia cuenta, precisamente, con la única biofábrica de España, ubicada en Caudete de las Fuentes y gestionada por la empresa pública Tragsa, que lleva trabajando con esta técnica desde 2007, y concretamente con Ceratitis.

En 2016 comenzó un proyecto piloto para su aplicación contra el mosquito tigre (*Aedes albopictus*), por encargo de la Generalitat Valenciana y dentro del Proyecto Regional Europeo para el Control de Mosquitos Invasores que fue iniciado por el OIEA debido a la creciente presencia del mosquito tigre en nuestro continente y su importancia como agente transmisor de enfermedades graves, como el dengue, zika y chikungunya. El proyecto fue todo un éxito, ya que en 2018, primer año de liberación de machos estériles, la eclosión de huevos se redujo sustancialmente.

En colaboración con el programa conjunto FAO/OIEA, el Grupo Tragsa ha desarrollado un dispositivo capaz de diferenciar mediante visión artificial machos y hembras de mosquitos y eliminar estas últimas mediante rayos láser, ya que son las responsables de la transmisión de enfermedades a través de sus picaduras. El prototipo desarrollado consiste en un disco rotatorio en el que se distribuyen las pupas (estado biológico anterior al adulto) de mosquitos provenientes de la cría masiva en condiciones artificiales. “Los resultados preliminares de los ensayos realizados son muy esperan-

zadores si los comparamos con los obtenidos mediante los sistemas mecánicos manuales de separación de mosquitos por sexo que actualmente existen", aseguran desde Tragsa.

### Esterilización irradiada

En general, la esterilización de los insectos se realiza en la fase pupa del insecto. El día antes de la eclosión de los adultos de las pupas, el insecto desarrolla su aparato genital. En ese momento se somete a la dosis de irradiación controlada, causando que el esperma de los machos quede irreversiblemente dañado. La dosis que se debe administrar es de 90 a 100 Gy. Una vez esterilizadas las pupas se deja que completen su ciclo biológico y los machos adultos son liberados en las plantaciones donde se desea controlar la plaga. "La esterilización se consigue mediante exposición a radiación, para ello se pueden utilizar fuentes emisoras de radioisótopos de alta energía (Co-60 y Cs-137) y aceleradores de electrones de alta energía. La biofábrica valenciana tiene una fuente radiactiva de Co-60. La instalación se clasifica como radiactiva de segunda categoría, como las instalaciones con aceleradores de partículas o de irradiación de investigación y médica.

"Para conseguir la esterilización de los insectos mediante la TIE, es necesario someter al insecto a una dosis de radiación controlada. El equipo utilizado para irradiar los insectos constituye una instalación radiactiva y el proceso de autorización es competencia del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). La cría masiva de insectos se realiza en la biofábrica, pero este aspecto no es competencia del CSN", aclara Blanca Alonso del Área de Instalaciones Radiactivas Industriales del organismo. Esta biofábrica adquirió un irradiador biológico (autónomo y autoblindado), que está autorizado dentro de la instalación radiactiva de la biofábrica de los insectos estériles.



Vicente Dalmau, jefe del Servicio de Sanidad Vegetal de la Comunidad Valenciana.

Las radiaciones ionizantes tienen aplicaciones importantes en medicina, industria e investigación. En industria se utilizan para la esterilización de alimentos, para conocer la composición y estructura interna de diversos materiales, o para detectar errores de fabricación y ensamblaje, entre otras aplicaciones.

La sanidad vegetal avanza hacia un control más orgánico y biológico, dice Vicente Dalmau, jefe del Servicio de Sanidad Vegetal de la Generalitat Valenciana, que prefiere hablar de bioplanta más que de biofábrica. Este técnico avala el procedimiento TIE para tratar y conseguir estos machos estériles de *Ceratitis capitata* para tratar las plagas que afectan a los cítricos, y a otros frutales de verano.

"Esta planta se creó porque empezamos a tener problemas fitosanitarios. Ya teníamos muchas evidencias de que la mosca de la fruta se había vuelto resistente a los insecticidas más frecuentes y otros insecticidas fueron prohibidos por la normativa europea, así que había que buscar alternativas. La Generalitat decidió apostar por la TIE al ser una técnica de control biológico, que no genera problemas para el medio ambiente, y para utilizar esta estrategia era necesario disponer de una bioplanta", añade Dalmau.

"Si otras comunidades no se han sumado a este proyectos es, tal vez, porque es muy costoso. Nosotros ni siquiera estamos cubriendo toda la Comunidad Valenciana, que, solo en su parte central, supone unas 140.000 hectáreas. La Ceratiris ya es una plaga endémica, lo que pretendemos es minimizar los daños en los cultivos, reduciendo las poblaciones por debajo de cierto umbral".

Este trabajo comenzó como un proyecto piloto en 2003, con la construcción de un evolucionario. "Traíamos los insectos de Argentina, que producía ya los machos estériles, y durante dos años hicimos un ensayo para saber si la técnica funcionaba. Los resultados fueron buenos y construimos la bio-

planta, que se puso en marcha en el 2006 y desde 2007 ya pudimos utilizar esta técnica del mosquito estéril. Su ventaja es que soluciona un problema concreto. Al liberar machos estériles de Ceratitis reducimos su población, que es lo que queremos, sin afectar a otros insectos. Los insecticidas no solo matan el insecto que te está haciendo daño sino también a otros que son beneficiosos, así que obtenemos un menor impacto ambiental. Reduces la concentración de plaguicidas, que pueden afectar a la salud de los agricultores y de la gente que pasea por el campo y dejas menos residuos en la fruta, así que el consumidor come una fruta más sana", explica Dalmau.



MIGUEL ÁNGEL MIRANDA

SCOTT BAUER, U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE / WIKIMEDIA

Arriba, fruto infectado por *ceriatitis.* Abajo, *Ceratitis capitata* esterilizada.

### 60.000 hectáreas más

Los agricultores están contentos porque están viendo que una plaga constante en su cultivo tiene ahora menos afección. El edificio de la biofábrica es de la Generalitat valenciana y la gestión es de Tragsa. En enero se informó que la bioplanta recibirá una inversión de 14,2 millones de euros para convertirla en referente mundial de la lucha biológica contra las plagas. Con la ampliación se pretende incrementar en un 60 por ciento la capacidad de producción de machos estériles. La consejera de Agricultura, Mireia Mollà, anunció que se aspira a actuar en 60.000 hectáreas más, que se sumarían a las 14.000 existentes.

La técnica de liberación de insectos macho estériles irradiados está exenta, a nivel global, de las regulaciones de productos biocidas y los animales esterilizados no están clasificados como organismos modificados genéticamente ni como organismos vivos modificados, de acuerdo con el Convenio sobre Biodiversidad Biológica de Naciones Unidas. Su riesgo para los ecosistemas y otras especies no diana se considera significativamente menor que los asociados con tecnologías menos específicas. Sin embargo, antes de implementar un programa de este tipo, es necesario realizar una planificación que incluya una evaluación de riesgos y medidas de mitigación, obtener las autorizaciones pertinentes y garantizar una gestión eficaz y eficiente del programa.

Por ejemplo, según Dalmau, la TIE se combina con otras técnicas, como trampeos masivos, que atraen al insecto. La mosca accede a la trampa y dentro hay un insecticida que la mata, "así vamos bajando poblaciones, que aumenta el

## Distintas experiencias

Factores como el aumento del comercio y los viajes o el cambio climático facilitan la proliferación y expansión global de mosquitos del género Aedes y, en consecuencia, de los patógenos que pueden transmitir, como los virus del dengue, fiebre amarilla, chikungunya y zika. El resurgimiento de brotes de estas enfermedades subraya las limitaciones de los programas convencionales de control de vectores, que se centran en gran medida en la aplicación de insecticidas y la eliminación de los criaderos de larvas.

Por ello se han sucedido las intervenciones en el mundo para frenar su proliferación. Así, un equipo internacional de científicos, con participación española, utilizó drones en una región rural brasileña para lanzar mosquitos estériles de la especie *Aedes aegypti*. La idea es que con menos mosquitos haya menos casos de enfermedades que ahora matan a cientos de miles de personas al año. Y aunque no se espera que se erradiquen todos los mosquitos de una zona, la TIE contribuye a su reducción significativa.

Brasil, Cuba, México, Honduras y Colombia recurren ya a esta técnica para frenar el avance del dengue en sus territorios. Y aunque muchas de estas enfermedades pertenecen al ámbito tropical cada vez aumentan más su territorio. Recientemente se detectó el *Aedes aegypti* en las Islas Canarias, y aunque pudo ser controlado, puede volver a aparecer.

La Organización Mundial de la Salud ha publicado una guía de apoyo para la toma de decisiones a la hora de plantearse la implementación de un programa de esterilización de mosquitos.

efecto de liberar machos estériles. Estas trampas se colocan también en higueras, que es un huésped muy atractivo para ellas y se suelen tener dispersas en los campos. Pero de tantos tratamientos, la mosca se había vuelto resistente y este conjunto de técnicas son mejores para el medio ambiente y para la salud".

La técnica del mosquito estéril se viene utilizando a nivel mundial desde los años 50. Empezó en Estados Unidos, pero ahora hay proyectos en todo el mundo. En el sur de California hay un programa muy parecido al de Valencia, de forma preventiva, ya que ellos no tienen *Ceratitis capitata*, pero temen posibles migraciones desde América central. Se estima que la infecta más de 250 especies de fruta y se ha convertido en una auténtica plaga en las zonas tropicales, subtropicales y mediterráneas, extendiéndose por Asia, África, América e, incluso, Australia. Las pérdidas que provoca en las cosechas son millonarias.

