CSN
alfa
Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Consejo de Seguridad Nuclear
Número 42
Abril 2020

Radiaciones para salvar los océanos

Entrevista a Francis Mojica: 'CRISPR es una caja de herramientas con aplicaciones en todas las ciencias de la vida y de la salud'

Dosi-app: Aplicación móvil para el control dosimétrico del personal de intervención en emergencias nucleares y radiológicas

La NASA ensaya en órbita un mini reloj atómico de precisión para dotar de autonomía a futuras sondas

Descubre la web del Consejo de Seguridad Nuclear. Los mejores contenidos, la mejor usabilidad y un diseño *responsive* que se adapta a todas las pantallas y a los nuevos terminales inteligentes.

Toda la información sobre seguridad nuclear y protección radiológica, de la mano del organismo regulador, a tu alcance.

www.csn.es

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR

Investigación oceánica y una nueva aplicación para emergencias

Este número 42 de Alfa, el primero de 2020, trae a su portada el papel que desempeña el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en la investigación de los peligros que amenazan la salud de nuestros océanos y las especies que los habitan. El OIEA cuenta con varios laboratorios ubicados en Mónaco, en los que utilizan fuentes radiactivas para analizar sedimentos y seguir el rastro de los contaminantes.

Abordamos también una nueva tecnología que está basada en la combinación de la tomografía por emisión de positrones y la resonancia magnética que está revolucionando la imagen diagnóstica. Gracias a esa unión, se pueden hacer dos pruebas simultáneamente y reducir la dosis de radiación que recibe el paciente.

Te contamos también el prototipo de reloj atómico que está probando la NASA. Denominado DSAC para mejorar la precisión de la navegación espacial y desplegar sistemas de posicionamiento global y satélites en otros planetas. La novedad reside en su reducido tamaño del aparato, necesario para equipar las naves espaciales.

La matemática Emmy Noether se abrió paso entre los prejuicios sexistas del mundo académico de la primera mitad del siglo XX, para emerger como una figura destacada de las matemáticas, cuya obra tuvo una enorme influencia en la física de la época. Albert Einstein y David Hilbert reconocieron públicamente su admiración por ella.

Entrevistamos a Francisco Martínez Mojica, microbiólogo descubridor del sistema CRISPR, una tecnología que permite activar, silenciar o corregir los genes de cualquier célula, y hacerlo de forma sencilla, rápida, eficaz y barata. Mojica lleva varios años en las quinielas de candidatos al Nobel aunque él asegura que el galardón no le quita el sueño o, al menos, no tanto como los periodistas que se cuelan en su casa para entrevistarle.

> *La aplicación Dosi-app, permite conocer y gestionar las dosis de radiación recibidas por el personal de intervención en emergencias nucleares y radiológicas*

En 2011 un grupo de científicos y artistas suecos decidió poner en marcha un proyecto para divulgar nuestra cotidiana convivencia con la radiación. Diseñaron un sistema para convertir las frecuencias de la radiación de diferentes isótopos radiactivos al desintegrarse en notas musicales y grabaron un disco con una de las historias más insólitas de la industria musical.

En la sección *Radiografía* descubrimos el nuevo sarcófago de Chernóbil, cuya construcción finalizó en 2019. Se trata de una gigantesca estructura de 30.000 toneladas de peso que envuelve la central nuclear ucraniana para evitar su impacto radiológico en su entorno durante al menos un siglo.

La parte más técnica de Alfa está dedicada a la experiencia operativa, una herramienta de creciente importancia ya que nos permite prevenir la repetición de los errores. En el sector nuclear se realiza de acuerdo con protocolos internacionalmente reconocidos.

Además, os presentamos Dosi-app, una aplicación diseñada por el CSN para gestionar las dosis de radiación recibidas por el personal que participa en emergencias nucleares y radiológicas. Permite mejorar el control de las dosis recibidas para evaluar sus intervenciones desde el punto de vista radiológico.

Esta es la propuesta que os hacemos en este primer número del año en que celebraremos el 40º de la creación del CSN.

alfa

Revista de seguridad nuclear y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 42
Abril 2020

Comité Editorial
Josep Maria Serena i Sender
Pilar Lucio Carrasco
Rafael Cid Campo
Mª Fernanda Sánchez Ojanguren
David Redoli Morchón
Ignacio Martín Granados
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

Fotografías de portada
DepositPhotos.

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

© Consejo de Seguridad Nuclear

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

REPORTAJES

6 Radiaciones para salvar los océanos

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) contribuye a la investigación de los peligros que amenazan la salud de nuestros océanos y las especies que los habitan. Para ello cuenta con varios laboratorios ubicados en Mónaco, en los que utilizan fuentes radiactivas para analizar sedimentos y seguir el rastro de los contaminantes.

19 La orquesta radioactiva

En 2011, tras el accidente de Fukushima, un grupo de científicos y artistas suecos decidió poner en marcha un proyecto para divulgar el hecho de que convivimos diariamente con la radiación. Diseñaron un sistema para convertir en notas musicales las frecuencias de la radiación que emiten diferentes isótopos radiactivos al desintegrarse y grabaron un disco que tuvo un cierto éxito de crítica y de público.

33 PET+RM, una revolucionaria alianza

Una nueva tecnología, basada en la combinación de la tomografía por emisión de positrones y la resonancia magnética, está revolucionando la imagen diagnóstica. Permite hacer dos pruebas simultáneamente y reducir la dosis de radiación que recibe el paciente. Sin embargo, su elevado precio y la falta de bibliografía juegan en su contra y están retrasando su implantación en España.

38 Viajes espaciales con precisión atómica

La NASA está probando un prototipo de reloj atómico, denominado DSAC, para mejorar la precisión de la navegación espacial y poder desplegar sistemas de posicionamiento global y satélites en otros planetas. La novedad está en el reducido tamaño del aparato, semejante a una tostadora doméstica, necesario para equipar las naves espaciales.

53 Emmy Noether. La matemática que cambió el curso de la física

Emmy Noether se abrió paso entre los prejuicios sexistas del mundo académico de la primera mitad del siglo XX, para emerger como una figura destacada de las matemáticas, cuya obra tuvo una enorme influencia en la física de la época. Figuras tan destacadas como Albert Einstein y David Hilbert reconocieron públicamente su admiración por ella.

RADIOGRAFÍA

24 **Un nuevo sarcófago para Chernóbil**

Tras doce años de construcción, en 2019 se terminó la gigantesca estructura de 30.000 toneladas de peso que envuelve la central nuclear ucraniana, para evitar su impacto radiológico en su entorno durante al menos un siglo.

ENTREVISTA

26 **Francisco Martínez Mojica, microbiólogo, descubridor del sistema de edición genética CRISPR**

"CRISPR es una caja de herramientas con aplicaciones en todas las ciencias de la vida y de la salud"

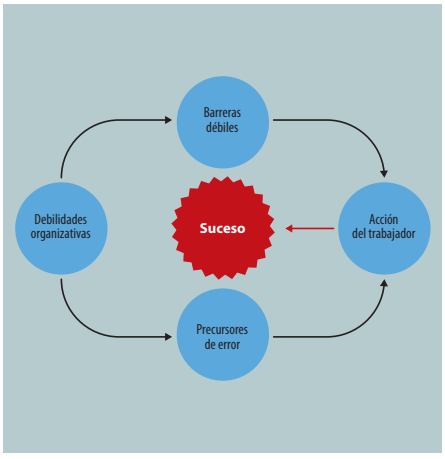
ARTÍCULOS TÉCNICOS

12 **Dosi-app: Aplicación móvil para el control dosimétrico del personal de intervención en emergencias nucleares y radiológicas**

Para conocer y gestionar las dosis de radiación recibidas por el personal de intervención que participa en emergencias nucleares y radiológicas, el CSN ha creado la aplicación Dosi-app, que permite mejorar el control de las dosis individuales para cada uno de estos trabajadores y evaluar sus intervenciones desde el punto de vista radiológico.

46 **Qué es la experiencia operativa y por qué es cosa de todos**

Aprender de los errores, propios y ajenos, es una herramienta de creciente importancia en todo tipo de sectores, ya que nos permite prevenir la repetición de los mismos y evitar sus efectos. En el sector nuclear se ha mostrado esencial y se realiza de acuerdo con protocolos internacionalmente reconocidos.



61 **Reacción en cadena**

65 **Panorama**

69 **Acuerdos del Pleno**

70 **Publicaciones**

El OIEA utiliza isótopos para estudiar los contaminantes de las aguas

Radiaciones para salvar los océanos

Los océanos suponen el 70% de la superficie terrestre, y son la base de la vida en nuestro planeta. Sin unos mares sanos, nos enfrentamos a efectos catastróficos en la biodiversidad y el clima de la Tierra. Pese a su importancia, solo un 3% de la superficie de nuestros océanos está protegida. Y mientras, se multiplican las amenazas que ponen en peligro su salud y a las especies que los habitan. Ante la magnitud del problema, también resulta útil la utilización de isótopos radiactivos para estudiar y ayudar a solventar algunas de las causas del mismo. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) mantiene una línea de investigación con cuatro laboratorios dedicados a ello.

■ Texto: **Pura C. Roy** | Periodista científica ■

De los mares proceden la mitad del oxígeno que respiramos y una buena parte de las proteínas que ingerimos. Aún así, los contaminantes, especialmente los que se derivan de la actividad humana, siguen amenazando nuestros océanos. El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) está cambiando la química del agua del mar y muchos contaminantes no solo están dañando la vida marina, sino que también se están abriendo paso a través de la cadena alimentaria hasta nuestra mesa.

Gobiernos de todo el mundo están trabajando en un Tratado Global de los Océanos para ampliar la red de santuarios marinos existentes y alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas número 14, que se refiere a la necesidad de conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos en favor de un desarrollo sostenible.

También hay organismos internacionales que trabajan en la conservación de los océanos. Uno de ellos es el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Esta institución colabora con sus Estados miembro y múltiples asociados de todo el mundo para promover el uso de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física. Para cumplir con estos fines y cuidar de los océanos dispone de la división de los laboratorios para la conservación del medio ambiente. Situados en Mónaco, en ellos se evalúa la contaminación costera y marina para medirla y determinar el origen de los contaminantes, así como los procesos que pueden desatar.

Esta división consta de cuatro laboratorios. En ellos se emplean técnicas nucleares e isotópicas para interpretar y proponer estrategias e instrumentos destinados a mitigar los efectos ambientales de los radionucleidos, los oligoelementos y los contaminantes orgánicos, así como los del cambio climático, la destrucción del hábitat y la pérdida de biodiversidad. En ellos se desarrollan y aplican técnicas de isótopos estables, como, por ejemplo, la espectrometría de masas de relaciones isotópicas para determinar las fuentes y los procesos de contaminación en las costas y estudiar las alteraciones climáticas.

Técnicas nucleares

Los isótopos son un instrumento valioso en geoquímica, pero también para el medio ambiente. Por ejemplo, es posible

OIEA

Los corales pueden ingerir por error microplásticos que alteran su biología.

datar los testigos de un material sedimentario mediante distintos isótopos radiactivos del plomo o del mercurio y sus productos de desintegración, utilizando para ello un contador gamma. Esta técnica recibe el nombre de análisis por activación neutrónica. Procesados sus datos mediante ordenador la información permite identificar los elementos presentes en la muestra y la concentración de los mismos.

La abundancia o la razón isotópica de determinados oligoelementos pueden utilizarse para cuantificar la contribución de un contaminante. Según el OIEA, por ejemplo, los isótopos estables del oxígeno, el hidrógeno, el nitrógeno y el carbono pueden emplearse para saber de dónde procede el material orgánico presente en el sedimento; si viene de una fuente terrestre o marina, de plantas, animales o de abonos artificiales.

Si bien pueden utilizarse otros métodos para obtener información sobre la composición isotópica de los elementos, las técnicas de espectrometría de masas predominan claramente en el campo del análisis isotópico.

Técnicas nucleares se han aplicado con éxito a diversos problemas de contaminación como los causados por el dióxido de azufre, las descargas gaseosas a nivel del suelo, los derrames de petróleo, los desechos agrícolas, la contaminación de aguas y la generada por las ciudades.

Acidificación

Los científicos de los laboratorios del OIEA para el medio ambiente utilizan también técnicas isotópicas para examinar los efectos de la acidificación de los océanos y su interacción con otros factores de estrés ambiental. Para comprender la acidificación de los océanos se realizan también, entre otros, estudios de procesos biológicos, como la calcificación.

Según el OIEA "aunque ya se ha detectado un descenso del pH (que significa mayor acidez) en la superficie del océano, es difícil estimar todas las consecuencias de la acidificación de los océanos en la biota marina. Los estudios realizados muestran un amplio abanico de efectos posibles, tanto positivos como negativos, ya que las distintas especies presentan distintos niveles de resiliencia y adaptabilidad".

Por debajo de un determinado pH y de la correspondiente concentración de carbonatos, las condiciones ambientales se vuelven corrosivas para el carbonato de calcio, que muchos organismos necesitan para fabricar sus conchas y esqueletos. Algunos corales, pterópodos, moluscos bivalvos y fitoplancton calcificador pueden ser especialmente vulnerables a los cambios de la química del agua de mar. Las condiciones de una mayor acidez reducen la energía disponible para procesos fisiológicos como la reproducción y el crecimiento de ciertas especies.

Corales

Terence Hughes, recientemente galardonado con el Premio de la Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento en Ecología y Biología de la Conservación, director del Centro de Excelencia para los Estudios sobre la Barrera de Coral de la Universidad James Cook, en Australia, y referente mundial en arrecifes

OIEA

Investigadores del OIEA toman muestras para analizar toxinas mediante la técnica del análisis de radiorreceptor.

Del laboratorio al medio natural

El OIEA colabora con grupos locales de investigación para poner en marcha proyectos conjuntos de investigación directa en diversos puntos del planeta, como los siguientes:

Namibia

A petición del Ministerio de Pesca y Recursos Marinos, en 2014 el OIEA empezó a recoger frente a la costa muestras marinas de muy diversa índole, hasta reunir más de 500 de ellas, en particular de sedimentos, agua marina, peces, mejillones y algas, que fueron objeto de miles de mediciones. Participaron en el proyecto de investigación más de 40 investigadores de 11 instituciones de seis países. El estudio de los isótopos de plomo, por ejemplo, puede ayudar a saber si este metal está presente de forma natural o como resultado de la actividad humana. La firma isotópica del plomo también puede dar información sobre la procedencia de los contaminantes. Estos isótopos se desintegran lentamente, lo que hace de ellos un trazador fiable de procesos naturales como la circulación o la mezcla de masas de agua.

Las concentraciones, de otros contaminantes como el Uranio 236 en los océanos son ínfimas y solo pueden medirse con técnicas muy sensibles de espectrometría de masas con aceleradores, que permiten determinar el cociente entre el U-236 y el U-238 presente en la naturaleza. El uranio-236 tiene un período de semi desintegración de 23,4 millones de años. Se trata de un radioisótopo sintético, es decir, un isótopo radiactivo que no se encuentra de forma natural en la Tierra y que se crea mediante reacciones nucleares. Para el proyecto de Namibia estas mediciones se llevaron a cabo en el Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla (España).

España

El Centro Nacional de Aceleradores (CNA, Universidad de Sevilla-Junta de Andalucía-CSIC), colabora con el OIEA mediante sus equipos de espectrometría de masas con aceleradores y ha analizado los niveles de plutonio Pu-239 y Pu-240 y yodo I-129 en algas procedentes del mar Báltico. Los investigadores confirmaron los elevados niveles de radionucleidos antropogénicos debidos al impacto del accidente de Chernóbil en 1986. De este modo se ha obtenido un estudio estadístico de los resultados, estableciendo valores de referencia para las algas. Los resultados se han publicado en la revista *Applied Radiation and Isotopes*. La determinación exacta y precisa de las concentraciones de radionucleidos en muestras marinas es importante para las evaluaciones de radiactividad marina y para el estudio de procesos oceanográficos.

coralinos, alertó ya a principios de los años 90 de la degradación que estaban sufriendo estos frágiles ecosistemas, opina que "todavía no es demasiado tarde para salvarlos, pero debemos actuar ya para reducir las emisiones contaminantes". Avisa de que además de ser "lugares hermosos, hay 400 millones de personas que dependen de ellos para su seguridad alimentaria y su bienestar".