Para Miguel Ángel Miranda, del grupo de Entomología Aplicada de la Universidad de las Islas Baleares (UIB), la plaga de la mosca mediterránea lleva más de cien años siendo un problema para los agricultores, y cree que la implantación de la TIE puede ser buena, ya que la Ceratitis no tiene enemigos naturales. Baleares también está afectada por ella, "así que siempre ha habido intención de utilizarla. Además, al ser una isla seria muy útil. Existe voluntad científica, pero falta la voluntad técnica y práctica de la administración". Y cita el ejemplo del beneficio que supone para Valencia, uno de los principales exportadores de cítricos en el mundo.

Para Miranda, "está demostrado que la técnica del mosquito estéril es mucho mejor para el medio ambiente que el uso de plaguicidas, al ser más inocua. Ahora que se quiere fomentar la agricultura ecológica, su uso es muy recomendable. También porque no hay impacto sobre otra fauna. Los plaguicidas de amplio espectro destruyen a depredadores y parásitos que ayudan a controlar plagas como arañas o avispas y también a los animales que forman parte del ecosistema como las aves que se alimentan de ellos".

Para este entomólogo "el mayor problema es lo que cuesta implantarla a nivel local. Pero deberíamos pensar y tener en cuenta que otros insectos, como los polinizadores, estarían más protegidos. Esto sería un claro beneficio para el medio ambiente". Miranda también trabaja con la mosca del olivo, para la cual también se pensó en utilizar la esterilización, pero no se llegaron a hacer programas de control ya que es muy difícil de criar en un laboratorio y tiene depredadores naturales.

El cambio climático es, además, un factor que agrava el problema. El aumento de temperatura influye en dos aspectos: las especies invasoras encuentran el nuevo hábitat mucho más adecuado y, por otro lado, esos patógenos pueden transmitir enfermedades muy fácilmente. Incluso las especies autóctonas transmiten patógenos de una forma más agresiva, como es el caso de un virus transmitido por el mosquito común. "La pandemia nos ha enseñado que podemos fabricar ordenadores, pero sin agricultura y ganadería todo se tambalea", dice Miranda.

En Europa las biofábricas de insectos macho estériles suelen estar clasificadas y autorizadas según la cantidad de in-





MIGUEL ÁNGEL MIRANDA

Miguel Ángel Miranda, de la Universidad de la Islas Baleares. A la derecha, mosquito tigre, una especie tropical que circula ya por toda España.

sectos producidos por día. Cada especie y cada etapa de desarrollo (es decir, pupas o adultos) tienen una susceptibilidad específica a las dosis de irradiación. El parámetro del nivel de esterilidad masculina deseado (no necesariamente la esterilidad total) debe establecerse teniendo en cuenta aspectos como la competitividad o posibles cambios en las poblaciones.

## Varias técnicas

El mosquito tigre es una de las preocupaciones del biólogo Rubén Bueno, que compagina sus clases universitarias con la dirección técnica de la empresa de control de plagas Lokímica. "Nosotros trabajamos con los municipios, por ello hemos estudiado las distintas técnicas a implantar en distintas zonas de la ciudad de Valencia para saber que medidas tomar, sobre todo con mosquitos que pueden producir enfermedades como el zika o el dengue", dice.

El problema del mosquito tigre es que, pese a ser tropical, circula por toda España. "No solo aquí hemos tenido dengue; también en Italia y Francia, así que necesitamos diseñar nuevas estrategias de control, porque los medios convencionales, como los insecticidas, no son suficientes. El mosquito tigre, al necesitar muy poca agua puede depositar las larvas en numerosos sitios, tanto domésticos como comunitarios, incluso en los jarrones con agua de los cementerios", explica Bueno.

"Ahora empleamos biocidas en los criaderos. Pero dentro de las nuevas estrategias están las de generar esterilidad en la población de mosquitos, bien sea a través de la liberación de machos irradiados, o utilizando la técnica del insecto incompatible mediante el uso de la bacteria Wolbachia, que no vive de manera natural en el mosquito *Aedes aegypti* pero que, al tenerla en su organismo, hace que la hembra sea incapaz de transmitir los virus causantes del dengue o el zika. Por eso, diferentes programas están introduciendo en estas poblaciones mosquitos portadores de la bacteria para que se reproduzcan y el microorganismo pase de generación a generación, evitando así que las hembras transmitan los virus".

Para este especialista "los criaderos de mosquitos no están exentos de dificultades, uno de ellos es controlar que los mosquitos sean todos machos. Para esto se necesitan herramientas de sexado más fiables y a lo mejor poder utilizar la tecnología, como la inteligencia artificial, en lugar de técnicas mecánicas. Además, hay que adecuar los protocolos a los nuevos desafíos".

Lokímica trabaja en toda España y su experiencia indica que los tratamientos mediante insecticidas hay que hacerlos en lugares muy controlados. Por eso en su opinión la TIE es tan interesante. "En un estudio que realizamos liberamos 90.000 mosquitos macho estériles, pintados de rosa o de verde para estudiar su comportamiento. Así comprobamos cómo competían con los silvestres, y puedo apuntar que estas liberaciones funcionaron muy bien, ya que se disminuyeron los huevos, y los mosquitos liberados vivieron varias semanas, así que conservaron su longevidad y eso es bueno porque queremos machos activos, longevos y buenos voladores, como los machos salvajes, para competir por las hembras".

DEPOSITPHOTOS



Los manglares son sumideros de carbono muy eficientes y se encuentran en peligro de desaparición.

Ecosistemas marinos para mitigar el cambio climático y apostar por créditos de carbono

# Carbono teñido de azul

Los manglares, las praderas marinas y las marismas pueden recoger dióxido de carbono de la atmósfera y almacenarlo durante miles de años. Esto es una solución que suma a la imperativa reducción global de emisiones pero, si estos hábitats no se protegen, puede tener el efecto contrario y liberar el carbono acumulado. Los proyectos de carbono azul buscan apoyar la preservación y restauración de estos ecosistemas, mermados por la acción humana, ayudándose de iniciativas como los bonos de carbono en los mercados de compensación.

■ Texto: **Patricia Ruiz Guevara** | periodista de ciencia ■

Cuando se piensa en sostenibilidad, medio ambiente o economía circular, el color asociado que viene a la mente es el verde. Verde césped, verde musgo, verde pino. Pensamos en la naturaleza relativa a los bosques y las plantas como la parte del planeta que hay que proteger y cuidar, pero hay una porción de la Tierra mucho mayor cubierta por otro color: más de un 70% de la superficie da nombre al planeta azul, y también alberga organismos vegetales. No es solamente un porcentaje que salvaguardar; también puede ser una herramienta de preservación.

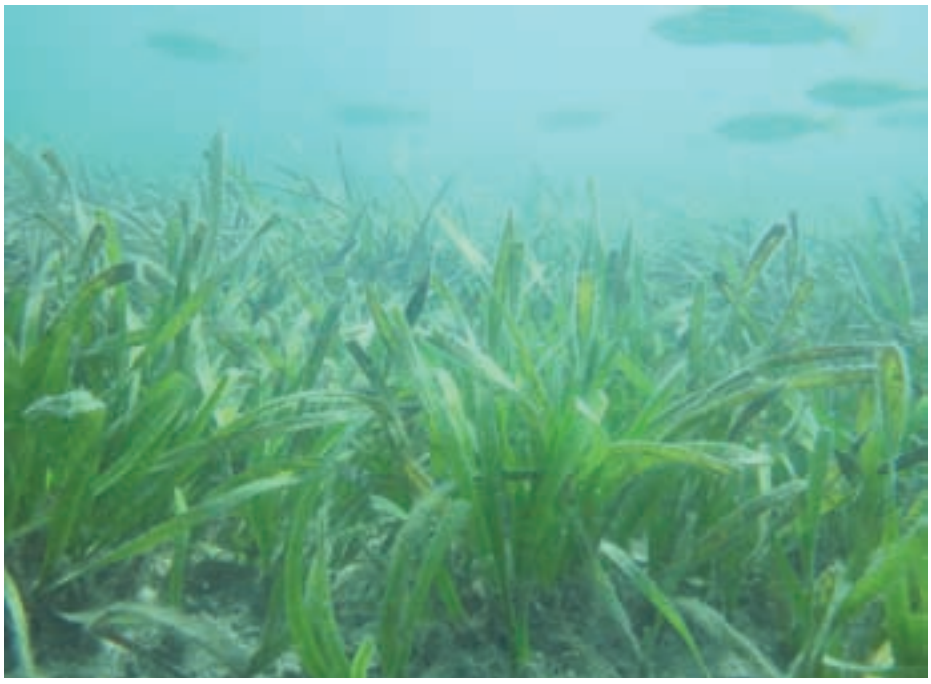
El impacto de las emisiones de dióxido de carbono en la Tierra es señalado como el principal desencadenante del cambio climático. Exceptuando 2009, con la crisis y la recesión económica mundial, y 2020, un año marcado por la pandemia en el que la vida se detuvo, las emisiones mundiales de $CO_2$ de los combustibles fósiles y la industria no han dejado de crecer. En el ensayo El planeta inhóspito: la vida después del calentamiento, David Wallace-Wells recoge que el ritmo en que se añade carbono a la atmósfera "es cien veces más rápido que en cualquier momento de la historia de

la humanidad antes del comienzo de la industrialización: ahora mismo hay un tercio más de carbono en la atmósfera que en cualquier otro momento de los últimos 800.000 años".