Los arrecifes de coral albergan algunos de los ecosistemas más diversos del planeta, pero varios estudios demuestran que son muy vulnerables a las variaciones en su entorno. Los casos de acidificación de los océanos en el pasado geológico han dado lugar a cambios importantes en los ecosistemas; por ejemplo, en situaciones extremas, a la extinción masiva de algunos foraminíferos (un tipo de organismo marino) bentónicos de las profundidades oceánicas y al colapso de las algas y los corales calcáreos que forman arrecifes. La acidificación de los océanos constituye hoy una amenaza cada vez más grave para organismos como los corales y los moluscos.

Por ello, el OIEA cuenta también con un Centro Internacional de Coordinación sobre la Acidificación de los Océanos,

OIEA

Preparación de las muestras de pescado antes de medir su nivel de radiactividad.

Báltico y Caribe

Como parte de las iniciativas para elaborar métodos nuevos con que determinar el origen y los niveles de contaminación por plomo, los investigadores de los laboratorios del OIEA para el medio ambiente analizaron sedimentos del mar Báltico y del Caribe. Al examinar los ejemplos de contaminación de un testigo de material sedimentario de la costa báltica de Alemania, los investigadores pudieron observar con claridad que en un período de 10 a 15 años, tras la eliminación progresiva hacia 1996 de la presencia de plomo en la gasolina, disminuyeron los niveles de contaminación por plomo en el mar. Los científicos del OIEA reconocen que es posible que no todos los niveles de contaminantes disminuyan tan rápido, pero los positivos resultados de adoptar medidas concretas como la obligación de utilizar gasolina sin plomo son evidentes.

Colombia

El OIEA ha prestado ayuda a Colombia, un país cuyo territorio marino representa prácticamente el 50 % del total. Desde el inicio de la colaboración, en 2007, funcionarios del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras de Colombia (INVEMAR) han recibido equipo y capacitación especializada en técnicas nucleares que actualmente utilizan para estudiar fenómenos que afectan a las aguas colombianas, como la acidificación de los océanos y los efectos de los microplásticos y otros tipos de contaminación.

La pérdida de los corales podría suponer un problema para Colombia, que tiene un potente sector turístico costero gracias a sus playas y a la rica vida marina de sus aguas. De modo similar, el debilitamiento de las conchas de los moluscos puede afectar a la industria pesquera del país. Los investigadores están estudiando estos potenciales efectos futuros para ayudar a los responsables políticos para adoptar medidas adecuadas contra la acidificación de los océanos.

OIEA

Sede del Organismo Internacional de Energía Atómica en Viena (Austria).

que contribuye a que progresen los conocimientos científicos y las comunicaciones a nivel mundial en materia de acidificación de los mares.

El laboratorio utiliza técnicas nucleares e isotópicas para estudiar la frecuencia de los procesos biológicos en organismos marinos como moluscos, ostras y corales. Los isótopos naturales de boro pueden utilizarse para estudiar los cambios habidos en el pasado en el pH del agua de mar, determinando la cantidad relativa de esos isótopos en esqueletos de coral formados hace miles de años, para evaluar la acidez del agua de mar en el pasado. Los isótopos de calcio se utilizan también para estudiar la tasa de calcificación (en la creación de conchas y esqueletos) y otros procesos.

Ciclo del carbono

Los océanos son un importante sumidero de dióxido de carbono de la atmósfera y desempeñan un papel fundamental en la regulación del clima. Los mares absorben el dióxido de carbono, que puede ser arrastrado y transportado por grandes masas de agua o captado durante la fotosíntesis y convertido en materia orgánica. Gran parte de esta materia orgánica se recicla en la superficie oceánica, al servir de alimento a zooplancton y microorganismos y ser descompuesto por ellos. Sin embargo, una parte pequeña pero importante de este material se hunde en sus profundidades, donde queda aislado de la atmósfera durante siglos.

Este torrente de materia orgánica que se hunde es una importante fuente de energía para los organismos marinos. El equilibrio entre el carbono que se encuentra en la atmósfera y el que hay en los océanos se regula mediante procesos físicos y biológicos, que pueden

verse alterados debido a cambios en la temperatura o la química de los océanos, lo que conlleva variaciones del equilibrio global del carbono.

El OIEA utiliza radioisótopos estables y naturales para estudiar el origen y el destino de la materia orgánica y para conocer la función de los océanos en el ciclo global del carbono. En su Laboratorio de Radioecología se mide el flujo del carbono que va las profundidades oceánicas directamente, capturando el material mediante trampas de sedimentos de tipo pluviómetro, e indirectamente, mediante radionucleidos naturales (torio 234, uranio 238, polonio 210 y plomo 210) que se adhieren al material que está en proceso de hundirse hasta el fondo marino. La aplicación de estos instrumentos en diversos contextos oceánicos como las zonas de surgencia (en que afloran las aguas frías y ricas en nutrientes) y los océanos polares contribuye a determinar la magnitud de este flujo de hundimiento y evaluar su vulnerabilidad al cambio climático.

Ciencia nuclear

Se estima que el 80% de los contaminantes presentes en el medio marino proceden de la tierra. Algunas sustancias peligrosas, como los metales pesados tóxicos, los compuestos orgánicos persistentes (los plaguicidas y los productos químicos industriales), los hidrocarburos y las sustancias radiactivas procedentes de actividades industriales, agrícolas, municipales y mineras, terminan pasando al medio marino por medio de las aguas superficiales y subterráneas.

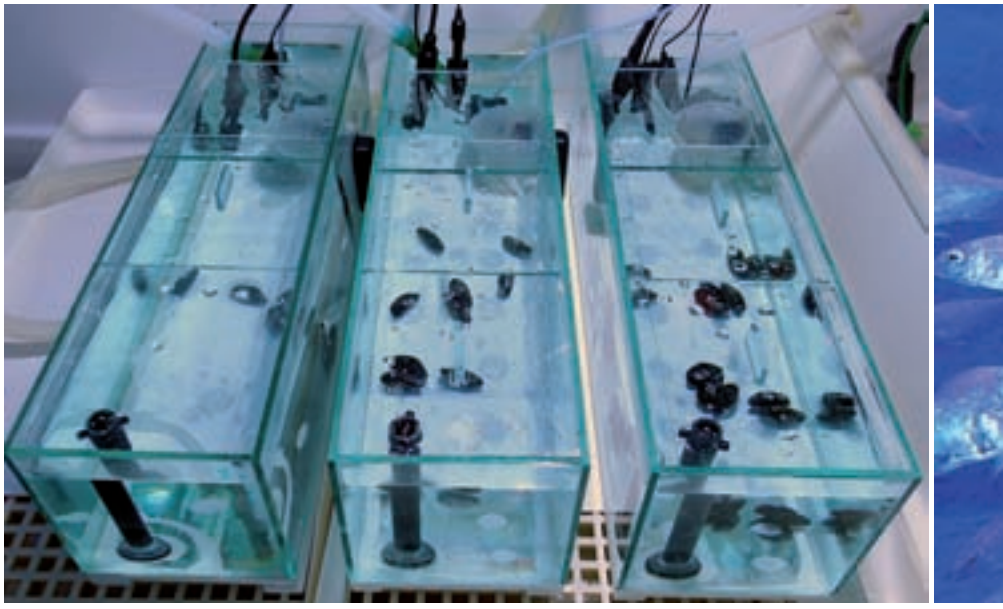
Los contaminantes que acaban en las aguas costeras pueden acumularse en los organismos marinos a través de la cadena alimentaria, lo que deteriora la resiliencia del ecosistema y supone un peligro para la salud humana de consumirse esos pescados y mariscos contaminados. En los últimos años también han aumentado los casos de floraciones de algas nocivas, que pueden producir toxinas que generan intoxicación paralizante por mariscos e intoxicación por ciguatera en pescados, situaciones que pueden ser letales. se trata de neurotoxinas producidas por microalgas comunes en la dieta de los pescados tropicales y subtropicales.

El OIEA, por medio de sus laboratorios para el medio ambiente, desempeña un papel clave en la investigación y la capacitación sobre la manera de detectar la presencia de contaminantes y biotoxinas peligrosos en los alimentos de origen marino; por ejemplo, mediante el análisis de unión de radioligandos, procedimiento analítico empleado para detectar toxinas durante la floración de algas nocivas. Asimismo, en el marco de una colaboración con la Organización Regional para la Protección del Medio Marino (uno de los programas de mares regionales del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), se analizaron en los laboratorios del OIEA muestras de ostras y sedimentos marinos del Golfo Pérsico, para determinar los niveles de radionucleidos, oligoelementos, contaminantes orgánicos y biotoxinas relacionados con la floración de algas nocivas.

Aunque no es tarea fácil, medir la concentración de radionucleidos (tanto naturales como de origen antrópico), oligoelementos y tierras raras y seguir su rastro hasta determinar su procedencia es fundamental para entender el estado del medio marino.

Hay varios radionucleidos antrópicos que pueden ser detectados a niveles ínfimos. Algunos, como el yodo 129 (I 129) o el uranio 236 (U 236), pueden servir de radiotrazadores para estudiar procesos oceanográficos como la circulación de las masas de agua o contaminantes presentes en los océanos y disponer así de modelos más exactos de dispersión marina. "Al igual que se observa un colorante en una masa de agua para conocer sus desplazamientos, los investigadores pueden seguir el rastro de estos radionucleidos, que presentan una firma única, para estudiar diferentes corrientes y saber a qué velocidad van de una parte del mundo a otra", informa el OIEA.

OIEA



Plásticos

Según las últimas estimaciones, la cantidad de micropartículas de plástico

que flotan en el océano es de 51.000 millones. En total pesan 250 000 toneladas, que flotan en los océanos de todo el mundo. Al estar diseñados para ser especialmente resistentes tardan mucho tiempo en desintegrarse y pueden permanecer en el ambiente más de 100 años. Se trata de partículas que miden menos de 5 mm y son difíciles de rastrear. Proceden de materiales manufacturados para uso industrial y doméstico, como el velcro o el detergente para la ropa.

protección ambiental marina, una sola prenda sintética puede desprender aproximadamente 1.900 microfibras sintéticas durante su lavado y aclarado.

Al ser tan pequeños, los microplásticos se introducen dentro de los órganos internos de los animales marinos, donde pueden comportarse como vehículos que arrastran contaminantes, como bifenilos policlorinados ((PCB por sus siglas en inglés) y trazas de metal como mercurio y plomo. Los contaminantes acumulados dentro de los organismos pueden entrar

OIEA

OIEA

El uso de radiotrazadores permite detectar contaminantes asociados a plásticos en organismos como mejillones (página anterior), y besugos (arriba). A la izquierda, investigadores de los laboratorios del OIEA analizando contaminantes en aguas del Mediterráneo.

Flotan en el océano y se depositan, en las playas y en el suelo del mar. Los animales marinos a menudo los confunden con plancton y los ingieren.

Según un informe del OIEA del año 2016 sobre los aspectos científicos de la

a formar parte de la cadena alimentaria y llegar hasta los humanos que consumen pescado, moluscos o marisco.

Dentro de los laboratorios del OIEA, utilizando radioisótopos como el carbono-14, los investigadores estudian la manera en que algunos contaminantes, como los PCB, se adhierena los microplásticos del medioambiente, y comprueban si pueden llegar a separarse de los plásticos que ingieren los animales marinos.

De esta manera, se investiga si las partículas cruzan las membranas celulares. Esto puede ocurrir, por ejemplo, a través del cascarón del huevo de una hembra de tiburón a su cría, o a través de una pequeña gamba ingerida por un pez, que a su vez pasa a su sistema digestivo y posiblemente a su cerebro u otros órganos.

También investigan si la contaminación plástica afecta a la manera en que un pez absorbe los nutrientes o contaminantes. Utilizan los radioisótopos para estudiar el movimiento y la trayectoria de los microplásticos dentro de los animales, comprender exactamente cómo se absorben a través del sistema digestivo o de las agallas, y determinar si los animales pueden eliminar los microplásticos o por el contrario estos acaban obstruyendo los órganos. Si los microplásticos se acumulan en el intestino, los animales tendrían la sensación equivocada de estar saciados, y eso afectaría a su consumo de nutrientes.

A través de experimentos en acuarios controlados, esta investigación aporta datos cuantitativos y una ventana única al complejo impacto biológico de los microplásticos. La información recogida mejora la comprensión del efecto de estos materiales en organismos marinos, tan importantes para la sociedad y el comercio, y así ayudar a los países a fortalecer sus programas de seguridad y protección de pescados y mariscos.

En palabras de David Osborn, director del laboratorio medioambiental del OIEA, "comprender hasta qué punto los microplásticos pueden transferir contaminantes peligrosos a la flora y fauna marina es un tema de interés global, especialmente para países que confían en la industria pesquera como fuente de alimentos e ingresos".

Dosi-app: Aplicación móvil para el control dosimétrico del personal de intervención en emergencias nucleares y radiológicas

El uso de materiales nucleares y radiactivos en diferentes ámbitos y con distintas aplicaciones lleva asociado la posibilidad de que se produzcan situaciones accidentales o actos malintencionados cuyas consecuencias es necesario reducir mediante la aplicación de medidas de protección previamente definidas dentro de la estrategia de protección. La implantación de dichas medidas es efectuada, en la mayoría de los casos, por personal de intervención que debe ser protegido adecuadamente. El control dosimétrico de este personal durante una situación de emergencia permite conocer las dosis recibidas, restringir su participación a partir de determinados valores de dosis, evaluar las intervenciones desde el punto de vista radiológico y, si es el caso, determinar una vigilancia sanitaria a posteriori.

Texto: **Antonio Ortiz Olmo** | Jefe de área de Intervención y Preparación de Actuantes en Emergencias del CSN

Dentro del Sistema de Protección Radiológica se define una situación de exposición de emergencia como aquella situación que puede ocurrir durante la operación de una situación planificada, como consecuencia de un acto malévolo o cualquier otra situación inesperada que requiera la adopción de acciones urgentes a fin de evitar o reducir consecuencias no deseadas.

Para dichas situaciones de emergencia se establecen niveles de referencia que representan el nivel de dosis o de riesgo por encima del cual se juzga como inapropiado permitir que tengan lugar exposiciones y por debajo del cual debe implementarse la optimización de la protección. El valor escogido para un nivel de referencia no representa una separación entre lo seguro y lo peligroso o un cambio trascendente en el riesgo, y en ningún caso deben confundirse con los límites de dosis que son definidos como valores de dosis efectiva o dosis equivalente recibida por individuos que no debe ser excedida.

El artículo 53 de la Directiva 2013/59/EURATOM por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes recoge que los Estados miembros

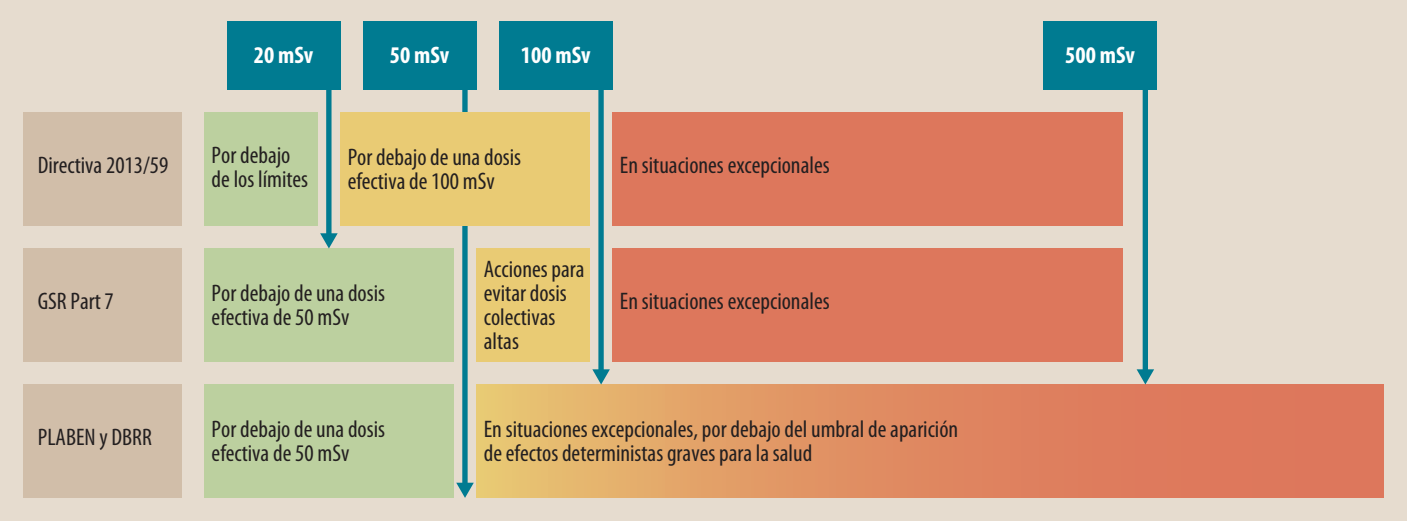


Tabla 1. Niveles de referencia para trabajadores de emergencia.

Personal de intervención provisto de control dosimétrico.

garantizarán que las exposiciones ocupacionales de emergencia se mantengan, siempre que sea posible, en niveles de referencia por debajo de los límites de dosis y que, cuando ello no sea factible, se fijen en términos generales por debajo de una dosis efectiva de 100 mSv; en situaciones excepcionales, y con el fin de salvar vidas, evitar efectos graves sobre la salud derivados de la radiación o el desarrollo de condiciones catastróficas, se podrán establecer niveles de referencia para una dosis efectiva de radiación externa por encima de los 100 mSv pero no superiores a los 500 mSv. Con el objetivo de conocer las dosis efectivas recibidas por los trabajadores de emergencia, el propio artículo 53 indica que los Estados exigirán una vigilancia radiológica de las dosis individuales de forma adecuada a las circunstancias.

Referencias similares encontramos en la parte 7 de los Requisitos de Seguridad Generales promulgados por el Organismo Internacional para la Emergencia Atómica, dedicada a la preparación y respuesta a emergencias nucleares y radiológicas. Concretamente, el requisito 11 expresa la necesidad de que la entidad explotadora y las organizaciones de respuesta se aseguren de que ningún trabajador de emergencias se vea sometido a una exposición que pueda dar lugar a una dosis efectiva superior a 50 mSv, salvo con el fin de salvar vidas humanas o evitar lesiones graves, aplicar medidas para prevenir efectos deterministas graves, impedir que se den condiciones catastróficas que puedan repercutir sensiblemente en las personas o el medio ambiente o al aplicar medidas destinadas a evitar una gran dosis colectiva en cuyas circunstancias el documento ofrece valores orientativos.

El Plan Básico de Emergencia Nuclear (PLABEN) aprobado en el año 2004, y por tanto previo a las referencias anteriores, divide al personal de intervención en tres grupos: Grupo 1, personal que debe realizar acciones urgentes para salvar vidas, prevenir lesiones graves o evitar un agravamiento de las consecuencias del accidente que pudieran ocasionar dosis considerables al público; Grupo 2, constituido por personal involucrado en la aplicación de medidas de protección urgentes y otras actuaciones de emergencias; y Grupo 3, donde está incluido el personal que realice operaciones de recuperación una vez se haya controlado plenamente la situación tras el accidente y se hayan restablecido los servicios esenciales en la zona afectada. El PLABEN exige que todo el personal que intervenga en el área afectada por una emergencia esté sometido a control dosimétrico desde el momento en que comience su intervención. Previsiones similares son establecidas en la Directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo radiológico. En la tabla 1 se recogen de manera simplificada los niveles de referencia establecidos en las referencias anteriores.

A modo de ejemplo, cuando tuvo lugar el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi los niveles de referencia estaban fijados en función de las

Dosímetros de termoluminiscencia (izquierda) y de lectura directa.

tareas que se debían desempeñar, con un valor máximo de 100 mSv para las medidas encaminadas a salvar vidas y para las actividades dirigidas a impedir una catástrofe, siendo necesarios en todo caso, esfuerzos para reducir al mínimo la exposición.

El 14 de marzo de 2011, tres días después del accidente, el nivel de referencia para los trabajadores de emergencia encargados de ciertos trabajos se elevó temporalmente a 250 mSv a fin de que pudieran continuar las actividades necesarias en el emplazamiento y en un radio de 30 km alrededor de la central nuclear, manteniéndose para los servicios de bomberos que efectuaban actuaciones encaminadas a salvar vidas en 100 mSv. El aumento temporal del nivel de referencia se retiró el 1 de noviembre de 2011 para los trabajadores de emergencias del emplazamiento que empezaban a trabajar en esa fecha y el 16 de diciembre de 2011 se retiró para la mayoría de los trabajadores restantes, quedando el nivel de 250 mSv hasta el 30 de abril de 2012 para un pequeño grupo con experiencia y conocimientos especializados.

La mayoría de los trabajadores de emergencias de la instalación recibieron dosis inferiores a 250 mSv, aunque seis de ellos la superaron, siendo la dosis más alta de 678 mSv, de los cuales 590 mSv se debieron a contaminación interna.

Control dosimétrico

En España el control dosimétrico del personal de intervención en emergencias nucleares y radiológicas es efectuado por el CSN como una de las funciones asignadas a los Grupos Radiológicos en los diferentes planes de emergencia exterior. Para dicho control se dispone del siguiente equipamiento:

—4.000 dosímetros de termoluminiscencia para el control de dosis del personal de intervención durante toda su actuación en la emergencia. Los dosímetros proceden del Centro Nacional de Dosimetría y son fruto del Convenio de colaboración del CSN con el Instituto Nacional de Gestión Sanitaria.

—3.000 dosímetros de lectura directa para el control de dosis del personal de intervención en cada una de sus actuaciones en áreas con riesgo radiológico. Los dosímetros, del modelo EPDK2, tienen la posibilidad de fijar alarmas por dosis y tasa de dosis.

La mayor parte de este equipamiento dosimétrico está asignado a los planes exteriores de emergencia nuclear de Burgos (Penbu), Cáceres (Penca), Guadalajara (Pengua), Tarragona (Penta) y Valencia (Penva), distribuido y listo para su uso. Los dosímetros se almacenan en las dependencias de los Grupos de Seguridad Ciudadana y Orden Público (Guardia Civil, Mossos d'Esquadra y Ertzaintza) para su utilización en los controles de acceso radiológico; Centros de Coordinación Municipal (Cecopales), para su asignación al personal de intervención municipal; y en las Estaciones de Clasificación y de Descontaminación, para el control dosimétrico, principalmente de los componentes de los Grupos Sanitario y Radiológico. En caso de una emergencia radiológica, además de determinadas unidades distribuidas en diez localizaciones para su uso en emergencias de menor entidad, se dispone de una dotación centralizada en la sede del CSN, constituida por 200 dosímetros de termoluminiscencia y 200 dosímetros de lectura directa para su traslado inmediato al lugar de la geografía española donde sea necesario su uso.

Este equipamiento radiométrico, junto con distintos tipos de radiámetros, contaminómetros y espectrómetros, que en conjunto suman más de 8.000 unidades, es verificado periódicamente para comprobar las condiciones de almacenamiento, el estado de las

Programa LINCEO de gestión del equipamiento radiométrico, comunicaciones y material auxiliar. A la derecha, web de gestión del sistema Dosi-app.

baterías, su correcto funcionamiento y, de acuerdo con el programa establecido, la validez de las calibraciones.

La gestión de estas actividades, que incluyen además el mantenimiento y comprobación de otro material auxiliar, como equipos de comunicaciones o vestuario básico de protección, se coordina a través de la aplicación Linceo (Logística de la instrumentación, comunicaciones y otro material asociado a emergencias) que permite programar y gestionar actividades de mantenimiento y comprobar *online* la disponibilidad de cualquier equipo, los certificados de calibración, las ubicaciones de almacenamiento y el resultado de las últimas verificaciones. Además, permite consultar procedimientos, coordenadas geográficas, manuales de uso y vídeos sobre el funcionamiento básico de los equipos.

Mapa de distribución del equipamiento dosimétrico con más de 120 ubicaciones (en azul, emergencias nucleares; en rojo emergencias radiológicas).

El proceso de asignación dosimétrica durante una emergencia nuclear o radiológica difiere según el tipo de dosímetro. Así, la dosimetría de termoluminiscencia se asigna desde el momento en que el actuante comienza su intervención hasta la finalización de la misma; posteriormente el dosímetro se remite al Centro Nacional de Dosimetría para su lectura y evaluación de la dosis recibida durante toda la emergencia.

Sin embargo, los dosímetros de lectura directa son asignados al personal de intervención antes del inicio de una determinada tarea en un área con riesgo radiológico y desasignados a su salida, registrando en ese momento la dosis recibida durante la intervención. Ante una nueva entrada, el técnico del Grupo Radiológico asignará un nuevo dosímetro de lectura directa, comprobando previamente si los registros de la dosis acumulada por el actuante son compatibles con los niveles de referencia y con las tareas a desarrollar.

En el caso de emergencias nucleares estas labores de gestión dosimétrica se llevan a cabo en los controles de acceso radiológico de entrada o salida del personal de intervención de las

zonas afectadas, siendo muy probable que la entrada y salida de un interviniente se efectúe por controles diferentes. También, y como ya hemos visto, se producirán asignaciones dosimétricas de actuantes municipales en los Cecopales y en las estaciones de clasificación y descontaminación.

En el caso de emergencias radiológicas, las asignaciones dosimétricas están planificadas con una operativa más sencilla, definiendo, si es posible, un único puesto fijo de control dosimétrico por el que se producirá la entrada y salida a la zona de riesgo radiológico del personal de intervención.

Operativa de asignación dosimétrica con Dosi-app.

Aplicación de gestión

Las características específicas del proceso de asignación dosimétrica en situaciones de emergencia hicieron en su momento necesario el desarrollo específico por el CSN de un sistema de gestión con las siguientes funcionalidades mínimas:

—Sistema de registro dosimétrico que permita la asignación rápida y sencilla de los dosímetros de termoluminiscencia y de lectura directa al personal de intervención en una emergencia.

—Conocimiento de las dosis recibidas por un determinado interviniente en actuaciones anteriores antes de una nueva asignación, considerando que los registros de dosis pueden haberse generado en localizaciones diferentes y en condiciones muy limitadas o nulas de comunicación.

—Aviso automático configurable de superación de un nivel de referencia que limite la entrada a áreas con riesgo radiológico.

—Envío de los datos dosimétricos a la Sala de Emergencias del CSN (Salem) para su análisis.

El estudio de diferentes alternativas, primando la sencillez y robustez de un sistema que debe funcionar en situación de emergencia, dio como resultado el desarrollo de la aplicación de gestión dosimétrica para dispositivos móviles Dosi-app.

En este sistema la asignación dosimétrica se efectúa mediante la cumplimentación de un formulario digital que se nos presenta al abrir la aplicación. Una vez introducidos los datos y firmado el formulario por el receptor de la dosimetría, se graban en una tarjeta NFC (Near Field Communication), tecnología que permite la transferencia y grabación de datos entre dos dispositivos por

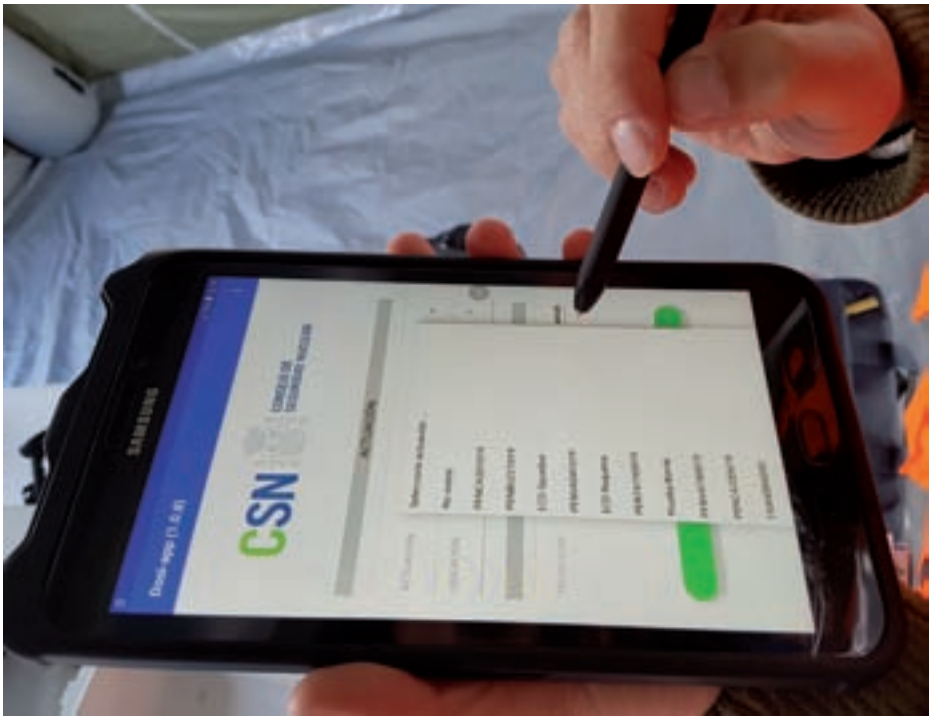
Asignación dosimétrica al Grupo de Atención Ciudadana.

Envío de datos dosimétricos desde un puesto de comunicaciones de la Unidad Militar de Emergencias.

proximidad. La tecnología seleccionada para la aplicación es pasiva; es decir, la tableta actúa como dispositivo activo y la tarjeta aprovecha el campo generado para intercambiar la información.

Una vez grabados los datos en la tarjeta NFC se une al dosímetro de termoluminiscencia con la pinza de sujeción y se entrega el conjunto al actuante.

Cuando un actuante ha terminado su actividad y sale por el control de accesos más conveniente a la operativa, sólo será necesario acercar la tarjeta NFC a la tablet para recuperar los datos de entrada y anotar la dosis recogida por el dosímetro de lectura directa, que una vez puesto a cero, queda almacenado en el control para un nuevo uso. El actuante firma la salida del control, guardando el conjunto dosímetro de termoluminiscencia - tarjeta NFC para la siguiente intervención.



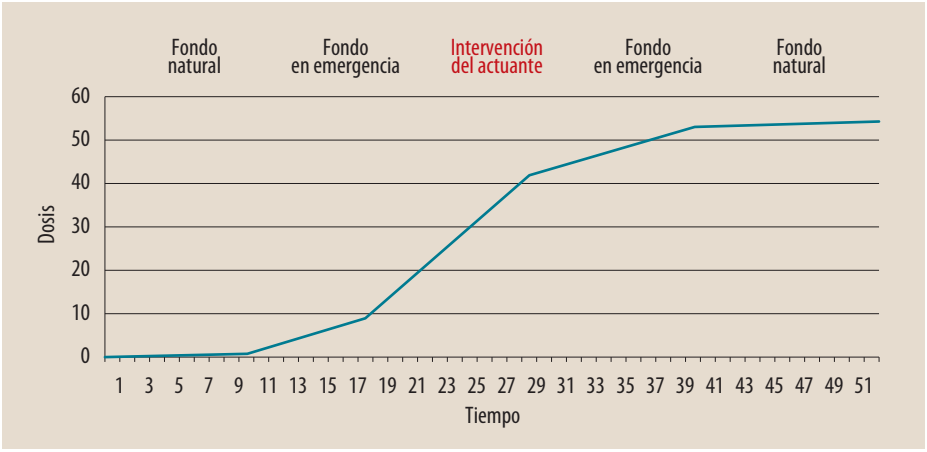
Sistema Dosi-App.