Pero hay unos ecosistemas costeros que pueden tener un gran peso en la batalla contra el cambio climático: los sumideros de carbono azul pueden secuestrar carbono y almacenarlo en los sedimentos oceánicos de manera más rápida y eficiente que la tradicional fotosíntesis de los bosques terrestres. Desafortunadamente, muchos de estos hábitats están bajo la amenaza de desaparición por la acción humana: el turismo, la urbanización costera, la pesca de arrastre o por capricho estético. Las marismas no se consideraban un paisaje hermoso, nadar entre praderas marinas no es lo que buscan los cazadores de fotos de Instagram. Acabar con estos sumideros no solo provoca que dejen de absorber carbono: también se corre el riesgo de que vuelva a la atmósfera el que ya habían capturado.

Para apoyar que se integren políticas de protección y restauración de estos ecosistemas, están surgiendo metodologías para calcular y medir cuánto carbono pueden secuestrar. Así se pueden generar proyectos para empresas y organizaciones que integren créditos de este carbono en los mercados de compensación. Bienvenidos a la sostenibilidad azul.

Una parte de los ecosistemas marinos puede capturar dióxido de carbono de la atmósfera, almacenándolo en forma de biomasa y sedimentos. "Los pastos marinos acumulan elementos químicos de la columna de agua, tanto en los tejidos superficiales como subterráneos (por ejemplo, hojas, raíces y rizomas). Cuando estos tejidos mueren, una parte de ellos se acumula en el suelo contribuyendo a la acumulación vertical del sustrato", explica Cristian Salinas, investigador del Centro de Investigación de Ecosistemas Marinos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Edith Cowan, Australia. Esto da como resultado la acumulación de depósitos ricos en materia orgánica durante miles de años, "lo que contribuye al secuestro a largo plazo de elementos biogeoquímicos, como es el caso del dióxido de carbono", completa.



CRISTIAN SALINAS

Pradera marina en Cockburn Sound, Australia occidental.

Estos ecosistemas marinos de carbono azul son principalmente manglares, marismas de marea y praderas marinas; estas últimas almacenan los mayores depósitos de carbono. Lo mejor es que sus cifras de éxito son mucho mayores que las de los bosques terrestres. Según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), son capaces de secuestrar $CO_2$ con mayor rapidez que los bosques, incluso aunque sean de menor tamaño. Aunque los ecosistemas de carbono azul cubren menos del 0,5% de la superficie marina mundial, pueden almacenar entre tres y cinco veces más carbono que los bosques tropicales e, incluso, hasta por diez veces más tiempo.



Cristian Salinas.

Esto repercute en el cambio climático. El carbono azul puede reducir en un 3% las emisiones mundiales de dióxido de carbono, según el estudio Blue carbon as a natural climate solution, publicado en noviembre de 2021 en la revista *Nature Reviews Earth & Environment,* de la iniciativa australiana Blue Carbon Lab de la Universidad Deakin. En un año, pueden secuestrar una cantidad de carbono similar a casi la mitad de las emisiones generadas por el transporte a escala mundial.

En general, entre un 2% y un 7% de almacenamiento de carbono azul se pierde cada año. Según el proyecto The Blue Carbon Initiative, en el caso de los manglares se reduce un 2% de su superficie por año, y esto libera hasta un 10% de las emisiones de la deforestación a nivel mundial. En las marismas, su tasa de reducción va de un 1% a un 2%; ya han perdido más del 50% de su extensión global histórica.

Si ese carbono lleva encerrado ahí milenios, ¿cómo no se ha protegido antes? "En la década de 1990 empezamos a estudiar el ciclo del carbono en praderas marinas", recuerda Miguel Ángel Mateo, investigador titular del Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB) del CSIC y una autoridad en la materia. "Nos dimos cuenta de que formaba sedimentos muy orgánicos y que había acumulaciones de miles de años. A raíz de esto empezamos a hacer estimaciones más globales de cuánto podía representar todo ese carbono y nos dimos cuenta de que había una cantidad significativa", continúa. En los últimos diez años han proliferado los estudios y proyectos sobre carbono azul en distintas partes de la geografía mundial.



Nuria Marbà haciendo trabajo de campo en una pradera de Posidonia oceanica en Cabo Greco, Chipre.

## Cuánto y cuánto tiempo

Contabilizar cuánto carbono acumulan estos sumideros azules y durante cuánto tiempo lo hacen es esencial para poder justificar su preservación. "Como el carbono está enterrado en la tierra, lo que hacemos es colocar tubos en el sedimento y sacar muestras. Utilizamos técnicas de análisis con isótopos radiactivos, como Plomo 210. Podemos encontrar sedimentos de hace unos 100 años a 30 o 40 centímetros, así como calcular su concentración de carbono", explica Nuria Marbà, investigadora del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados. Pero hay más profundidad, y muchas de esas praderas llevan acumulando carbono desde hace 4.000 o 5.000 años. Para averiguarlo, "datamos con Carbono-14 de la materia orgánica y hacemos estimaciones".

Una colaboración entre la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) ha logrado cuantificar el carbono acumulado y representar cartográficamente el proceso en las praderas oceánicas de



Nuria Marbà.

MNMNM



Miguel Ángel Mateo muestreando carbono azul en las marismas de Gales.




PATRICIA RUIZ GUEVARA

Marisma desecada en Cádiz.

España (exceptuando la demarcación marina de la costa española del Atlántico Norte) por primera vez. Para ello, han utilizado el modelo de InVEST Blue Carbon de la Universidad de Stanford. "Un píxel del territorio se entiende como una unidad de superficie, una imagen fotográfica que da información de varios datos y se pueden superponer varias capas de esa información. Sobre eso, se aplican matemáticas y algoritmos", explica Alberto González-García,



Alberto González-García.

investigador en la Universidad de Grenoble Alpes. El modelo permite alterar los escenarios futuros para ver qué sucede en caso de que desaparezcan estos ecosistemas.

"Con técnicas de modelización y predicción, vemos cómo pueden cambiar en base a las presiones a las que están sometidos. Por ejemplo, si en el año 2020 tenemos una pradera que en el 2050 podría desaparecer por la acumulación de presiones que está sufriendo, el modelo dará como resultado que no está habiendo una acumulación, sino una emisión de carbono", explica González-García. Con estos modelos, han trabajado en tres escenarios de cara a 2050: futuro sin cambios respecto a la actualidad; futuro sostenible; y futuro no sostenible. Gónzalez-García alerta de que "ninguno de los tres escenarios supone una mejora sustancial, y el escenario actual presenta una pérdida de en torno al 24% del carbono; hay que tomar medidas".

## Mercados de carbono

A quien no le parezcan suficientes los motivos medioambientales puede evaluar los económicos, porque la preservación de los sumideros de carbono azul es una cuestión de sostenibilidad, pero también de dinero. Por ejemplo, en España, "el impacto económico de perder estos ecosistemas equivale a 17.974 millones de euros, alrededor del 1,6% del PIB español", detallan los autores de la investigación UAM-URJC.

La posibilidad de monetizar da oportunidad a la inversión y el beneficio. Muchos de los proyectos mencionados tienen algo en común: tanto Life Blue Natura, como Vida Manglar en Colombia y la iniciativa del Gobierno de Australia buscan de una manera u otra certificar acciones relativas a la reducción de emisiones de carbono mediante créditos de carbono; en este caso, azules.El mensaje para las empresas es claro: no contaminar, no emitir. Pero, donde no se llega, está la oportunidad de compensar con los bonos de carbono. Para hacerlo de manera oficial, hay que utilizar los mercados regulados (controlados por gobiernos e instituciones), donde sí se pueden desgravar emisiones: un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono.

## Mapas azules

Los manglares, las marismas y las praderas marinas se encuentran en todos los continentes excepto en la Antártida. En cada caso con su propia historia de destrucción y preservación. He aquí cuatro ejemplos:

### Europa y la Posidonia oceanica

Por toda la costa europea hay sumideros de carbono azul distribuidos con diferente densidad: grandes praderas marinas en el Mar del Norte, el Báltico y el Mediterráneo. En este, prolifera una especie endémica, la *Posidonia oceanica*. Estas praderas pueden almacenar una gran cantidad de carbono en su interior durante milenios. En España, esta especie bordea el litoral levantino y las Islas Baleares; las praderas que rodean la isla de Ibiza fueron declaradas Patrimonio de la Humanidad por la Unesco en 1999. El hábitat de esta especie está considerado como vulnerable y su extensión se podría haber reducido un 34% en los últimos 50 años, según datos del proyecto Life Blue Natura, de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), la Junta de Andalucía y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) entre 2015 y 2021.

En Andalucía también hay *Posidonia oceanica,* que secuestra cada año unas 30.000 toneladas de $CO_2$: en el Parque Natural Cabo de Gata, en Almería, hay más de 7.000 hectáreas de estas praderas. En otra iniciativa de Life Blue Natura se ha buscado protegerlas, evitando que las embarcaciones de recreo arranquen las praderas al arrojar las anclas.

Desde Austria, el Proyecto Manaia busca entender las praderas y conservarlas. Manuel Marinelli, biólogo marino y fundador del proyecto, vaticina una tendencia poco halagüeña: "Hemos visto cómo las praderas del norte del mar Adriático han desaparecido en cinco años y las del resto del Mediterráneo han disminuido en densidad y tamaño. Están en peligro". Por eso, trazan mapas de los hábitats de la *Posidonia oceanica* y hacen un seguimiento de su distribución y densidad; cuando descienden (en la mayoría de las situaciones) tratan de entender por qué.



Manuel Marinelli.