Si un interviniente debe actuar de nuevo y ya dispone de dosímetro de termoluminiscencia y tarjeta NFC, sólo será necesario acercar la tarjeta a la tableta para la lectura de los datos dosimétricos previos y asignarle un dosímetro de lectura directa. En ese momento, la aplicación mostrará la dosis acumulada en anteriores intervenciones durante la emergencia, informando de si se han superado o no los valores de alerta o alarma que se hayan previsto.

Las comunicaciones y el envío de datos se presentan como factores críticos para cualquier sistema que deba trabajar en condiciones de emergencia y, en este sentido, el envío de datos desde los controles dosimétricos a la Salem se consideró como actividad crítica durante el diseño y dio lugar al desarrollo de distintas posibilidades para el envío.

En primer lugar, y como canal primario de envío de datos, todas las tabletas disponen de una tarjeta SIM que permite su envío a través de tecnología 4G.

En segundo lugar, existe la opción de enviar los datos por una red



La aplicación Dosi-app permitirá calcular la dosis recibida por los dosímetros TLD procedente del fondo de emergencia.

Lectura automática de código de barras.

wifi proporcionada en la zona donde se ubique el puesto de mando. En este sentido, ya se han efectuado pruebas de transmisión de datos con el apoyo de la Unidad Militar de Emergencias.

En tercer lugar, y para aquellos casos donde la comunicación no es viable en la zona de control dosimétrico, es posible la extracción de los datos en una memoria USB para su envío a través de una pasarela segura de internet en otra localización. El sistema impide la eliminación de los datos de la tableta hasta que se haya recibido confirmación de su recepción correcta sin ninguna incidencia en la Salem.

En todos los casos los ficheros están cifrados y cada tableta dispone de un certificado digital con longitud de clave de 2.048 bits. El certificado almacenado no es exportable y se revoca en el caso de sustracción o pérdida del dispositivo. Toda la información que se exporta desde la tableta es cifrada con la clave pública del certificado y sólo puede ser descifrada por terminales que dispongan de la clave privada. Este cifrado incluye a la información contendida en las tarjetas NFC.

Por último, la aplicación dispone de una web de administración desde donde se accede a la configuración general del sistema y, entre otras posibilidades, se puede dar de alta actuaciones (simuladas o reales), establecer valores de dosis de alerta y alarma, definir los grupos operativos de la emergencia, precargar los puestos de control dosimétrico de los planes exteriores de emergencia nuclear y editar a los técnicos del Grupo Radiológico autorizados, con su usuario y contraseña.

También, y desde esta web, se accede a los datos dosimétricos recibidos durante la emergencia: identificación del actuante, punto y hora de entrada, punto y hora de salida, dosis recibida en cada una de las actuaciones y dosis total durante la emergencia.

Nuevas funcionalidades

Durante el primer semestre de 2019, el sistema Dosi-app de control dosimétrico ha sido implantado y distribuidos sus componentes en todos los planes exteriores de emergencia nuclear y para situaciones de emergencia radiológica, y los técnicos de los Grupos Radiológicos han recibido la formación necesaria para su manejo.

Por otro lado, ya se está trabajando en dos nuevas funcionalidades de la aplicación:

—Introducción de datos periódicos de valores de tasa de dosis ambiental en los puntos de asignación dosimétrica, lo que permite a la aplicación relacionar de manera automática esta información con la dosis recibida por un determinado dosímetro de termoluminiscencia desde el momento en que se transportó al punto de asignación hasta que fue asignado, y desde el momento en que fue entregado para su lectura por el usuario hasta el momento en que se retiró para su envío al Centro Nacional de Dosimetría.

—Explotación automática de los datos dosimétricos recibidos en la Salem y elaboración de informes predeterminados para, en situación de emergencia, efectuar un rápido análisis de los datos por diferentes variables como por ejemplo punto de acceso, Grupo operativo, o nivel de dosis.

La orquesta radioactiva

14:46 horas del 11 de marzo de 2011, un terremoto de nueve grados en la escala Richter en el océano Pacífico paraliza once centrales nucleares en Japón, entre ellas la de Fukushima. Un día después, tras una fuerte explosión en esa central, el pánico a un nuevo accidente nuclear se instala en todo el mundo. Un poco más tarde, un grupo de científicos suecos se reúne y declara que están hartos de que solo se hable de temas relacionados con la radioactividad cuando se producen trágicos accidentes como este.

■ Texto: **Sergio Ariza Lázaro |** periodista ■

A raíz del accidente y de la reunión de los científicos, el Instituto Real de Tecnología de Suecia, (KTH por sus siglas en sueco), y el Instituto de Seguridad Nuclear Sueco (KSU), comenzaron a acercarse a la radiación ionizante con una perspectiva totalmente original. Querían demostrar que la humanidad lleva conviviendo con esta radiación desde el principio de los tiempos. Está en la comida, el agua y el aire; en casi todas las fuentes naturales; en la Tierra y en el espacio exterior; pero, como ocurre con cualquier cosa que no podemos ver, oler o detectar con nuestros sentidos; conocer su presencia oculta agudiza y amplifica nuestros miedos. Así que estos científicos decidieron hacer algo que aparentemente se relaciona muy poco con la ciencia: magia.

¿Cómo suena un átomo inestable?

Como si en vez de físicos nucleares fueran alquimistas, estos investigadores suecos decidieron *materializar* esas radiaciones naturales y hacerlas atractivas al público. Lo hicieron con un proyecto que se iba a basar en el lema "crear los sonidos mágicos del núcleo de un átomo". Fue así como comenzó a surgir la Radioactive Orchestra (Orquesta Radioactiva), un proyecto liderado por los profesores del KTH, Arne Johnson y Bo Cederwall junto a Karin Andgren, al que se sumaron el artista electrónico Kristofer Hagbard, que fue el responsable de crear una interfaz interactiva para la exploración de datos y la generación de bandas sonoras, y el DJ electrónico Axel Boman, que, en colaboración con los físicos nucleares Bo Cederwall y Torbjörn Bäck, fueron los encargados de la mágica transformación de la radiación en sonido. Su tarea fue musicalizar la radiación ionizante que nos rodea, pasando esa energía a notas en vez de a frecuencias.

Arriba, los miembros de la Radioactive Orchestra. Debajo, carátula original de su primer disco (2011).

El resultado fue una especie de traducción de datos y patrones de la radiación ionizante; es decir, de las partículas y la energía emitidos por el núcleo de un átomo durante el proceso conocido como desintegración radioactiva. Esto se logra con unos algoritmos musicales basados en los modelos de los científicos de cómo se emite la radiación de varios isótopos.

Boman fue el encargado de hacer la primera banda sonora, utilizando varios parámetros físicos y musicales —como la velocidad de desintegración y la escala musical— y usando sus dotes como DJ para añadir ritmos y texturas que hicieran más atractivo el resultado. Más allá de su valor como curiosidad científica, el efecto es, cuando menos, fascinante. Una etérea serie de notas que corresponden a la huella de radiación única de cada isótopo. Algunos producen pitidos abstractos y desarticulados mientras que otros tejen armonías más intrincadas.

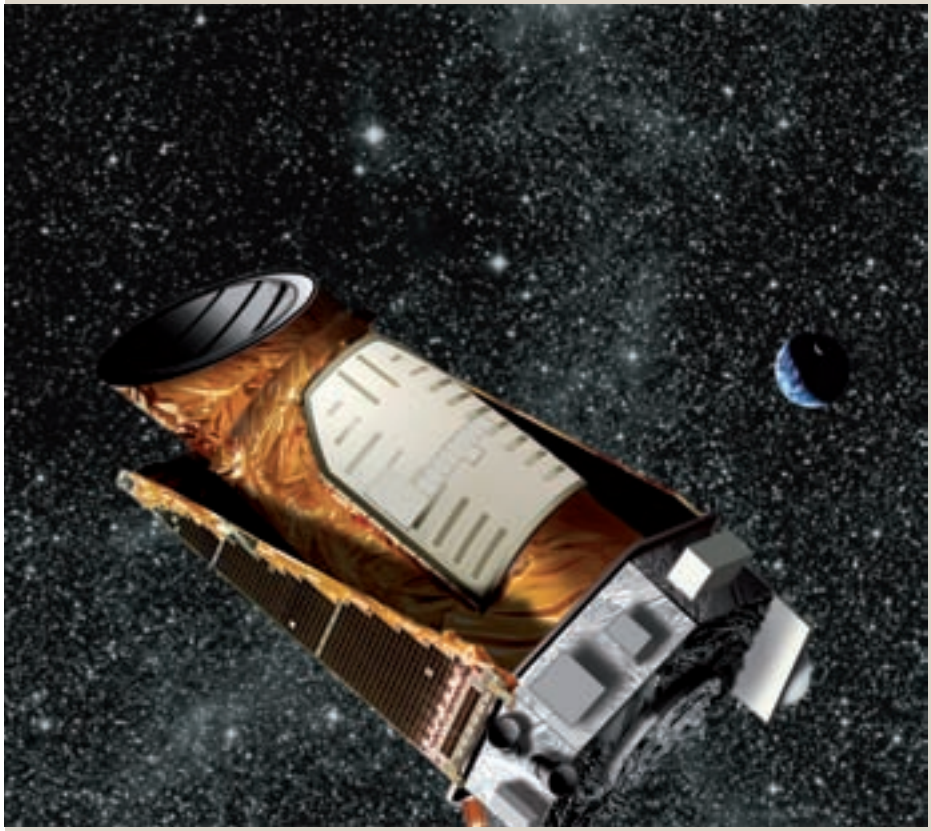
El proyecto terminó dando como resultado un disco publicado por el sello de Boman, titulado, sencillamente, 'Radioactive Orchestra'. Además, en la página web del proyecto se permitió jugar con la descomposición de los átomos y que los usuarios pudieran explorar los datos científicos y auditivos, y crear sus propias composiciones. Se hizo un concurso y llegó a aparecer un EP con los ganadores del mismo, aunque la obra más interesante sigue siendo el disco de Boman. Para el oyente casual puede sonar hipnotizante, pero los físicos nucleares que ayudaron con el proyecto pueden percibir mucho más. Como explicaba el propio Boman, "lo increíble de poner esto a los físicos es que pueden entender lo que está sucediendo. Si les explicamos un poco sobre cómo creamos estas melodías, entonces pueden predecir cómo sonarán". Para Bäck, uno de los físicos nucleares que han colaborado con el proyecto, la fascinación viene porque "realmente puedes oír lo que está pasando en el núcleo".

Kepler y la música celeste

Johannes Kepler fue el astrónomo más importante de su tiempo, conocido principalmente por sus leyes sobre el movimiento de los planetas en su órbita alrededor del Sol. El alemán estaba convencido de que Dios había compuesto el Universo de manera armónica, con esa música universal de la que hablaba Pitágoras, como Tolkien hizo que su Universo fuera creado por la Gran Música de Ilúvatar. Pero la realidad suele ser más complicada que la ficción y tras toda una vida dedicada al estudio de cómo se movían los planetas, vio que era imposible explicarlo con círculos. Luego utilizaría óvalos, pero volvió a fracasar, hasta que decidió emplear elipses. A la tercera fue la vencida y Kepler se convirtió en una celebridad, aunque en una celebridad cabreada con Dios por no emplear los mucho más armónicos círculos, en vez de las complicadas elipses. Aunque le podría servir de consuelo que cuando Einstein destapó la Teoría de la Relatividad general, descubrió que en la geometría tetradimensional del espacio-tiempo los cuerpos celestes siguen una figura todavía más simple que el círculo, la línea recta.

Con esos descubrimientos Kepler habló de una "música celeste", que se basaba en la velocidad de los planetas. A partir de su famosa segunda ley, Kepler convirtió a los planetas conocidos en su época en un coro celestial en el que cada uno de ellos asumía una voz. Así, Saturno y Júpiter eran los bajos, Marte el tenor, la Tierra y Venus los contraltos y Mercurio la soprano. Pues bien, gracias a la misión Kepler, un observatorio espacial que la NASA puso en órbita el 6 de marzo de 2009, la Tierra se ha convertido en un auditorio desde el que se puede escuchar la música de cientos de estrellas.

Antes ya se nos había revelado la voz del Sol, cuando se supo que su superficie se mueve de arriba abajo y crea millones de vibraciones diferentes. Estos movimientos solares generan ondas de sonido de 0,003 hercios, muy lejos del rango de audición humano, que comienza en los 20 hercios, pero un grupo de científicos, en colaboración con varios músicos, crearon una herramienta capaz de acelerar esas vibraciones hasta frecuencias más altas, pudiéndose registrar las melodías del Sol. Ahora, gracias a la misión Kepler, se han podido medir las vibraciones que emiten unas 500 estrellas similares al Sol. Cada una de estas estrellas tiene un sonido propio; como el que tiene un instrumento musical, ya sea un violín o un saxofón; lo que hace, según Antonio Jiménez, uno de los investigadores de este proyecto, que al igual que "escuchando su música podemos saber de qué instrumento se trata, del mismo modo, que escuchando los diferentes sonidos de las estrellas podemos conocer qué características tienen sus intérpretes". Algo que hace más fácil encontrar planetas similares al Sol o la Tierra.



Telescopio espacial Kepler.

El grupo británico de rock electrónico New Order, durante una de sus actuaciones.

Pero ¿tiene algún tipo de valor más allá de su carácter de curiosidad científica? O dicho de otra forma, ¿se puede escuchar esto sin tener ni idea de física nuclear? Pues parece que la respuesta es sí; no en vano la revista *online Resident Advisor* (una de las Biblias de la música electrónica) puntuó al disco con un 8 sobre 10 escribiendo cosas como que "en lugar de la pura abstracción de la música basada en datos, Boman y Hagbard han optado por hacerlo escuchable e incluso, sí, bailable". Pero es que, además, esta unión entre música y radioactividad nos resulta extrañamente familiar, y eso puede ser porque la elección de la música electrónica para ponerle banda sonora a la radioactividad ya había tenido un antecedente mítico, el *Radioactivity* de Kraftwerk.

El grupo alemán, el más importante pionero de la música electrónica, lanzó en 1975 su quinto disco de estudio, llamado *Radioaktivitat* (*Radioactivity*, en su versión en inglés). La canción más recordada de aquel disco era la canción titular y mucha gente vio en esa canción, y en el disco entero, una apología de la energía nuclear, pero los alemanes estaban jugando con la ambigüedad al decir que "está en el aire, para ti y para mí". Lo que sí queda claro es su capacidad para adivinar los sonidos del futuro y ser capaces de ver que algo como la radioactividad necesitaba una banda sonora futurista, siendo el primer disco en el que se olvidaban de instrumentos más orgánicos como la flauta, el violín o, más significativamente, la guitarra.

Carátula del disco Radioactivity de Kraftwerk.

Entre las otras canciones del disco había títulos alegóricos, como "Geiger Counter", que simulaba los sonidos de un contador Geiger según se acerca a objetos radioactivos, y "Uranum", una canción con una parte coral al teclado, que New Order incorporaría a su mayor éxito, "Blue Monday", mientras que en la canción titular deletreaban la palabra radioactividad en código Morse. Es evidente que los creadores de "Autobahn" fueron unos adelantados a su tiempo.

Datos convertidos en música

Pero volviendo a la orquesta radioactiva, no fue este proyecto el primero que utilizó datos para transformarlos en música, ha habido muchos otros ejemplos. En el año 2000 el colectivo experimental UBSB (formado por Zbigniew

Integrantes de la Orquesta Radiactiva. De izquierda a derecha, Karin Andgren, Arne Johnson, Bo Cederwall, Axel Boman y Kristofer Hagbard.

Aparato con el que recogen la radiación gamma y convierten las frecuencias en notas musicales.

Karkowski, Atau Tanaka, Edwin Van Der Heide y Ulf Bilting) experimentó con un agente de software Unix que utilizaba las comunicaciones de Internet y transformaron esa masa de datos en un disco de ruido abrasivo llamado *Traceroute*. Poco después John Cramer, físico de la Universidad de Washington, recreó el sonido producido poco después del *big bang*, utilizando los datos obtenidos por la misión del satélite Planck. Y después de que Boman y los suyos crearan la Orquesta Radioactiva, James Murphy, líder de LCD Soundsystem y uno de los nombres fundamentales de la música del siglo XXI, se asoció con el gigante informático IBM para un proyecto en el que, utilizando los datos algorítmicos generados por los partidos de tenis del Abierto de EE. UU., lograba crear unas etéreas piezas musicales capaces de poner a bailar al más estirado... aunque nuevamente vuelven a traer a la memoria a los omnipresentes Kraftwerk.

La sinfonía del universo

Lo que sí que está claro es que la relación entre música y ciencia viene de muy lejos. Se podría decir que la música es ciencia; en concreto, matemáticas. Pitágoras y Euclides ya hablaban de "una mística armonía matemática del universo", algo que tenía que ver con el concepto de *musica universalis* (es decir, música universal), una filosofía que consideraba las proporciones en los movimientos de los cuerpos celestes, el Sol, la Luna y los planetas, como una forma de música. No era una música audible, sino más bien un concepto armónico, matemático o

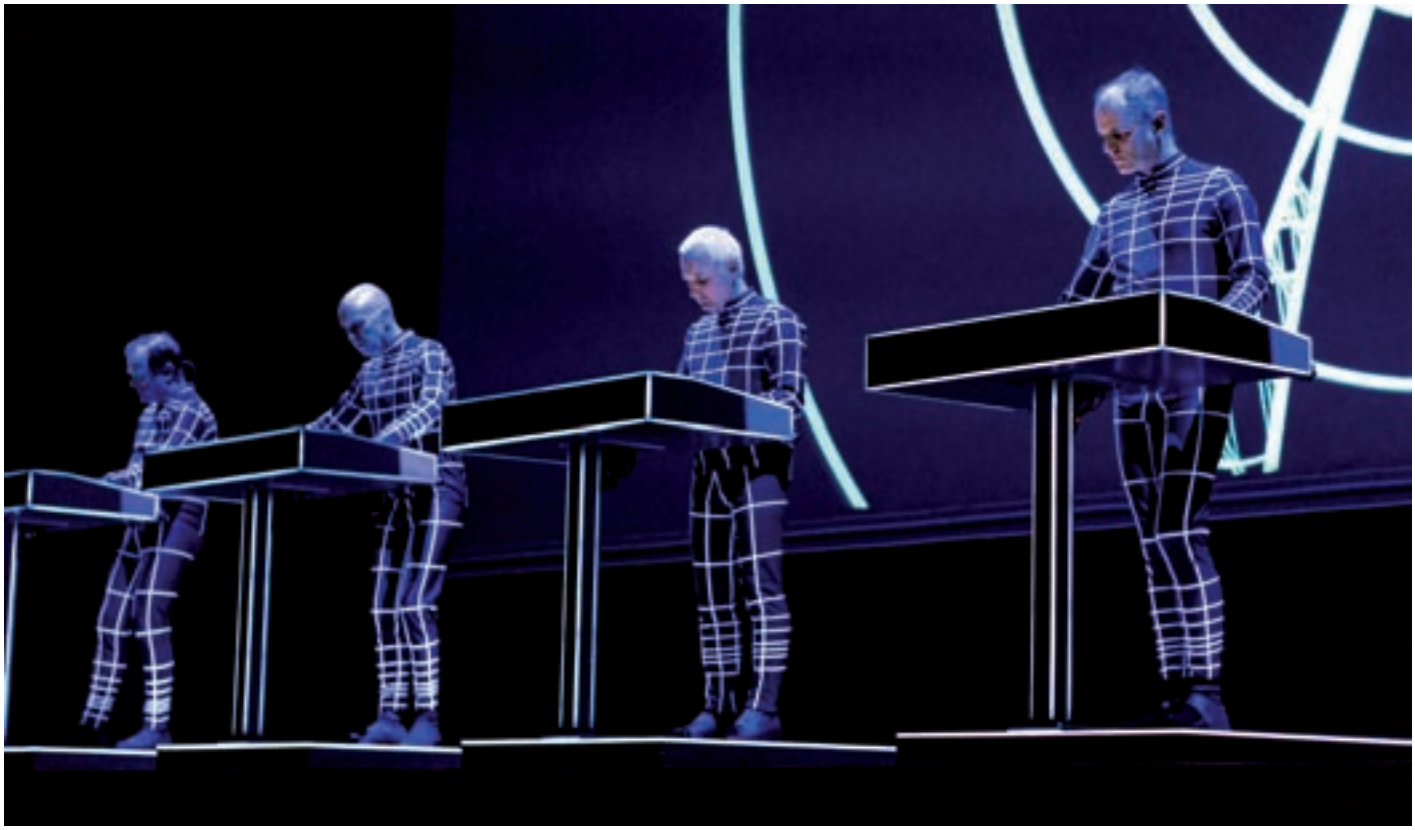
religioso. Ahora, música y ciencia siguen relacionadas a través de la teoría de cuerdas, que nos dice que las partículas elementales no son puntos, sino cuerdas que vibran a distintas frecuencias, como las notas de una guitarra.

Pero, quizás, el que mejor haya descrito la relación entre la ciencia y la música haya sido el físico mexicano Gerardo García Naumis, que declaró que "más allá de las fórmulas, de los diagramas y de las ondas, hay un misterio esencial porque la música está en el origen de lo que somos".

En este contexto se entiende que fascinen y se aplaudan propuestas como las de la Orquesta Radioactiva, una iniciativa altamente positiva en la que se aprovecha la magia de la música para lograr acercar al común de los mortales contenidos científicos. Parece claro que los suecos cumplieron su objetivo y las melodías de la Orquesta Radioactiva han podido servir para encender el debate sobre la radiación y ver cómo es algo más que ese peligro en el que pensamos cada vez que pasa algo grave en una central nuclear.

Cristofer Hagbard, uno de los fundadores de la Orquesta Radiactiva, durante una presentación de su trabajo.

Por eso, un proyecto como éste ha recibido tantas alabanzas, ya que cualquier cosa que anime a la gente a investigar más es una gran noticia, y en este caso todavía más, siendo un medio alternativo y divertido para estimular el debate sobre las radiaciones ionizantes y animar a la gente a descubrir un poco más sobre ellas y su complejo mundo.



Kraftwerk durante un concierto en Helsinki (Finlandia) en 2018.

Un nuevo sarcófago para Chernóbil

Texto: **Natalia Muñoz Martínez** | Área de Comunicación del CSN

Han sido necesarios muchos años de trabajo y, sobre todo, de recaudación de fondos para completar la misión de construir una barrera protectora contra la radiactividad proveniente del reactor número 4 de la central nuclear de Chernóbil.

Una mole de más de 30.000 toneladas de peso en forma de bóveda guarda en su interior los vestigios del accidente nuclear más grave del siglo XX. Se trata del denominado Nuevo Sarcófago de Seguridad de Chernóbil, o NSC (por sus siglas en inglés, de *New Safe Confinement*), que fue entregado oficialmente por la Unión Europea al Gobierno de Ucrania en julio de 2019.

Sin embargo, comenzó a construirse más de una década antes, en 2007, año en el que un consorcio de empresas inició las labores de edificación de esta gigantesca estructura de 108 metros de altura, 162 metros de largo y 257 metros de ancho. Sus cimientos descansan sobre un volumen de 20.000 m^3 de hormigón, con la idea de que perdure, como mínimo, cien años.

La estructura principal de este *guardián* de la radiactividad se compone de 16 arcos de celosía triangulada de acero. La distancia entre el cordón superior e inferior de cada uno de estos arcos es de doce metros. La imagen final es la de una enorme bóveda de acero sostenida en dos vigas longitudinales de hormigón. En su construcción se ha tenido en cuenta la posible corrosión y las temperaturas extremas de la zona. Además de estar cubierta por paneles de acero de especial resistencia, esta bóveda metálica oculta en su interior una cámara de aire de doce metros de espesor en la que se ha instalado un sofisticado sistema de ventilación que minimiza el riesgo de corrosión, mantiene la humedad relativa de la instalación en torno al 40 % y permite recircular unos 45.000 m^3 de aire por hora. La temperatura y la humedad dentro de la cámara de aire se regulan mediante un sistema de secado y nueve de recirculación que, individualmente, disponen de cien unidades de tratamiento de aire.

El revestimiento del terreno exterior del sarcófago ocupa una extensión de aproximadamente 85.000 m^2. Se trata de un sistema compuesto de varias capas que conforman una barrera física diseñada para restringir la propagación de la humedad, el aire y el calor. Además, protege el emplazamiento de los efectos atmosféricos adversos de la zona.

Superar los riesgos y dificultades inherentes al proyecto ha requerido años de trabajo preliminar y organización. Las labores preparatorias del terreno se completaron en 2011 con la retirada de suelo contaminado y la construcción de la plataforma inicial de hormigón sobre la que debía edificarse la estructura principal de este gigante de acero. Todas estas medidas eran, además, necesarias para minimizar la exposición de los trabajadores a la radiación.

Cinco años después, en 2016, el esqueleto principal del sarcófago se trasladó, mediante un sistema de raíles, a la cubierta que protegía en ese momento el reactor accidentado y su montaje definitivo tardó varios años en llegar, debido, principalmente, a la falta de fondos para completar los trabajos.

La financiación de este proyecto superlativo, que ha tenido un coste de 2.100 millones de euros, ha sido recaudada por el Fondo de Protección de Chernóbil del Banco Europeo para la Reconstrucción y el Desarrollo.

1983
Se pone en funcionamiento la central nuclear de Chernóbil.

Abril 1986
Se produce el accidente nuclear, el más grave del siglo XX.

Noviembre 1986
Se coloca la primera protección del edificio del reactor.

2007
Se aprueba y adjudica la construcción del nuevo sarcófago.

2008
Trabajos de consolidación de la estructura anterior.

2011
Se termina de construir la plataforma de hormigón sobre la que se apoyará el nuevo sarcófago.

2011-2016
Se construye la estructura del sarcófago.

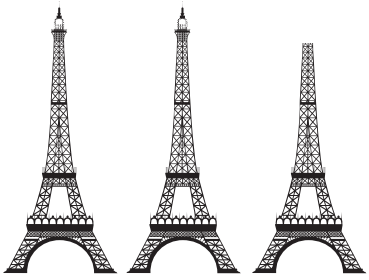
Construido para durar

Solo la estructura metálica pesa

25.000 toneladas.

Con sus **110** metros de altura podría cubrir Notre-Dame de París.

El sarcófago pesa casi tres veces lo que la torre Eiffel.



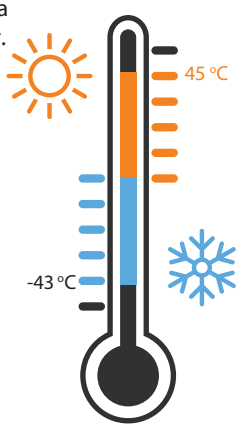
El peso total es de

31.000 toneladas

La mayor parte de la estructura ha sido fabricada en Italia.

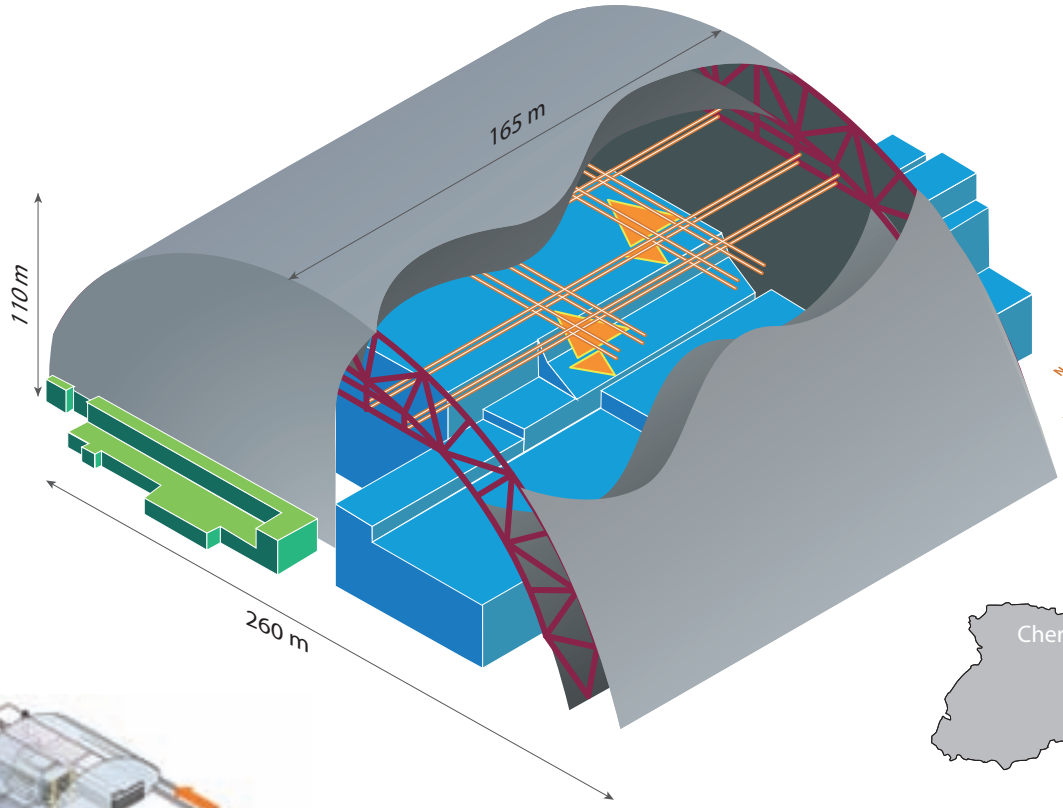
El test del tiempo

Con una vida esperada de 100 años el NSC necesitará soportar todo lo que la naturaleza le pueda presentar.

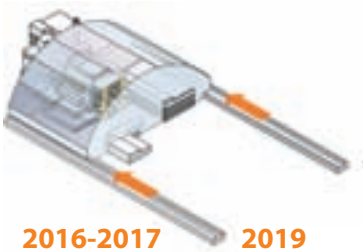


El confinamiento se ha contruido para resistir temperaturas entre –43°C y +45°C.

y tornados de categoría 3 (con velocidades del viento entre 254 y 332 km/h)



Situado a dos horas de carretera al norte de Kiev, la capital de Ucrania, el accidente de Chernóbil propagó polvo radiactivo a lo largo de Europa y contaminó la zona circundante



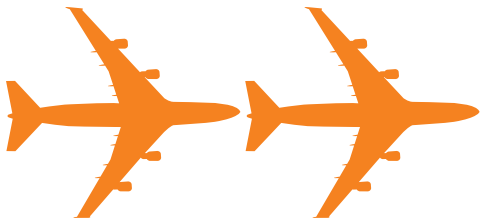
2016-2017
Se traslada la estructura sobre rieles hasta cubrir la central.

2019
Se finaliza y entrega la obra.

Grande e inteligente

Parecido a un hangar de aviación, su longitud total del NSC es de

165 metros, más largo que dos aviones Jumbo.



En 2015, la revista *Science* declaró como el gran descubrimiento del año una herramienta de edición genética denominada CRISPR. En todo el mundo de las ciencias de la vida se sintió la llegada de esta tecnología como una auténtica revolución, dado que permite activar, silenciar o corregir los genes de cualquier célula, y hacerlo de forma sencilla, rápida, eficaz y barata. Sus aplicaciones abarcan numerosos ámbitos, incluyendo la mejora de cultivos, la erradicación de plagas, la investigación y el desarrollo de nuevos medios de diagnóstico, prevención y tratamiento de enfermedades, entre otros. El premio Princesa de Asturias de Investigación de ese año también reconoció el invento premiando a Jennifer Doudna y Emmanuel Charpentier, las dos investigadoras que habían puesto a punto la herramienta. Fuera quedó Francisco Martínez Mojica, un microbiólogo español que puso los primeros peldaños en el camino que llevó a esta tecnología, simplemente porque nadie en el jurado lo sabía.