"Las praderas han disminuido de forma masiva debido a la pesca de arrastre de fondo, especialmente en el Mar del Norte. En el Mediterráneo, el declive se debe principalmente a la eutrofización, causada por el exceso de nutrientes en el agua residual de la agricultura, y a la proliferación de construcciones en zonas costeras, puertos deportivos y otras influencias mecánicas", enumera Marinelli.

### España y las marismas de Cádiz

"Las marismas eran el vertedero de Cádiz". Con esta contundencia, Ignacio Hernández, catedrático del Departamento

Pero hasta ahora aquí entran solo los bonos verdes, los de bosques terrestres. Los azules quedan, de momento, relegados a los mercados de carbono voluntarios, donde las empresas se autoexigen cumplir unos parámetros de emisión, pero no los pueden compensar oficialmente. Por ahora, "el único rédito que puede obtener una empresa mediante la realización de créditos de carbono azul en los mercados voluntarios es prestigio y estar alineado con sus valores de responsabilidad social corporativa", afirma Mateo, del Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB-CSIC).

Así, una empresa puede decidir voluntariamente recuperar o replantear un ecosistema que capte dióxido de carbono y pagará el precio por esa tonelada. "En el caso del proyecto de compensación en el Parque Natural Cabo de Gata con Life Blue Natura, la tonelada se contabilizaba a 500 euros. En los mercados regulados, está a 50", indica Mateo. Es una decisión cara, que, ahora mismo, solo sirve para mejorar la reputación. Pero si algunos países lo encuentran positivo "pueden implementar algún beneficio o ventaja fiscal en el mercado voluntario de carbono azul", añade. Por eso, es vital transmitir que "una hectárea de *Posidonia oceanica* o marisma es mucho más valiosa ecológicamente hablando que una hectárea de pino o una de un bosque de eucalipto".

de Biología de la Universidad de Cádiz, transmite el deterioro al que se ha visto sometido este paraje natural. Cuando se pone un pie en ese espacio yermo, próximo a la desembocadura del río Guadalete en el Parque Natural Bahía de Cádiz, su rotundidad se confirma. "Esto es una marisma domesticada, sometida y desecada", se lamenta. Sin embargo, la zona es rica en sedimentos de carbono.

"El carbono, cuando la planta muere, se va degradando; hay una parte que revierte a la atmósfera de nuevo, pero hay una fracción que queda enterrada en el sedimento. Si se destruyen las marismas, este carbón también se libera", explica Hernández. Por eso, "cuanto mayor sea la superficie que podemos conservar, mayor cantidad de carbono azul tendremos asegurada bajo tierra". El proyecto piloto de compensación de carbono azul en marismas mareales de Bahía de Cádiz, en el marco de Life Blue Natura, ha tratado de contabilizar el incremento de las existencias de carbono a largo plazo y promover su restauración, restableciendo el flujo natural de las mareas y rehidratando las marismas desecadas.

### Colombia, los manglares y la hierba de tortuga

En el Caribe colombiano, las praderas marinas presentan una gran acumulación de biomasa en la especie *Thalassia testudinum,* conocida como hierba de tortuga. Puede que lo hagan lentamente, pero estos pastos marinos secuestran el equivalente a las emisiones de dióxido de carbono de 50.000 coches por año. Un trabajo multidisciplinar entre centros de España, Australia y Colombia ha confirmado que son sumideros de carbono que superan la media global. "Vimos que las praderas colombianas pueden almacenar, en el primer metro de sedimento, unas 241 toneladas de carbono por hectárea. El promedio en praderas marinas es de 150", explica Núria Marbà. Son zonas de acumulación de materiales "muy productivas, un área privilegiada y un hallazgo clave contra el cambio climático".

En Colombia también beben del agua los manglares, a orillas de cuencas como la del río Sinú y en zonas costeras. Estos bosques, que viven al límite entre la tierra y el mar, están bajo la presión de la expansión de las tierras agrícolas, las infraestructuras turísticas insostenibles y el aumento de la tala de árboles. La organización medioambiental Conservación Internacional, INVEMAR y la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS) han lanzado Vida Manglar, el primer proyecto de carbono azul que se desarrolla en el país, que pretende conservar más de 7.600 hectáreas de bosques y reducir 1,3 millones de toneladas de emisiones de carbono.

### Cita a tres en Australia

En Australia se encuentran los tres ecosistemas de captura de carbono azul. En las praderas marinas, que se distribuyen en la costa sur, destacan las especies *Posidonia australis, Posidonia sinuosa* y *Amphibolis antarctica*.

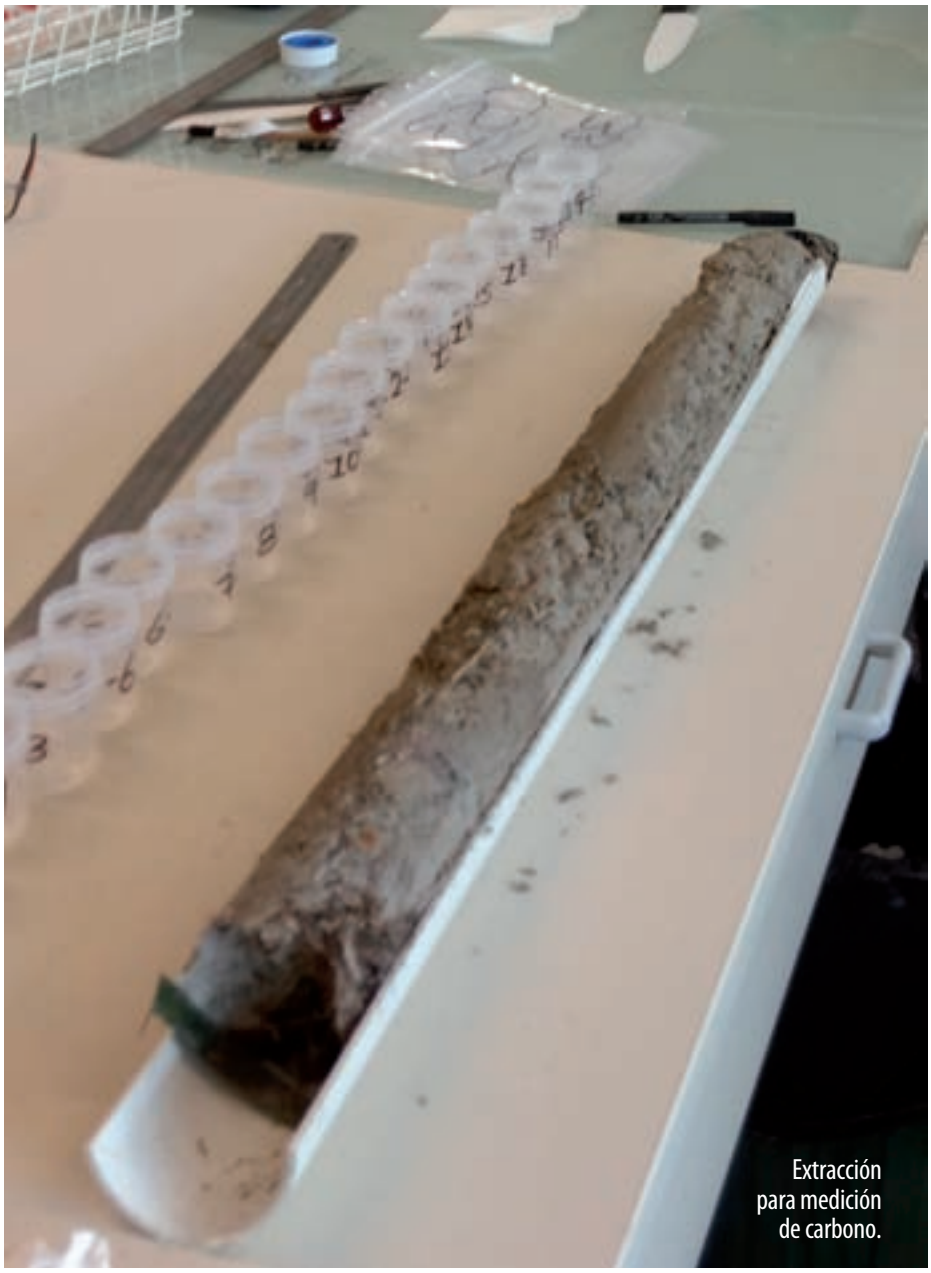
Para manglares, "se están utilizando nuevos modelos para contabilizar el carbono azul y así poder respaldar su restauración", indica Salinas. Es el caso del proyecto de Catherine E. Lovelock, de la Universidad de Queensland, que investiga entre otros aspectos la modelización de la acumulación de biomasa de los manglares.

El Gobierno australiano también tiene en marcha iniciativas con las que desarrollar un "método de carbono azul que cree oportunidades para almacenar carbono a través de la restauración de los manglares y las marismas, y reduzca las emisiones de metano y óxido nitroso a través de la reintroducción de los flujos de las mareas".

"Yo creo que las empresas nunca van a poder compensar de manera oficial usando el carbono azul, es poco rentable y muy difícil de verificar", zanja Mateo. Sin embargo, se intentan dar pasos para regularlo lo máximo posible. En el caso de Life Blue Natura, se ha redactado el primer estándar de carbono azul de Andalucía, España y Europa. "El proyecto es absolutamente pionero porque hemos partido de cero, hemos hecho el inventario de cuánto $CO_2$ está acumulado en praderas marinas con mucho rigor científico y hemos creado el estándar que uno tiene que seguir para que ese proyecto sea aceptado en los mercados de carbono (requerimientos, muestras, analíticas)", afirma el investigador y colaborador de la iniciativa. Los dos experimentos piloto, en Cádiz y Almería, sirven de ejemplo para ese estándar, y han convencido a la Junta de Andalucía de que esto debe incorporarse en el sistema andaluz de compensación de emisiones.