Francisco Martínez Mojica, microbiólogo descubridor del sistema CRISPR

"CRISPR es una caja de herramientas con aplicaciones en todas las ciencias de la vida y de la salud"

Ignacio Fernández Bayo | Periodista científico

Para sorpresa general, en enero de 2016, un artículo denominado "Los héroes de CRISPR", publicado en la revista Cell, revelaba que el origen de esta extraordinaria herramienta se encontraba en Alicante y que era el fruto de la investigación pionera de un español, hasta entonces desconocido. Casi un tercio del artículo estaba dedicado a Mojica, y de la noche a la mañana se vio catapultado a la fama, reclamado por todas partes para ser entrevistado o para impartir conferencias por toda España y también por el extranjero. Después, su nombre empezó a sonar como firme candidato al Premio Nobel. Nadie duda de que, antes o después, el sistema CRISPR recibirá el galardón, aunque la lista de pretendientes al mismo es larga, porque el proceso para su desarrollo también lo ha sido y está jalonado por aportaciones importantes de una veintena de investigadores de todo el mundo. Se sabe que Mojica viene siendo nominado cada año por varios proponentes, pero nadie puede anticipar qué decidirá la Academia sueca cuando llegue el momento. El dice sentirse ya suficientemente reconocido con los premios que se le han entregado desde entonces y el aprecio de la comunidad científica.

PREGUNTA: *¿Le quita el sueño el Nobel?*

RESPUESTA: No, no. Estaría muy ido. En octubre me molestan los periodistas y hasta se cuelan en mi despacho. Por eso, esos días me quedo en casa. Yo les digo que el día que lo concedan se llevarán un disgusto porque se lo darán a alguien que vive a miles de kilómetros de aquí. De todos modos, después de dos o tres años con la misma cantinela me di cuenta de que llegaba el día y me ponía nervioso. No vale la pena hacerse ilusiones con algo que tiene una probabilidad tan remota.

P: *¿Por qué no se ha concedido aún el premio a CRISPR cuando todo el mundo apostaba por ello?*

R: Yo creo que están esperando a las aplicaciones médicas, porque parece que se concederá el de Medicina, pero

NURIA CHAMORRO

es justamente ahí donde CRISPR es aún un futurible, con bastantes expectativas de que la cosa vaya bien, pero que tardará. Y luego está el problema de las patentes entre el Instituto Broad, del MIT, en Estados Unidos, y Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier en Europa.

P: *¿No podría haber dos premios, uno en Química y otro en Medicina? Al fin y al cabo, su descubrimiento era más básico, más cercano a la bioquímica.*

R: Sería extraño porque lo que más ha llamado la atención son las aplicaciones médicas, que creo que es lo que están esperando. Si hay un Nobel para CRISPR lo más probable, que no creo que sea lo más justo, será por Medicina.

P: *Aparte del merecimiento, España carece de una estructura de presión, no ejerce de lobby, que es muy importante en el Nobel.*

R: Es fundamental, por suerte o por desgracia. Hay que hacer una presión sutil, hacer que llegue la información a quienes deciden. Esto se ha intentado hacer en algún momento. Cuando Carmen Vela era secretaria de Estado, estuvo apostando fuerte, moviéndose mucho y en esa época fui invitado por las embajadas españolas en países como Japón, China, Suecia, Gran Bretaña.

P: *La revolución CRISPR parece que va más lenta de lo que se decía hace 4 o 5 años.*

R: Si miras a nivel de publicaciones la revolución sigue en la misma línea exponencial.

P: *Pero lo que interesan son las aplicaciones.*

R: Las aplicaciones es lo que le interesa a todo el mundo. Cuando empieza a subir el número de publicaciones de algo siempre llega un momento en que se estabiliza y luego baja. Cuando apareció la edición genética se reavivó durante unos años, y cuando parecía que la línea iba a caer surgió otra aplicación, como es el diagnóstico molecular, y así sigue porque han surgido

otras herramientas que mejoran mucho esas aplicaciones.

P: *¿Qué otras aplicaciones aparecen?*

R: Donde CRISPR es ya una realidad es en plantas. Todo lo que es mejora genética de plantas se está haciendo desde hace ya mucho tiempo con un éxito increíble para mejorar la productividad, hacer plantas resistentes a bacterias, virus, hongos. Y no son, o no deberían llamarse, transgénicas porque no llevan material genético de otras especies o de otra variante. De hecho, en Estados Unidos se concluyó legalmente que no eran organismos modificados genéticamente y en Europa alguien del Tribunal Superior de Justicia dijo que iba a ir en la misma línea, pero tres meses más tarde salió el decreto que lo considera transgénico. Es decir, que si con CRISPR silencias un gen o cambias una base por otra también se considera transgénico. Es alucinante.

P: *¿Alguna de estas plantas que esté ya en el mercado se ha hecho con CRISP?*

R: Se han hecho varias. La primera que se autorizó en EEUU fueron champiñones para inhibir una enzima que produce el pardeamiento después de cortarlo. Pero hay muchas más aplicaciones; por ejemplo, se puede utilizar para guardar información dentro de una bacteria o para usar bacterias como sensores, capaces de detectar con CRISPR una molécula. Sensores dentro de seres vivos o en el medio ambiente. Lo puedes meter dentro de una célula eucariota y ahí también sirve como un registro de cosas que ocurren en el organismo. Y con una pequeña aplicación puedes seguir el rastro de un embrión y ver de dónde vienen las células que lo forman, los linajes celulares etc. Siguen surgiendo nuevas herramientas y aplicaciones que eran impensables y hace que las publicaciones sigan subiendo de forma exponencial. Es sorprendente que no baje desde el año 2013, que es cuando empezó la subida bestial. Cada día se publican entre 15 y 20 nuevos estudios. Y todo, o casi todo, son aplicaciones

P: *¿Aún no se conocen todas sus potencialidades?*

R: Está demostrado que CRISPR tiene un valor enorme en todo tipo de campos. Es una caja de herramientas, un conjunto de técnicas, que tiene aplicaciones en todas las áreas de ciencias de la vida y de la salud. Ha permitido duplicar la velocidad de crecimiento de

Francisco Martínez Mojica en su laboratorio.

FUNDACIÓN BBVA

plantas, o evitar que se tengan que usar plaguicidas o que crezcan plantas en ambientes en los que no podrían en países donde hay problemas de agua, de salinidad... eso se está resolviendo de forma sorprendente.

P: *Pero en medicina la cosa va lenta.*

R: Va lenta, como debe de ir en aplicaciones clínicas en humanos porque eso requiere ensayos clínicos, garantías de seguridad, de un perfeccionamiento de las herramientas para que no se produzcan errores, como ocurren en su origen. Hay que pulirlo. Hay problemas relacionados con el hecho de que CRISPR lo que hace es poner el cursor en el sitio donde se tiene que poner para rectificar algo, pero quien rectifica son los sistemas de reparación de la propia célula. Algunos de ellos son controlables; puedes dirigirlos más o menos al sitio donde quieres hacer el cambio, que son los basados en homología y tienes que meter la secuencia que quieres que introduzca. Y hay otros que son sistemas de reparación rebeldes, que hacen cambios descontrolados. Eso hace que además del cambio que quieres hacer haga otros.

P: *Al principio no se vieron esos problemas.*

R: Con las herramientas de antes se metían muchísimos errores, se producía el cambio que querías y otros diez más. A veces, las células se morían y no conseguías hacer los cambios que querías. De repente aparece una herramienta que produce el cambio que quieres y tiene muchos menos errores, pero los tiene. A nivel de investigación es fantástico, y para modificar animales y plantas genéticamente, pero a nivel de clínica todavía está muy lejos de

poder hacer una terapia génica. Ahora se está más cerca pero no quiere decir que podamos poner una fecha en la que se vaya a estar aplicando de forma masiva.

P: *¿Ni siquiera un orden de magnitud?*

R: Yo diría que menos de 10 años para algunas enfermedades, pero dentro de mi ignorancia, porque yo soy microbiólogo y trabajo con células procariotas, nada que ver con las eucariotas, que son mucho más complicadas. Pero también desde la microbiología se pueden buscar aplicaciones en salud, como en las enfermedades infecciosas. Algunas de ellas se producen por la infección de una bacteria normal por un virus que convierte en patógena a la bacteria, como ocurre con el botulismo, el tétanos, la difteria y otras. Mediante CRISPR se podría conferir inmunidad a esas bacterias.

P: *¿Se han hecho ya experimentos en humanos?*

R: En 2015 se hicieron los primeros ensayos clínicos, y luego en 2016, 2017... Todos eran en China y no sabemos nada de los resultados. Eran con enfermos terminales de cáncer y si hubiera funcionado habría salido. En 2018 y 2019 empezaron ensayos clínicos en EE UU y Europa para cáncer y enfermedades de la sangre, como la anemia falciforme y la talasemia. Lo único que pretenden ver es si la técnica es segura, no si tiene efecto terapéutico. Están en fase 1. De estos se empiezan a tener resultados. Hay que hacer las cosas bien y contar con las autorizaciones pertinentes, revisiones de los comités de ética etc. Los anteriores eran precipitados.

P: *En China han nacido ya incluso niños cuyo ADN había sido editado con CRISPR.*

R: Por lo menos tres, unas mellizas, luego un tercero y se rumorea que había algún otro.

P: *¿Tenemos criterios éticos adecuados a CRISPR en la legislación actual?*

R: Hay que revisarlos. La posibilidad de modificar genéticamente seres vivos

GUSTAVO MORÁN / WIKIMEDIA

Salinas de Santa Pola.

Un sistema inmune para bacterias

A principios de los años 90, Francisco Martínez Mojica estaba haciendo su tesis doctoral sobre un microorganismo, la arquea *Haloferax mediterranei*, que vive en ambientes de mucha salinidad; en concreto, en las salinas de Santa Pola. Mientras secuenciaba su ADN, descubrió que contenía secuencias de bases (las letras con las que se escribe el ADN) que se repetían a intervalos regulares y que estas repeticiones eran palindrómicas; es decir, se leían igual de izquierda a derecha que al revés. Consciente de que aquella estructura tan regular debía cumplir una función, se propuso investigar a fondo el tema.

Secuenciando el ADN de otras bacterias y buscando en las publicaciones de la época otras secuencias, descubrió que otras bacterias también tenían ese tipo de repeticiones. Un día descubrió, y esta fue la pista clave, que la secuencia, llamada después espaciador, que estaba entre las repeticiones de una *Escherichia coli* era idéntica a la de un virus que infectaba a esas bacterias y que las que tenían esa secuencia pertenecían a cepas resistentes al virus. "Empezamos a mirar posibles coincidencias de otros espaciadores de diferentes bacterias, hasta 4.500, y apareció un caso semejante en *Streptococcus* y luego otro en *Methanobacerium* y luego otro más, y poco a poco fueron saliendo nuevos ejemplos", explica.

Un día de agosto de 2003 comprendió que aquel complejo de repeticiones y espaciadores era una especie de sistema inmune bacteriano adquirido por contacto previo con el virus. "Me fui a la playa, donde me esperaba mi mujer, y le dije 'he descubierto algo increíble, que algún día aparecerá en los libros de texto y que le valdrá un Nobel a quien lo demuestre". Y a tratar de demostrar su intuición dedicó los siguientes años, aunque con escasa fortuna, por trabajar con una bacteria que tenía el sistema CRISPR reprimido. Pese a ello, consiguió ser el primero en publicar su idea y fue quien dio nombre a esta tecnología.

Luego se comprobó que la forma en que el sistema se deshacía de los virus a los que la bacteria era inmune era mediante una proteína relacionada con el sistema CRISPR, denominada Cas, que es una especie de tijera molecular que trocea el virus. Hay muchas proteínas Cas, pero la que más se utiliza es la denominada Cas9. Por eso, la aplicación de edición genética emplea ambas partes, los espaciadores y esta proteína, por lo que se denomina CRISPR/Cas9.

NURIA CHAMORRO

Francis Mojica e Ignacio Fernández Bayo durante la entrevista.

Pionero de una revolución

Francisco Juan Martínez Mojica (Elche, 1963), más conocido como Francis Mojica, se licenció en Biología por la Universidad de Valencia en 1986 y se doctoró en Biotecnología en 1993 en la Universidad de Alicante. Su carrera profesional ha estado vinculada principalmente al Departamento de Fisiología, Genética y Microbiología de esta última universidad, donde ocupó diferentes posiciones hasta conseguir la de profesor titular en abril de 1997. Ha realizado estancias de investigación en Francia (Institut de Genétique et Microbiologíe. Université Paris-Sud), Estados Unidos (Department of Biology. University of Utah en Salt Lake City) y Reino Unido (Nuffield Department of Clinical Biochemistry, Institute of Molecular Medicine, University of Oxford). Ha sido subdirector, director y secretario de su Departamento. Ha publicado numerosos artículos científicos entre los que destacan los dedicados al sistema CRISPR, algunos de ellos pioneros en el desarrollo inicial de esta herramienta, considerada la clave de una revolución genética en ciernes, y en el descubrimiento de su papel como sistema de inmunidad adquirida por bacterias y arqueas frente a los virus que las infectan.

se tiene desde hace un par de décadas, pero entonces no era preocupante porque no era tan accesible como ahora modificar seres humanos. El problema ético surge si se están cruzando algunas líneas rojas al hacer una modificación de embriones o de células germinales preembrionarias, para que ese individuo tenga una descendencia también modificada genéticamente. Creo que no hay ningún problema ético en usarlo en un adulto para curarle una enfermedad, pero es más discutible si se están generando en sus líneas de descendencia. Puede haber muchas opiniones que varíen en matices, pero la modificación genética de embriones ahora mismo no está justificada, como mínimo por cuestiones de seguridad. Partiendo de ahí habrá que plantearse en algún momento, cuando la técnica sea segura, si se usa o si se evita que la modificación pase a sus descendientes.

P: *¿Puede CRISPR ayudar en la lucha contra el coronavirus que provoca la covid-19?*

R: Estoy convencido de que hay gente que está haciendo todo lo que se puede hacer contra el coronavirus, incluyendo el uso de esta herramienta, pero no sé ni quienes, ni cómo, ni dónde. El otro día vi que ya habían desarrollado un método de diagnóstico para detectar este y otros virus. Hasta ahora se hace con PCR. Con CRISPR se podrían modificar linfocitos B, los que producen nuestros anticuerpos para microorganismos que no inducían la formación de anticuerpos. Es una especie de vacunación y eso en principio se podría hacer con CRISPR para este caso.

P: *¿Cómo se podría hacer?*

R: Se extraen leucocitos, se les modifica con CRISPR y se reinyectan. Eso para generar inmunidad frente al microorganismo. Eso se podría hacer, pero hay que tener muy claro cuáles son los componentes del virus que podrían provocar de forma eficaz esa respuesta.

P: *¿En que está trabajando ahora?*

R: Sigo haciendo investigación básica con CRISPR, intentando encontrar nuevos sistemas CRISPR/Cas para desarrollar mejores herramientas. Hay una enorme variedad de sistemas. Los hay que no solo cogen nuevos espaciadores de ADN sino de ARN, que cortan también ARN y otros que no cortan ADN sino solo ARN; sistemas que no son inmunes, sino que regulan la expresión génica del propio huésped... y dices ¡madre mía! ¿esto qué es? viendo la diversidad de sistemas que hay. Cada 5 años se publica una revisión de la clasificación de los sistemas CRISPR y la última acaba de salir hace unas semanas; y cada vez son muchos más y más diversos. Hay mucho por explorar y por descubrir y nosotros, inocentes que somos, tenemos la pretensión de encontrar algún sistema que sea distinto de los que hay.