### La pescadilla se muerde la cola

Los ecosistemas de carbono azul capturan emisiones de $CO_2$, pero tienen muchísimos más beneficios. "Es una zona de cría, estabiliza el sustrato y mantiene vivo y en equilibrio el ecosistema; por ejemplo, en el caso de las praderas marinas, si las perdemos también perderemos un tercio de todas las especies del Mediterráneo, que pasan parte de su vida allí", afirma Manuel Marinelli, del Proyecto Manaia.



Extracción para medición de carbono.

CRISTIAN SALINAS



Río Guadalete, Marismas de la Bahía de Cádiz.

IUCN / LIFE BLUE NATURA

Esto, a su vez, puede influir "en la actividad pesquera y marisquera y la supervivencia de comunidades costeras, al desaparecer ese hábitat y, por tanto, sus especies", añade Barbà. Salinas añade otro beneficio: "Los pastos marinos contribuyen a la protección de las áreas costeras al generar, estabilizar y atrapar sedimentos". Por ejemplo, contra las tormentas y el aumento del nivel del mar. A la postre, no proteger los ecosistemas marinos es además un círculo vicioso de empeoramiento del cambio climático.

Por un lado, Salinas recuerda que "el aumento de la frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos (como olas de calor, ciclones o inundaciones) en el escenario de cambio global actual es una amenaza crítica para las praderas marinas, y muchas de estas nuevas amenazas naturales son el resultado del calentamiento global". Por otro, los hábitats marinos son fundamentales para paliar precisamente estos efectos. Por eso, hay que visibilizar la importancia de estos ecosistemas. "Abordarlos de una manera más innovadora puede ser un primer paso, que además tendrá muchos efectos en cómo los percibe la sociedad y provocará cambios en otros sectores", afirma Alberto González-García.

En esta línea, Marinelli se lamenta del poco valor que se da a los tesoros oceánicos: "Muy poca gente mete la cabeza en el agua y toma conciencia de las maravillas que hay bajo la superficie. Un arrecife de coral es impresionantemente bello, mientras que las praderas marinas pueden parecer espeluznantes a primera vista y a la gente no le gusta nadar en ellas, pero son mucho más que eso".

Para apoyar esta concienciación, los créditos de carbono azul pueden ser un aliciente entre el abanico de propuestas que se necesitan por parte de los propios países, las organizaciones, las empresas y la sociedad para proteger fieramente los ecosistemas de carbono azul.

# Reacción en cadena

Textos: **Noemí Trabanco y Pedro Mateos |**

NOTICIAS

## Bacterias que 'comen' metano y dióxido de carbono

Un consorcio de grupos de investigación en el que participan científicos españoles y belgas ha logrado identificar el importante impacto de la microbiota (conjunto de microorganismos en un determinado ambiente) de los ecosistemas subterráneos en la eliminación de gases que influyen en el efecto invernadero, como el dióxido de carbono ($CO_2$) y el metano. Según los resultados del artículo, publicado en la revista *Science of the Total Environment,* los microorganismos establecidos en cuevas pueden llegar a eliminar entre el 65 y el 90% del metano de su atmósfera. Esta eliminación se produce, preferentemente, por especies de bacterias metanotróficas de varias familias como las *Methylomonaceae.* En el caso del $CO_2$, especies de las familias bacterianas *Crossiella* y *Nitrosococcaceae* serían las principales efectoras de la absorción de este gas.

"El potencial de este descubrimiento es muy alto si somos capaces de aplicar los resultados en la mitigación mediante la bio-remediación", explica Sergio Sán-



chez-Moral, uno de los autores del trabajo e investigador en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid (MNCN-CSIC). Los investigadores han evidenciado que existen relaciones de dependencia mutua entre *Crossiella* y las bacterias nitrificantes que capturan $CO_2$, consumen nitrógeno inorgánico e inducen la formación de lo que se denomina leche de luna o *moonmilk,* una sustancia blanca y cremosa, compuesta principalmente por calcita y proveniente de esa fijación de $CO_2$, que está presente en muchas cuevas y que, tras su descubrimiento, fue utilizado como fármaco durante los siglos XVII y XVIII. Esto hace que los sedimentos de las cuevas puedan ser considerados casi como suelos, desde el punto de vista ecológico, con una función importante en el ciclo del carbono y el nitrógeno.

## Tormentas que pueden salvar las playas

Es evidente que las tormentas extremas pueden llegar a provocar fuertes daños en las playas, pero estos fenómenos podrían tener también un efecto beneficioso, según un reciente estudio llevado a cabo por investigadores de diversas universidades, publicado en *Nature Communications Earth & Environment,* porque mitigan el impacto sobre las playas del aumento del nivel del mar a causa del cambio climático.

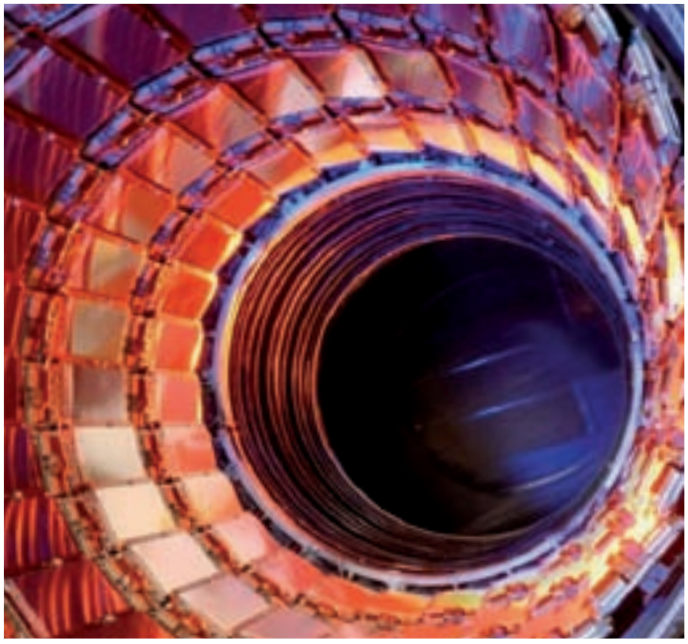


Los investigadores han analizado datos sobre tormentas extremas en Australia, Reino Unido y México y a partir de mediciones de alta resolución tanto de la playa como del lecho marino, han observado un incremento importante del sedimento (entre 59 y 140 $m^3$ por metro de costa) que permitiría compensar, teóricamente, el efecto del aumento del nivel del mar que provoca el retroceso de las playas. No obstante, los investigadores son cautos. "Solo estamos raspando la superficie. Necesitamos repetir este tipo de mediciones de monitoreo con más tormentas, diferentes tipos de escenarios costeros y bajo diversas condiciones", dice el investigador Mitchell Harley, del Laboratorio de Investigación del Agua de la Universidad de Nueva Gales del Sur y primer autor del trabajo.

Según el profesor Gerd Masselink, quien dirige el Grupo de Investigación de Procesos Costeros, "no estamos muy seguros de si esta arena adicional proviene de la costa o de *la vuelta de la esquina,* o incluso de ambas cosas, pero ahora entendemos que las olas extremas pueden contribuir potencialmente de manera positiva a la cantidad total de arena, a pesar de causar la erosión de las dunas y la zona superior de la playa".

## Regresa el LHC con más potencia

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), localizado cerca de Ginebra (Suiza) ha vuelto a ponerse en funcionamiento tras tres años de parada. Comienza así su tercera fase de actividad, tras la última, realizada entre 2016 y 2018, en la que se prevé que llegue a alcanzar los 13,6 TeV (teraelectronvoltios). Los científicos calculan poder empezar a recoger datos a partir del verano e ir incrementando la energía de forma progresiva.



Investigadores del Instituto de Física Corpuscular (IFIC-CSIC-UV) y del Instituto de Física de Cantabria (IFCA-CSIC-UC) participarán en el análisis de los datos de colisiones entre partículas que recoja el LHC durante esta fase. Los investigadores persiguen un análisis más preciso del bosón de Higgs, la partícula fundamental que se identificó gracias a este acelerador. Además, los investigadores podrán analizar las colisiones protón-helio, para medir la frecuencia de producción de antimateria, y las realizadas con iones de hidrógeno.

"No existe ningún acelerador a nivel mundial que llegue a esa energía controlada", indica Celso Martínez, del grupo de Física de Partículas e Instrumentación del IFCA. Por su parte Carmen García, profesora de investigación del CSIC y responsable del experimento ATLAS en el IFIC, explica que "en esta nueva fase también se espera aumentar la luminosidad de los haces, lo cual nos proporcionará datos a una frecuencia mayor. El reto es procesarlos, seleccionarlos, analizarlos y entender lo que nos revelan sobre la estructura de la materia".

**EFEMÉRIDES ▶ HACE 100 AÑOS...**

## Se halla la tumba de Tutankamón

El Antiguo Egipto comprendió, aproximadamente, entre el año 3.100 y el 31 a. C. Albergó a una civilización que se asentó en las inmediaciones del río Nilo, donde evolucionó durante milenios y pasó a la historia por la riqueza y complejidad del sistema social, económico, político y de escritura que desarrolló, además de por sus nociones religiosas, entre las que destacaba su infatigable veneración a los muertos.