P: *Hay muchos, pero parece que todo está enfocado al Cas9...*

R: Me lo preguntan mucho y he tenido que mirar por qué, y es simplemente que Cas9 fue la proteína que se propuso, en el 2012, como la herramienta de edición genética, gracias a que identificaron los componentes de un sistema de CRISPR que era el que tenía Cas9 para llevar a cabo un corte programable. Luego surgieron otros sistemas que tienen análogos, proteínas que hacen lo mismo con un gen distinto, que incluso funcionan mejor para algunas cosas, como Cas12a, Cas12b, Cas13 y Cas14... y estamos esperando los siguientes, pero fue la primera y por eso es la que se utiliza. Hubo un momento en que se llegó a hablar de 45 familias de proteínas distintas. Ahora no hay tantas, no llegan a 20, creo.

> *"Hay que revisar los criterios éticos de la legislación actual para adaptarlos a CRISPR"*

P: *¿Y cómo buscan nuevos sistemas CRISPR/Cas?*

R: Tomamos muestras ambientales, de agua principalmente, extraemos todo el ADN después de filtrar y purificar para eliminar eucariotas, nos quedamos con el ADN de bacterias y con la parte vírica; hacemos metagenómica, secuenciación de todo eso, y buscamos sistemas CRISPR intentando que nos ilumine la Virgen porque eso mismo lo están haciendo todos los grandes centros de secuenciación del mundo.

P: *¿Cuál es el objetivo?*

R: El objetivo es tener mucha suerte, que nadie haya secuenciado los ambientes que estamos secuenciando y por

Francisco Martínez Mojica recibe el premio Rey Jaime I de Investigación Básica.

FUNDACIÓN PREMIOS REI JAUME I

Isótopos en genética

Dentro del campo de la genética, las llamadas técnicas isotópicas son muy utilizadas para la detección y cuantificación de una molécula de interés. Funcionan como marcadores, o etiquetas, que nos permiten detectar o seguir el recorrido de la molécula. Las técnicas que hacen uso de ellos consisten en sustituir uno o más átomos de dicha molécula por otro átomo del mismo elemento químico, pero de un isótopo diferente y radiactivo, de forma que la reactividad química y la función biológica de los compuestos marcados no se vea alterada. Después, el radioisótopo es localizado mediante algún método de detección. Particularmente, cuando se trabaja con ácidos nucleicos, el método más utilizado suele ser la autorradiografía, basada en la capacidad de la radioactividad para impresionar una placa fotográfica, de manera que esta propiedad puede emplearse para seguir el destino del compuesto radioactivo y por consiguiente, el de la molécula marcada. Estas técnicas permiten la detección de moléculas en cantidades muy inferiores a las que se pueden detectar mediante métodos químicos de análisis, y son mucho más sensibles y eficientes que aquellas que utilizan métodos alternativos a la radiactividad.

Francisco Mojica explica que "en mi tesis utilicé isótopos radioactivos continuamente. Hacíamos *northerns* y *southerns* (técnicas de hibridación de ARN Y ADN respectivamente). Durante mi postdoc hacíamos secuenciaciones con fósforo 32 todos los días". Según cuenta, cuando parte de la Universidad de Alicante pasó a ser de la Miguel Hernández se quedó sin la Unidad de Isótopos Radiactivos. "Estuvimos solicitando una unidad de isótopos durante años y se consiguió, por fin, hace tres, pero ya nos hemos adaptado a usar dioxigenina, que produce luz, pero nada que ver. Las hibridaciones con radioactivos salen más limpias, se mide mucho mejor, son mucho más sensibles… Lo que hago ahora es llamar a algún colaborador en una universidad que utilicen radioisótopos cuando los necesito". Y termina expresando enfáticamente, sobre las fuentes radiactivas: "¡Cómo las echo de menos!". ■ *Nuria Chamorro*

eso buscamos en zonas locales. Hay secuenciaciones y metagenomas ya de casi todos los tipos de ambientes; por lo tanto, la esperanza de encontrar algo nuevo, que no esté ya en manos de algún otro grupo, es muy remota, aunque sí que estamos encontrando algo. La gente se deja llevar por modas y por lo que es fácil de encontrar. Nosotros lo que tratamos de hacer es poner más imaginación y arriesgar más que los demás, y aplicar criterios distintos a los que aplican los demás. Casi todo el mundo lo que hace es buscar secuencias que se parezcan a Cas9 y a partir de ahí buscar una variante distinta. Nosotros vamos más allá, a ver si hay algo que recuerde a los sistemas CRISPR-Cas que sea distinto.

P: *¿Y en aplicaciones?*

R: La idea es precisamente encontrar algún sistema que ofrezca ventajas. Por ejemplo, Cas9 es una proteína muy grande y eso a la hora de administrarla con un vector vírico a una célula eucariota o un organismo, está muy limitado porque no puedes meter cualquier cantidad de ADN dentro de un virus. Cas9 está más o menos en el límite, y si además tienes que meterle las guías, un molde para que vaya donde tiene que ir etcétera hay un problema. Disminuir el tamaño de la proteína tiene muchas ventajas. Si encontramos alguna análoga a Cas9 que sea pequeñita mejoraría mucho el desarrollo de una tecnología equivalente con todas sus aplicaciones. Luego se están descubriendo muchos otros sistemas, aparte de Cas9, que se pueden utilizar y ya se están utilizando para diagnóstico molecular, para detectar ARN o ADN, mediante tiritas de papel u otros sistemas.

> *"Intentamos encontrar sistemas alternativos a Cas9 que ofrezcan ventajas, como un tamaño más pequeño"*

P: *Sigue siendo investigación básica que otros aprovecharán ¿no?*

R: Bueno, me dicen a veces que soy tonto, por generar conocimiento para que otros lo aprovechen. Lo ideal es generar conocimiento y aprovecharlo uno mismo. Yo sinceramente no es mi pretensión, pero tampoco estaría mal. Si sale algo nuevo lo que haré es patentarlo, como hace todo el mundo y luego intentaré desarrollar o poner a punto alguna herramienta derivada de eso.

P: *¿Tiene ya alguna patente?*

R: Patenté un sistema para detectar cuando una bacteria adquiere un nuevo espaciador. No pensé que sirviera más que para investigación; luego surgieron esas estrategias para utilizar CRISPR como sensor o grabadora y podría tener aplicación, pero nadie ha mostrado mucho interés todavía.

El sistema ya se está utilizando en España

PET+RM, una revolucionaria alianza

Sin necesidad de desarrollar una nueva tecnología emerge una pequeña revolución en el ámbito de la imagen diagnóstica en medicina. Se trata de una nueva vuelta a la clásica tomografía por emisión de positrones (PET), que esta vez incorpora una resonancia magnética (RM) a la ecuación. Las ventajas respecto a la combinación PET-TAC habitual incluyen la comodidad de poder hacer dos pruebas de forma simultánea y reducir la dosis de radiación que recibe el paciente hasta en un 50 %. En su contra juegan el prohibitivo precio del equipo y la falta de bibliografía, que limitan su uso.

■ Texto: **Sergio Ferrer** | Periodista científico ■

Un grupo de expertos visitando la instalación PET-RM de Cetir.

La tomografía por emisión de positrones (PET, por sus siglas en inglés) supuso una revolución para el campo de la medicina nuclear desde que se introdujera en España hace casi dos décadas. En los últimos años, se ha fusionado a otros equipos, como la tomografía axial computerizada (TAC) y la resonancia magnética (RM). Estos equipos multimodales combinan las ventajas de ambas tecnologías para mejorar el diagnóstico y manejo del paciente.

"El PET es una prueba de medicina nuclear que consiste en inyectar una sustancia radioactiva para observar un proceso biológico o patológico del organismo", resume el médico nuclear de Cetir (Barcelona) José Ramón García Garzón. Esta sustancia suele ser fluorodesoxiglucosa marcada con flúor 18, un emisor de positrones que da nombre a la técnica. Para economizar: 18F-FDG.

La tecnología ofrece imágenes de alta calidad, pero García Garzón explica que su limitación radica en que "no tiene información anatómica ni morfológica". La solución a este problema fue la creación de equipos PET-TAC que combinan ambas imágenes. "Con esto no solo localizamos dónde está el foco hipermetabólico, sino que muchas veces la información morfológica y metabólica se potencian mutuamente".

Dicho avance ha provocado, en los últimos 15 años, la extinción del PET *a secas*: "Ya no existen equipos PET porque el PET-TAC es claramente superior", dice el médico. Son los llamados equipos multimodales, que fusionan técnicas para dar, en una misma exploración, toda la información posible, tanto molecular como anatómica, sobre lo que pasa en el interior del paciente.

La última vuelta de tuerca en este contexto es la combinación del PET con la resonancia magnética tradicional para dar lugar al PET-RM. Esta técnica combina las imágenes anatómicas que aporta la resonancia con los datos bioquímicos del PET. "Es la gran máquina multimodalidad, totalmente integrada, que hace que el diagnóstico sea mucho mejor", asegura la médico nuclear del Hospital HM Puerta del Sur de Madrid Lina García Cañamaque.

El PET-RM nació en 1997 de la mano de Mardsen y Cherry. Sin embargo, la maduración de la tecnología llevó doce años: no fue hasta 2009 cuando Philips desarrolló el primer sistema integrado. En España existen de momento tres equipos PET-RM: los manejados por García

Garzón y García Cañamaque, y el adquirido por el Instituto de Investigación Sanitaria La Fe, el primero localizado en un centro público.

Menos radiación, mayor comodidad

Una de las ventajas principales del PET-RM es la dosis de radiación, que se reduce en un 50 % al eliminar el TAC de la ecuación.

García Cañamaque añade una ventaja secundaria debida a la menor radiación que recibe el paciente: "Es perfecto para los niños, no solo porque la resonancia no emite radiación ionizante, sino porque además el PET les inyecta menos dosis al tener más tiempo de exposición". Esto, asegura, es idóneo para pacientes de temprana edad que, aunque tienen opciones de curarse, deben llevar a cabo una enorme cantidad de pruebas.

Además, en el PET-TAC se hace un análisis primero y luego el otro, y aunque el sistema esté integrado, la adquisición de imágenes no es simultánea. En el caso del PET-RM, todo se hace a la vez. "Es el único equipo híbrido integrado en el que el estudio es sincrónico", aclara García Garzón, "por lo que no hay problemas de corrección ni de movimiento".

Lina García Cañamaque, médico nuclear del Hospital HM Puerta del Sur de Madrid.

García Cañamaque alaba la rapidez derivada de esta "integración absoluta", que hace que los pacientes pierdan "mucho menos tiempo a pesar de que la prueba es más larga" —veinte minutos en el caso del PET-TAC frente a más de media hora en el caso del PET-RM—. Esta aparente paradoja es debida a que se hacen dos pruebas juntas, por lo que se evita que el paciente tenga que ir al hospital en dos ocasiones. "El ciclo diagnóstico es buenísimo: descargas la parte de la resonancia magnética de las listas de espera y, además, para el paciente es más cómodo".

Los equipos PET-RM son de última generación, con una resonancia de 3 Teslas, que supera al estándar de 1,5. "La ventaja del PET-RM es que tienes los dos mejores equipos que existen en el mercado, juntos", dice García Garzón. "La resolución es claramente superior a un PET-TAC convencional", añade, aunque también existen PET-TAC digitales cuya resolución llega a los 4 mm.

La doctora también considera que hay un beneficio que va más allá de la tecnología. "La complejidad de la máquina hace que haya más puntos de vista, y eso es muy bueno y hace que el diagnóstico sea mejor". Se refiere a la unión entre las especialidades de radiología y medicina nuclear que promueve

CETIR

el uso del PET-RM: "Ya no existe el gran médico solitario, nos *peleamos*, damos nuestra opinión, luego los médicos no lo ven claro y vuelven a discutirlo y pasa por otro filtro". El resultado es que aumenta la cantidad de profesionales que intervienen en el proceso. "Ese es el gran progreso de la medicina: la multidisciplinariedad".

Caro y con poca bibliografía

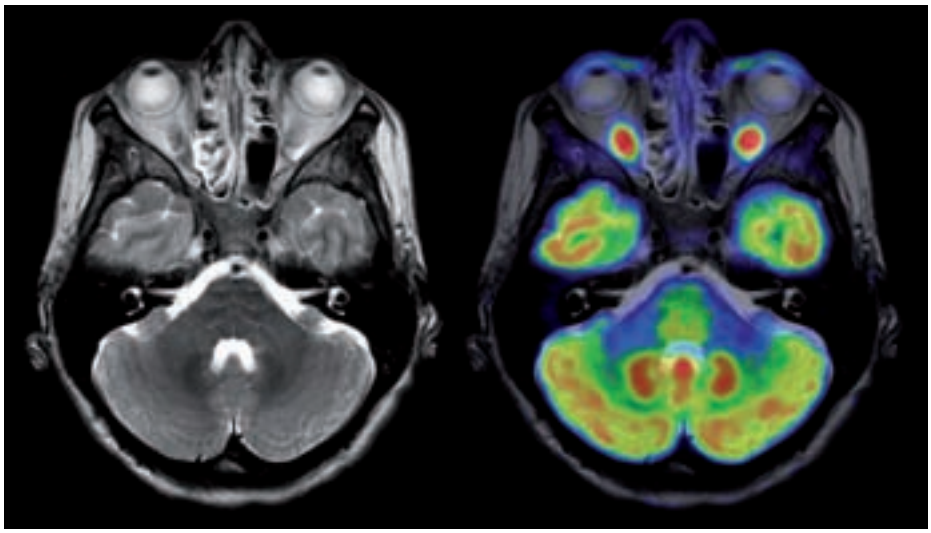
Las numerosas ventajas del PET-RM no lo convierten en el equipo perfecto. Todo paciente que tenga un problema para hacerse una resonancia no se podrá hacer un PET-RM. "Marcapasos, prótesis incompatibles y claustrofobia" son algunas de las limitaciones que, según García Garzón, impedirán realizar la prueba.

Que los equipos PET-RM sean de última generación mejora el diagnóstico de los pacientes, pero se convierte en un inconveniente si miramos la factura. Es una máquina cara, cuyo precio triplica al de un PET-TAC digital. Esto repercute en la capacidad de los centros para adquirir la tecnología, así como en el coste de cada prueba.

Otra consecuencia de su novedad es la falta de bibliografía oficial. "Las indicaciones no están establecidas, como pasó con el PET-TAC, y las guías tardarán mucho en establecerse", explica García Garzón, que considera que en época de crisis estos tiempos se dilatarán aún más.

El PET-RM de Cetir funciona desde hace un año, y García Garzón asegura que ya han llevado a congresos algunos de los resultados obtenidos. "Tenemos ya cien casos de tumores de próstata y las tasas de detección son superiores a las del PET-TAC, como era de esperar". Dichos resultados todavía no han sido publicados en revistas especializadas, pero el médico considera que es cuestión de tiempo.