El 4 de noviembre de 1922, una expedición arqueológica británica encabezada por Lord Carnarvon y Howard Carter descubrió la primera señal de la tumba de Tutankamón, uno de los faraones más importantes de la historia, cuya entrada había permanecido oculta durante siglos bajo las colinas del Valle de los Reyes. Tres días después, lograron acceder a la cámara sepulcral, que encontraron atestada de diversos objetos antiguos como cetros, estatuas y amuletos, además de tesoros de plata, ébano, marfil y oro.

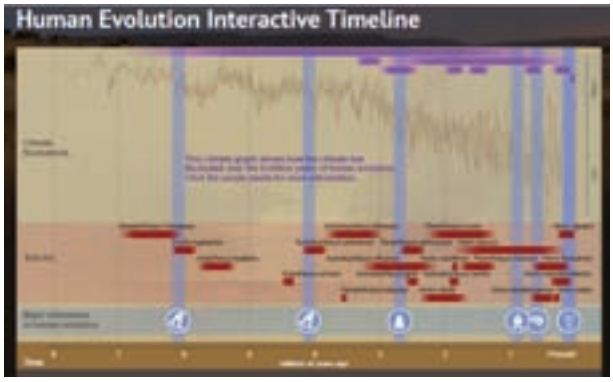
El acontecimiento significó un impulso del interés occidental en la egiptología, disciplina científica que ha permitido aumentar nuestro conocimiento del mundo antiguo en esta valiosa región. Por otro lado, dio origen a la llamada "maldición de Tutankamón", cuyo éxito se atribuye a Arthur Conan Doyle, y que fue acusada de provocar la muerte de aquellas personas que se acercaban al sarcófago donde descansaba la momia; una leyenda que el escrutinio científico se ha encargado de refutar en numerosas ocasiones.



## EN RED

### La evolución humana en un clic

La aparición de la especie humana tal y como hoy la conocemos no se produjo gracias a Adán y Eva. Un largo y complejo proceso evolutivo a través de múltiples especies de homínidos dio lugar al Homo sapiens. Para conocer más sobre cómo se produjo este emocionante proceso y sobre las especies que nos precedieron resulta muy adecuada esta interesante herramienta. Se trata de una iniciativa del Museo Nacional de Historia Natural Smithsonian (Washington D.C, EE UU) llamada Human Evolution Interactive Timeline (https://humanorigins.si.edu/evidence/human-evolution-interactive-timeline). Dentro de su web sobre los orígenes del ser humano, en la que se puede encontrar gran cantidad de información, se incluye esta cronología interactiva, en la que el usuario puede ir descubriendo las distintas especies de homínidos aparecidas en los diferentes momentos de la historia evolutiva humana, junto a sus características, las condiciones climáticas en las que vivieron y los principales hitos evolutivos alcanzados. Y para profundizar aún más sobre la evolución humana, la web contiene múltiples recursos, incluyendo imágenes, vídeos y recreaciones 3D, para conocer mejor a cada uno de nuestros antecesores homínidos.






### Conocer el sistema solar desde casa

Somos una parte infinitesimal del universo, e incluso de nuestro sistema solar. Pero gracias a los simuladores podemos hacernos una idea de la inmensidad del cosmos. La aplicación Solar System Scope (https://www.solarsystemscope.com/) nos ofrece la posibilidad de navegar virtualmente por el sistema solar, acercando o alejando el plano para ir viendo los diferentes elementos y su posición en tiempo real. La aplicación permite obtener información sobre cada uno de los astros; por ejemplo, la composición de un planeta, su tamaño, su distancia al sol y otros muchos datos, de manera sencilla e intuitiva. También podemos cambiar la fecha actual y modificar la velocidad para ver las rotaciones y traslaciones de los planetas alrededor del sol.

La información ofrecida procede, en su mayor parte, de la NASA. Los colores y las sombras se ajustan a las fotografías en color realizadas por las naves espaciales Messenger, Viking, Cassini y New Horizon y el telescopio espacial Hubble. La aplicación también puede ser descargada a través de su web y utilizarse sin conexión a Internet.

La iniciativa Solar System Scope nació en 2010 y ha sido desarrollada por "entusiastas del espacio, ingenieros de software, diseñadores y otros geeks, en su mayoría de INOVE: empresa de software en la UE", según su propia descripción en la página web.

## REDES

**@ciencia_uc3m**
Perfil de la Oficina de Información Científica de la Universidad Carlos III de Madrid, que permite acercarse a la I+D+i que se desarrolla en ella.

**Veritasium en español**
Derek Muller es un famoso divulgador científico cuyo canal Veritasium tiene más de 10 millones de suscriptores. Sus vídeos están ahora disponibles también en español.

**PopularScience**
La veterana revista estadounidense, cuyo primer número apareció en 1872 y muymuy centrada en avances tecnológicos, difunde tambinén sus contenidos a través de su perfil en Facebook.

**@natgeo**
Cuenta oficial de la revista de divulgación National Greographic, donde se pueden contemplar algunas de sus excepcionales fotografías y buena parte de sus contenidos actualizados.

**LauraFloresCiencia**
La divulgadora Laura Flores nos cuenta la actualidad científica de manera amena y peculiar a través de su exitoso perfil de Twitch.

## AGENDA

### 50 años en la luna

**Museo de las Ciencias de Castilla La-Mancha**

El ser humano logró aterrizar en la superficie de nuestro satélite natural el 20 de julio de 1969, tras 76 horas de viaje en las que Neil Armstrong (comandante), Buzz Aldrin (piloto del módulo lunar) y Michael Collins (piloto del módulo de mando) recorrieron casi cuatrocientos mil kilómetros. Era el fin de la carrera espacial que caracterizó a la Guerra Fría, y desde que el Apollo XI se posara sobre la zona lunar llamada *Mar de la Tranquilidad,* hasta doce astronautas siguieron sus pasos. En todo este tiempo, este ha sido el límite de nuestra especie, que no ha sido capaz de alcanzar otros cuerpos celestes.

La exposición se enfoca en explicar por qué, más de 5 décadas después de haber pisado la Luna, no hemos llegado a Marte. Con sus cincuenta metros cuadrados repletos de gráficos y audiovisuales, que incluyen un photocall del satélite, aporta imágenes y datos interesantes acerca de este acontecimiento y del resto de misiones lunares, tratando de infundir el optimismo y orgullo que




caracterizó a la exploración espacial de aquellos años. La exhibición recoge recortes de prensa de la época gracias al trabajo de coleccionistas e investigadores, como material de la "Colección Martínez-Leis", un compilado de revistas y periódicos de publicaciones españolas que abordaron el hito que sacudió al mundo.

http://pagina.jccm.es/museociencias/50_LUNA/50_LUNA.htm

### La primera vuelta al mundo

**Exposición online MNCN**

La expedición de Magallanes y Elcano, que culminó la primera circunnavegación del planeta permitió el descubrimiento de numerosas especies nuevas de animales y plantas. De todas ellas fue tomando nota en su diario el italiano Antonio Pigafetta, con descripciones y apuntes del natural. Esta exposición virtual, realizada en colaboración con Google Arts & Culture recoge las anotaciones de su diario y se acompaña de fotografías de algunas piezas históricas de los fondos del museo, relacionadas con las descritas por




Pigafetta. Se incluyen también parte de la colección iconográfica del archivo y permite disfrutar del dibujo científico del siglo XVIII, donde confluyen ciencia y arte.

https://www.mncn.csic.es/es/visita-el-mncn/exposiciones/la-primera-vuelta-al-mundo

## LIBROS

***La ciencia del chup chup***
**Elena Sanz**
Crítica, 2021
170 páginas
17,90 euros

La cocina es un universo milenario, dinámico y complejo, con una larga tradición y una enorme diversidad a sus espaldas. La periodista científica Elena Sanz, que se enamoró de la cocina cuando era una niña gracias a la excelencia de su abuela con ollas y sartenes, escribe este libro en el que cuenta la ciencia que hay detrás de las recetas: ofrece nociones de química y neurociencia para explicar muchas de las fórmulas culinarias con las que todos estamos familiarizados, sin dejar de lado anécdotas personales y toques de humor como ingredientes fundamentales; ya solo el título, donde leemos "chup chup", remite a un sonido que nos transporta a la infancia. Precedida por un prólogo escrito por Dani García, ganador de tres estrellas Michelín, esta obra resulta muy útil para descubrir numerosos trucos y secretos de la cocina, mientras se esfuerza por entretener, divertir y enseñar al mismo tiempo.



# Panorama

## Toma de posesión de Juan Carlos Lentijo y Javier Dies



El pasado 9 de mayo tomaron posesión de sus cargos el presidente del Consejo de Seguridad Nuclear, Juan Carlos Lentijo, y el consejero Javier Dies, cuyo nombramiento había sido publicado en el Boletín Oficial del Estado el pasado 12 de abril. El acto solemne tuvo lugar en el Salón de los Pasos Perdidos del Congreso de los Diputados y fue presidido por la presidenta de la cámara, Meritxell Batet, quien inició el acto. Tras la toma de posesión del presidente y el consejero, intervino también la vicepresidenta tercera y ministra para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Teresa Ribera.

La ministra señaló la importancia de la seguridad nuclear tanto a nivel técnico y económico como social y destacó que el CSN "es una pieza clave para el buen funcionamiento de nuestro parque nuclear y para temas como la gestión de los residuos radiactivos o la protección radiológica de los trabajadores". Ribera también tuvo palabras de agradecimiento para el trabajo realizado por el expresidente Josep María Serena i Sender durante los tres años de su mandato, y agradeció a Javier Dies su labor interina, especialmente durante las complicadas semanas en las que comenzó la guerra en Ucrania. La ministra señaló también los retos que el nuevo presidente tiene por delante, como el cumplimiento del Plan Estratégico 2020-2025 del Consejo, en sintonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas y la Agenda 2030.

Por su parte, la presidenta del Congreso, Meritxell Batet, se sumó a las palabras de agradecimiento de la ministra y elogió al CSN como una de las primeras autoridades independientes existentes en la democracia española. Batet valoró el buen hacer del organismo en colaboración con la Cámara Baja para "lograr la máxima confianza y credibilidad de la sociedad española ante la seguridad nuclear y radiológica". Batet también señaló su deseo de que el regulador español continúe perseverando en la excelente labor que lleva haciendo desde hace más de cuatro décadas.

## Pablo Martín González, nuevo secretario general del Consejo

El 24 de mayo el Consejo de Ministros nombró a Pablo Martín González secretario general del Consejo de Seguridad Nuclear, tras haber cumplido los trámites oficiales. Pablo Martín González es licenciado en Derecho por la Universidad de Granada y amplió estudios en el CESEDEN, la École Nationale d'Administration de París y el Instituto Europeo de Administración Pública en Maastricht. En 2002 ingresó por oposición en el Cuerpo Superior de Administradores Civiles del Estado. Entre otros cargos, ha sido subsecretario del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y director del Organismo Autónomo de Programas Educativos Europeos, en el Ministerio de Educación. A la Secretaría General del CSN le corresponde la dirección, el impulso, la coordinación y la supervisión de la actividad de todos los órganos del CSN y las funciones detalladas en el artículo 37 del Estatuto de la institución.

## Nuevo manual de estilo del CSN

El Consejo de Seguridad Nuclear ha actualizado su manual de estilo, por el que se fijan las reglas generales de redacción, estructura, estilo y de uso del lenguaje, así como su distintivo y logotipo en todos los formatos y canales. Se trata de adecuar el anterior manual, de 2015, a los cambios producidos en la comunicación y uso del lenguaje por parte de la sociedad. Se hace especial hincapié en el compromiso con la igualdad de oportunidades y la perspectiva de género y se incorporan secciones sobre el lenguaje en redes sociales y en situaciones de crisis.



## Japón acoge la 49ª reunión de INRA

La primera semana del mes de mayo se celebró en la ciudad de Sendai (Japón) la 49ª reunión de la Asociación Internacional de Reguladores Nucleares (INRA, por sus siglas en inglés), a la que asistió el presidente del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), Juan Carlos Lentijo. Presidió la reunión Toyoshi Fuketa, presidente de la Autoridad Reguladora Japonesa (NRA), quien pasó el testigo a Rumina Velshi, de Canadá, que presidirá



la asociación el próximo año. Los asistentes debatieron sobre diferentes retos, como las mejoras en los procesos de revisión y la eficiencia organizativa. El regulador japonés informó sobre el protocolo para depurar las aguas afectadas en la central de Fukushima. También se abordó la situación en Ucrania y el seguimiento de la seguridad física y tecnológica de sus instalaciones nucleares. El presidente del CSN destacó el plan estratégico del organismo y su adecuación a los ODS de Naciones Unidas, y abordó la gestión del desmantelamiento de la central nuclear Santa María de Garoña (Burgos) y la percepción pública que la sociedad española tiene del CSN, asuntos que suscitaron especial interés entre sus homólogos internacionales.

## Comité de enlace CSN-IFMIF-DONES

El 19 de abril se celebró en el CSN la segunda reunión del comité de enlace con los representantes del proyecto de Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión y Fuente de Neutrones (IFMIF-DONES), en la que participaron los consejeros Elvira Romera y Francisco Castejón. Se trata de una instalación que estudiará los materiales adecuados para soportar el bombardeo de neutrones de un reactor de fusión nuclear. El consorcio IFMIF-DONES se creó en junio de 2021 para promover la candidatura española para albergar la instalación, cuya fase de construcción durará diez años y la de explotación científico-tecnológica otros veinte.

Durante la reunión, se estableció un grupo de trabajo técnico DONES-CSN para analizar la estrategia del licenciamiento de las instalaciones que aspiren a formar parte del programa. El papel del CSN es fundamental para poner de manifiesto la capacidad española para liderar esta instalación singular a nivel mundial, en los aspectos referentes a la seguridad nuclear y la protección radiológica.




## Encuentros bilaterales con la ASN francesa

Durante el mes de mayo se produjeron dos encuentros bilaterales entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia (ASN), en el marco del acuerdo bilateral suscrito por ambas. El primero tuvo lugar en la sede del regulador español, donde acudió una delegación de la ASN encabezada por la consejera Géraldine Pina. Se realizó una visita a las instalaciones del CSN, incluida la Salem, así como a las instalaciones de medicina nuclear de la Clínica Universitaria de Navarra.

Por su parte, los miembros del Pleno del CSN Francisco Castejón y Pilar Lucio se desplazaron a Bure (Francia), donde fueron recibidos por los consejeros de la ASN Jean-Luc Lachaume y Geráldine Pina. Allí visitaron el laboratorio de investigación subterráneo de ANDRA, la encargada de la gestión de residuos radiactivos en Francia, situada en Meuse, y conocieron el proyecto CIGEO (Centro Industrial de Almacenamiento Geológico de Residuos Radiactivos). También participaron como observadores en el Comité de Información de Bure.

Ambos encuentros han servido para intercambiar información sobre temas técnicos de interés mutuo, como la gestión de residuos y la liberación de productos acuosos derivados de tratamientos con medicina nuclear y radiofármacos. También se trataron temas relacionados con las políticas y los procesos de información y participación pública en relación a la gestión segura de los residuos radiactivos, especialmente los de media y alta actividad.

# Principales acuerdos del Pleno

### Clausura de las balsas de fosfoyesos en Huelva

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 18 de mayo, informó favorablemente, con límites y condiciones, el proyecto presentado por la compañía Fertiberia para la clausura de las balsas de fosfoyesos situadas en Huelva y la restauración del emplazamiento. El proyecto contempla el sellado, drenaje y recubrimiento de las balsas para mitigar su impacto en el entorno, permitiendo dar un uso recreativo a la zona. Previamente se deberán medir valores de referencia para comparar con muestreos posteriores en aguas superficiales y sedimentos y determinar si se produce un aumento de la presencia de radionucleidos. Se prevé un periodo de diez años para completar el proceso. Después habrá una fase de post-clausura que estará sujeta a un nuevo dictamen del CSN.

### Convocatoria de subvenciones para proyectos de I+D+i

El 11 de mayo, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó la convocatoria de subvenciones para la realización de proyectos de I+D+i relacionados con las funciones del regulador, de acuerdo con el plan para el periodo 2021-2025, aprobado en diciembre de 2021. La cuantía total de la convocatoria es de 1,5 millones de euros y el importe máximo por propuesta es de 100.000 euros. Los proyectos deberán ejecutarse en un plazo de entre dos y tres años.

### Nueva ITC a las centrales nucleares en operación

En su reunión del 27 de abril, el Pleno del Consejo acordó la emisión de una Instrucción Técnica Complementaria (ITC) a las autorizaciones de explotación de las centrales nucleares en operación, sobre la vigilancia y tratamiento de las fugas en el sistema refrigerante del reactor y la detección y el seguimiento del aumento de las fugas no identificadas a lo largo del ciclo de operación. La ITC es el resultado de una evaluación de la experiencia propia acumulada, las investigaciones más reciente en la materia, la evolución de las normas y las mejores prácticas internacionales.

### Cambio en las ETF de Trillo

El 20 de abril, el Pleno del CSN acordó informar favorablemente la propuesta de cambio de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) acerca de los sistemas para el mantenimiento de la integridad del anillo de la contención, presentada por el titular de la central nuclear Trillo, en Guadalajara. La propuesta traslada una modificación documental por la que se asigna un margen al valor de la presión a la que debe realizarse la prueba de apertura de las compuertas de alivio de vacío en dicho anillo. También aprobó las solicitudes de cambio en los planes de protección física presentados por los titulares de las centrales nucleares Ascó y Vandellos II.

### Modificación de diseño de la central nuclear Cofrentes

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó el 6 de abril informar favorablemente la modificación de diseño propuesta por el titular de la central nuclear Cofrentes, en Valencia, relativa al interruptor de generación eléctrica, lo que implica la exención temporal parcial del apartado de las ETF referente a fuentes de corriente alterna en operación. La razón del cambio es que el interruptor instalado en noviembre de 2021 falló el 12 de marzo pasado y provocó una parada automática del reactor.

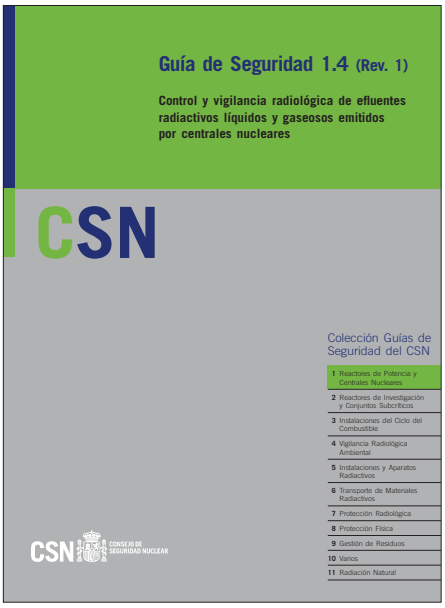
### Plan de gestión de combustible gastado de Sta. María de Garoña

El 30 de marzo, en su reunión semanal, el Pleno del Consejo informó favorablemente el Plan de Gestión de Combustible Gastado presentada por el titular de la central nuclear Santa María de Garoña, en Burgos, actualmente en cese definitivo de explotación. El plan define la estrategia, acciones e hitos para la gestión de dicho combustible, que actualmente se encuentra almacenado en la piscina destinada a tal efecto de la central, e incluye la estrategia y los medios previstos para el cumplimiento a corto y medio plazo de todas las funciones de seguridad aplicables en la planta, tanto en su situación actual como una vez se inicie el desmantelamiento.