Ese es el motivo por el que la Fe de Valencia ha adquirido este año un equipo PET-RM con fondos europeos para investigación, lo que lo convierte en el primer hospital público en tener uno de



GENERAL ELECTRIC HEALTHCARE

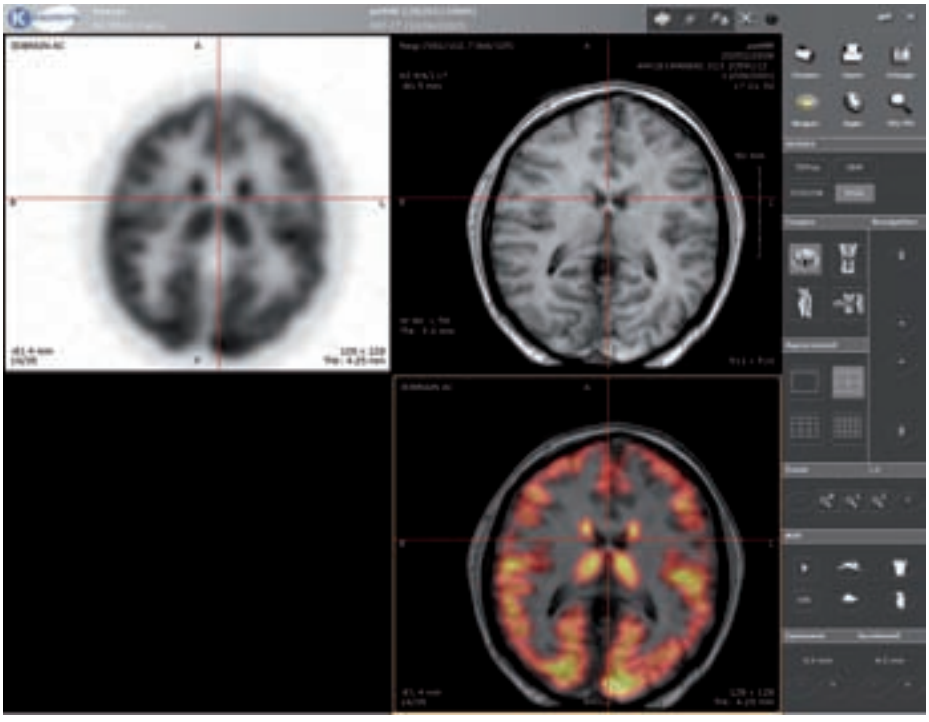
Imágenes obtenidas con SIGNA PET-MR.

El problema de la atenuación y las secuencias Dixon

Una limitación del PET original es que la radiación se frena por el peso del cuerpo, por lo que las estructuras internas se ven peor que la piel y los pulmones, que están llenos de aire. García Garzón explica que esto se solucionaba mediante "unas fuentes para hacer la corrección de atenuación". Con la llegada del PET-TAC se pudo llevar a cabo esta corrección. "A través del mapa de transmisión que es el TAC se puede corregir la atenuación y ver todo el organismo de la misma manera", continúa.

Los equipos PET-RM carecen de TAC, por lo que la corrección de atenuación vuelve a ser un problema que la resonancia no puede solucionar. Por suerte, los físicos han venido al rescate. "Se *inventaron* una secuencia de resonancia, la secuencia Dixon, que permite segmentar los diferentes tejidos", añade García Garzón. Gracias a este *pseudo-TAC* es posible ver "aire, agua y partes blandas". En el caso del hueso, la corrección se lleva a cabo con mapas anatómicos, pero el médico asegura que "todavía está en progreso y tiene que mejorar". En este caso, la calidad no es suficiente como para obtener una imagen, pero sí para el seguimiento del paciente.

estos dispositivos. El director del área de imagen médica del hospital, Luis Martí Bonmatí, explica que su objetivo es "generar proyectos para comparar, con una metodología científica, la rentabilidad diagnóstica de la tecnología".



En la parte superior se ven las imágenes obtenidas con cada una de las tecnologías. La inferior es la imagen conjunta.

De momento, Martí y su equipo están utilizando el PET-RM para neurología y oncología, pero incorporarán también cardiología. "Queremos estudiar grupos de pacientes y compararlo con la metodología estándar para analizar el beneficio de su utilización y determinar si da más información y en menos tiempo".

"El equipo es caro y creo que hay que demostrar mucho su utilidad frente a tener un PET-TAC y una resonancia magnética, con los que haces el doble de estudios", añade Martí. "No es un equipo para todos los hospitales a día de hoy". Es algo con lo que coinciden todos los entrevistados para este artículo: un servicio de medicina nuclear es algo muy especializado y el PET-RM es un equipo muy específico, aunque confían que en el futuro el número de máquinas aumente en España.

En este sentido, García Cañamero defiende la necesidad de "utilizar mejor las máquinas" para disminuir los costes. "Cuando haces un PET a un paciente y le mandas una ampliación de esa prueba, se demora otra semana; por eso los médicos piden todo junto, aunque la mitad de las veces no haga falta. Con el PET-RM estás pendiente de una sola prueba; normalmente no hace falta más".

García Garzón coincide en que hay que saber medir los costes. "Tenemos dos pruebas muy sensibles juntas, por lo que vamos a encontrar más cosas y aunque encarezcamos el proceso diagnóstico estamos personalizando mucho el tratamiento y, por tanto, ahorrando". Así se evita perder tiempo y dinero con tratamientos que no serían beneficiosos para el paciente.

El mejor amigo de los oncólogos

"Cuando la resonancia es superior al TAC no hay que hacer un PET-TAC sino un PET-RM", resume García Garzón. "Hay indicaciones en las que el TAC no proporciona información adicional y hay

Luis Martí Bonmati con el equipo PET-RAM instalado en el Hospital La Fe de Valencia.

que hacer una resonancia, por lo que tiene todo el sentido del mundo que existan equipos integrados para reducir la dosis de radiación del paciente". A grandes rasgos, sus aplicaciones principales se encuentran en los campos de la oncología, la cardiología y la neurología.

"Sirve para todo lo oncológico, el 80 % del tiempo tenemos la máquina ocupada con oncología", dice García Cañamaque. La doctora asegura que la máquina soluciona muchas dudas gracias a la combinación de PET y resonancia magnética: "Hay lesiones que no se ven con el PET y con la resonancia, que es mucho más sensible, ves que es una metástasis". Por ello considera importante "conocer las limitaciones" de los aparatos.

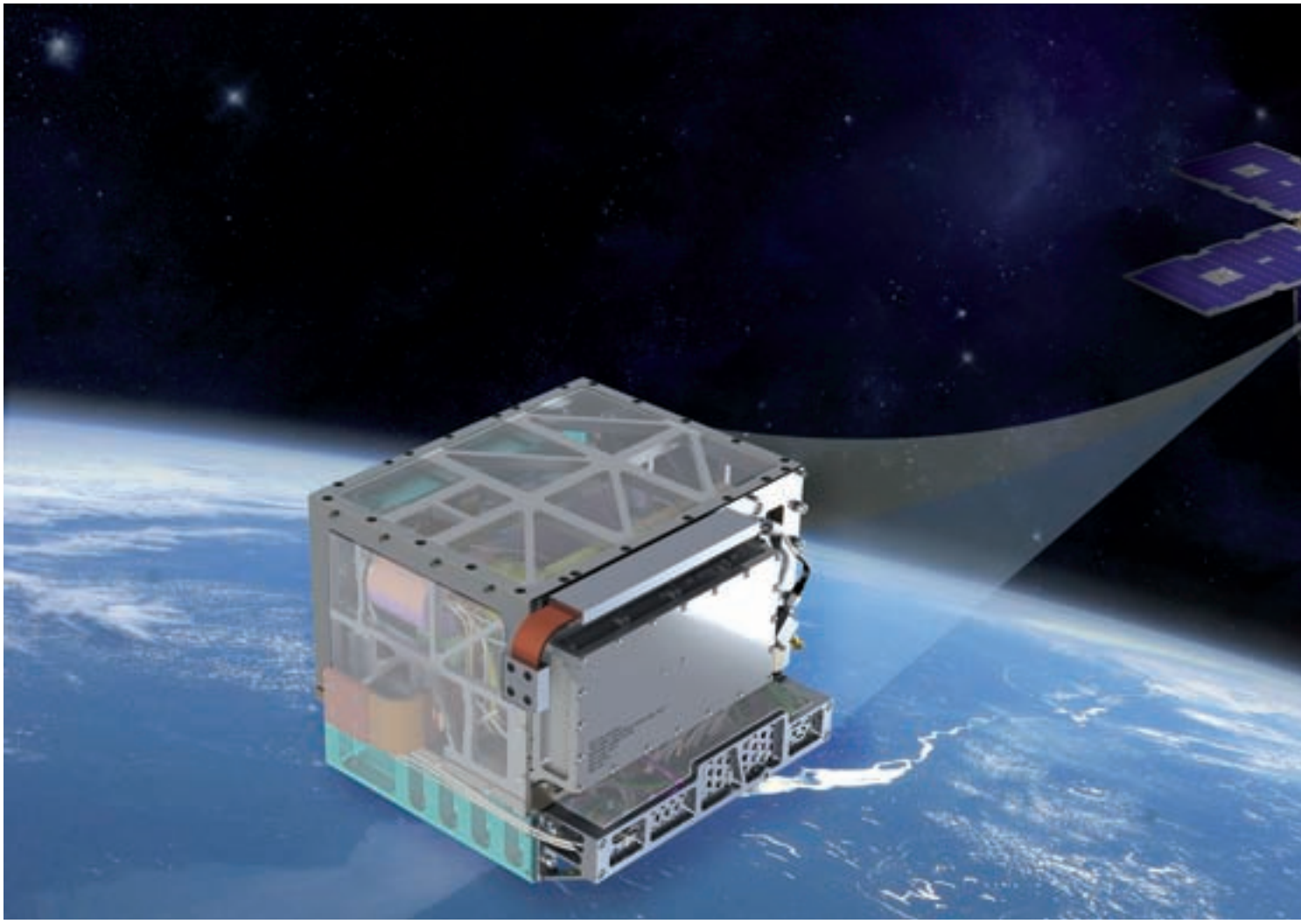
Tumores de cabeza y cuello, pediatría, estudio de órganos como cerebro, hígado y huesos, que tienen poca traducción por TAC... Son algunas de las aplicaciones que enumeran los expertos consultados. También para la estadificación de tumores —nombre que recibe el estudio del estadio de la enfermedad, su gravedad y extensión— como los de mama y próstata.

"Si sospechas que un paciente tiene metástasis óseas es mejor el PET-RM. Hasta ahora se hacía el PET-TAC, que no se veía y había que pasar a la resonancia", asegura García Garzón. El médico apuesta también por otra aplicación: los pacientes con linfoma. "Se les hace un PET inicial, otro a mitad y otro al finalizar el tratamiento", explica. El médico asegura que, al ser pacientes jóvenes, reducir la dosis de radiación es positivo: "La respuesta se valora metabólicamente y para eso se puede hacer una resonancia, no hace falta el TAC".

¿PET-TAC o PET-RM?

Al contrario de lo que pueda parecer, la llegada del PET-RM no implica la jubilación del PET-TAC; no en vano esta última combinación fue considerada como el invento médico del año por la revista Time en el año 2000. "El PET-RM es una máquina disruptiva, superior en muchas ocasiones, pero tiene sus indicaciones. Son pruebas complementarias: si te tienen que hacer una resonancia o un TAC, que te hagan también el PET", dice García Garzón. De hecho, García Cañamaque considera que el PET-TAC debería ser la compra inicial para un servicio de medicina nuclear.

"La integración, de máquinas y de personal de diagnóstico, es el presente", prosigue el médico. "No tiene sentido que el paciente vaya pasando de una máquina a otra. Cuanto más integrada esté la información mejores serán las sinergias que se obtengan de los datos integrados". Por ello defiende que no tiene sentido diferenciar medicina nuclear y radiología: "Es diagnóstico por imagen".



La NASA ensaya en órbita un mini reloj de precisión para dotar de autonomía futuras sondas

Viajes espaciales con precisión atómica

Los relojes atómicos ofrecen la mayor precisión posible, que en los más avanzados llega a un segundo de diferencia cada 3.700 millones de años. En la navegación espacial no hace falta llegar a ese extremo, pero es importante conseguir una elevada precisión, especialmente para desplegar sistemas de posicionamiento global (GPS) en otros planetas y satélites para los robots y los astronautas que los recorran. El reto principal es conseguir reducir su tamaño para poder equipar las naves espaciales y la NASA ha logrado reducirlo hasta el tamaño de una tostadora.

■ Texto: **Alicia Rivera** | Periodista de ciencia ■

La NASA está haciendo pruebas en órbita terrestre de un nuevo reloj atómico que, si funciona bien, abrirá el camino hacia una revolución en la navegación por el espacio profundo, lejos de la Tierra. Incluso permitiría montar sistemas similares al GPS terrestre en órbita de otros planetas facilitando enormemente las labores de exploración. Es el Reloj Atómico de Espacio Profundo (DSAC, por sus siglas en inglés) y, aunque su precisión es apabullante (error de un segundo cada 10 millones de años), no es esta característica lo primero que destacan los especialistas,

NASA

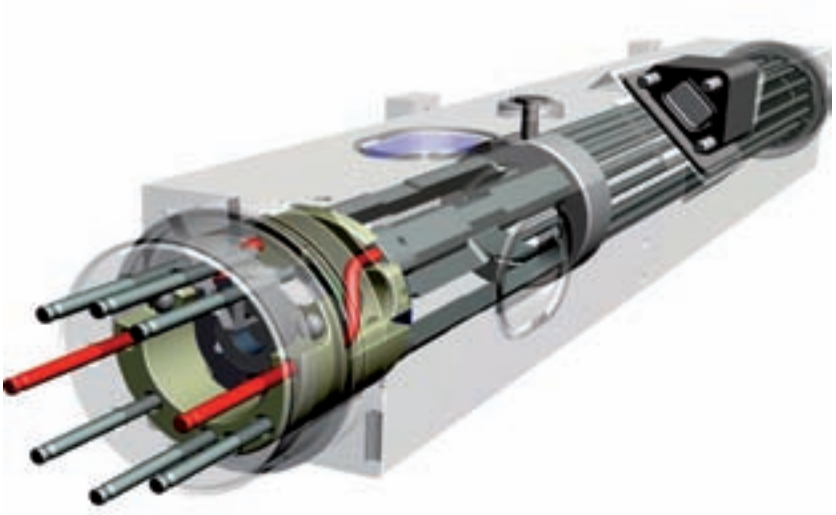
Ilustración del Reloj Atómico de Espacio Profundo DSAC, de la NASA, y el pequeño satélite que lo aloja para los ensayos en órbita.

sino su miniaturización: tiene el tamaño de un tostador de pan casero, cuando los mejores relojes atómicos actualmente son tan grandes como una nevera.

El objetivo del programa es embarcar pequeños relojes atómicos ultraprecisos en naves espaciales, de manera que éstas ganen autonomía respecto a los centros de control terrestre y se faciliten las labores de los astronautas cuando exploren otros planetas. "Es el primer reloj suficientemente estable para trazar la trayectoria de una nave en el espacio profundo a la vez que es suficientemente pequeño para ir a bordo", destaca la NASA. "Cambiará completamente la forma en que navegamos naves espaciales por el espacio profundo", señala Jill Seubrert, investigadora principal adjunta del programa.

El prototipo del DSAC, desarrollado a lo largo de 20 años en el Jet Propulsion Laboratory (JPL, Caltech-NASA), en California, fue colocado en órbita terrestre el 25 de junio de 2019. El 23 de agosto, los responsables de la misión anunciaron que, una vez completada la fase de encendido y comprobación de los sistemas tras el lanzamiento, el DSAC había sido activado; el objetivo de la misión es ver si el reloj se comporta tan bien en las duras condiciones espaciales como en los laboratorios terrestres. En noviembre pasado concluyó con éxito la fase de ensayos y certificación de sistemas y comenzó la operación nominal del DSAC, que durará al menos un año. Por ahora, su funcionamiento está cumpliendo las expectativas, han señalado sus responsables.

"Nuestro objetivo es que se adelante o atrase unos dos nanosegundos [un nanosegundo es una milmillonésima de segundo] o menos al día", señaló Todd Ely, investigador principal del programa. Y añadió: "Creemos que nos acercaremos a unas tres décimas de nanosegundo al día". Las pruebas en órbita "nos dirán mucho acerca de cómo podemos operar con estos relojes durante periodos de tiempo mucho más largos, cuando viajen a sitios a los que puede que se tarden meses, años, o incluso una década en llegar", afirmó Seubert. Si todo va bien, el plan es que estos relojes atómicos compactos se incorporen a los equipos de las naves de exploración espacial en la década de los treinta. Además, servirán para mejorar la precisión de los sistemas de posicionamiento global aquí en la Tierra.



NASA

Esquema del Reloj Atómico de