### Contratación de apoyo externo para evaluaciones del Plan INVEAT

En su reunión del 23 de marzo, el Consejo de Seguridad Nuclear aprobó el procedimiento para la contratación de un servicio de apoyo técnico para la revisión independiente de solicitudes de autorización de funcionamiento o modificación de instalaciones radiactivas médicas. El motivo de este refuerzo para optimizar el proceso de evaluación de las solicitudes de autorización previstas por la aplicación del Plan de Inversión en Equipos de Alta Tecnología (INVEAT) en el Sistema Nacional de Salud. Los adjudicatarios deberán realizar revisiones independientes de la documentación de las solicitudes. El plazo de ejecución previsto es de 18 meses.

# Publicaciones




**Guía de Seguridad 1.4 (Rev. 1)**
**Control y vigilancia radiológica de efluentes radiactivos líquidos y gaseosos emitidos por centrales nucleares**

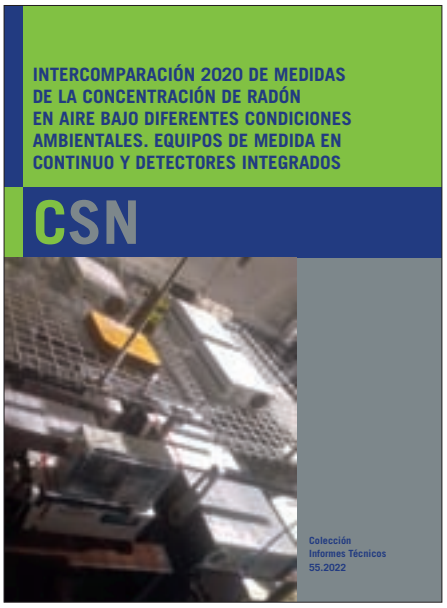






**Instrucción IS-45, sobre los requisitos de seguridad durante las fases de diseño, construcción y explotación de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo del combustible nuclear, para prever su desmantelamiento y, en su caso, su desmantelamiento y cierre**

**Manual de estilo y logomarca 2021**




**Intercomparación de medidas de la concentración de radón en aire bajo diferentes condiciones ambientales, equipos de medida en contínuo y detectores integrados**


aLFa Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

**Boletín de suscripción**

Institución/Empresa

Nombre

Dirección

CP Localidad Provincia

Tel. Fax Correo electrónico

Fecha Firma

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

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

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

# Abstracts

## REPORTS

### 6 Super bacteria: invisible but lethal

The resistance to antibiotics developed by all types of bacterial strains is beginning to be seen as the greatest threat to world health in the coming years. According to a study published in The Lancet, in 2019 these microorganisms caused 1.27 million deaths, more than AIDS and malaria combined.

### 12 A paper bridge with society

The Nuclear Safety Council publishes the nuclear safety and radiological protection journal Alfa as a means of providing information for the members of society on energy, research, technology, the environment and health, among other matters, with special emphasis on the use of radiation. After fourteen years, the journal now reaches its 50th edition.

### 31 Life seen from the perspective of physics

Biophysics is a relatively young field of research that uses knowledge and tools from the world of physics to understand the workings of biological systems. Its applications range from the development of new fuels to the diagnosis of diseases and medical treatments.

### 37 Margarita Salas, the mother of Spanish molecular biology

Margarita Salas was the pioneer of molecular biology in Spain. Both she and her husband, Eladio Viñuela, were disciples of the Spanish Nobel laureate Severo Ochoa and Margarita was to become Spain's most universal scientist, the discoverer of an enzyme used across the world and a source of inspiration for several generations of molecular biologists.

### 50 The sterilisation of insects, an organic method in the fight against plagues

Climate change, increasing temperatures and globalisation have spread difficult to eradicate plagues across the world, affecting numerous crops. The need to guarantee food supplies has led the FAO and the IAEA to support projects for the peaceful application of radiations to combat such plagues.

### 56 Blue tinted carbon

Blue carbon projects are aimed at supporting the conservation and restoration of oceanic ecosystems, such as mangroves, marine meadows and wetlands, capable of absorbing carbon dioxide from the atmosphere and storing it over thousands of years more intensely and effectively than terrestrial ecosystems.

## RADIOGRAPHY

### 24 Process of reporting events at radioactive facilities to the CSN

A description of the criteria drawn up by the CSN and the steps to be applied for the reporting of radiological events, which are those affecting the structures, systems, equipment or components of radioactive facilities and possibly implying an undue risk of exposure for the public, the workers or the environment.

## INTERVIEW

### 26 María Martinón, director of the National Human Evolution Research Centre

"In a sense, compassion is also fossilised."

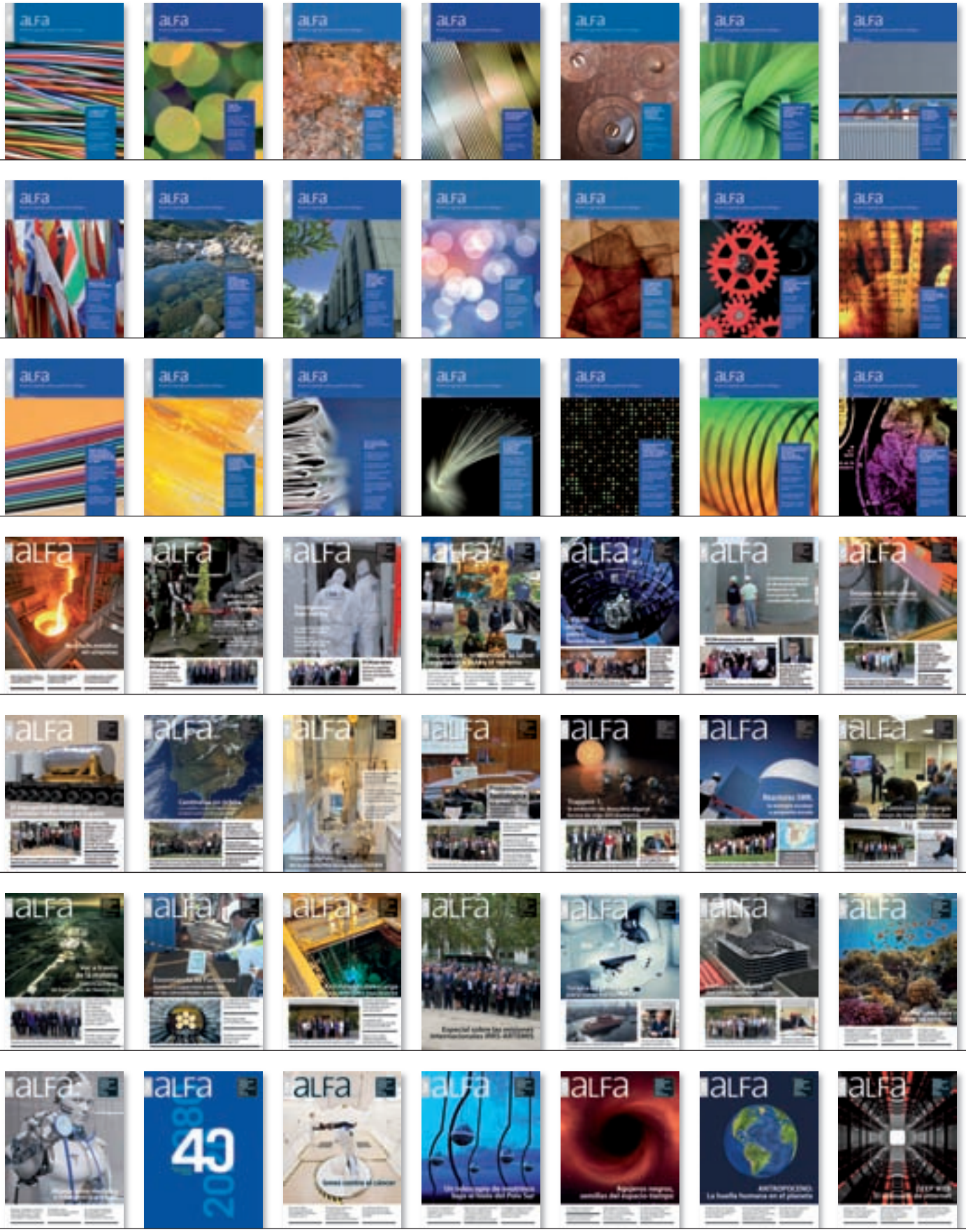
## TECHNICAL ARTICLES

### 16 Experience in the licensing of spent fuel transport packages

The Spanish nuclear power plants use casks for the storage of spent fuel assemblies, for which alternatives must be considered for their subsequent transport. Described here are the main changes in the design of transport packages and their impact on the licensing process.

### 43 INVEAT Plan: Nuclear Safety Council actions

The INVEAT Plan contemplates the incorporation of more than 800 items of high-tech medical equipment in the National Health System by September 2023. The CSN has undertaken the challenge of performing the corresponding safety assessments for all this equipment. The analysis of the situation and of how to meet this challenge will also serve to optimise the process of licensing medical radioactive facilities as we look to the future.







## 50 números de Alfa, la revista de seguridad nuclear y protección radiológica

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR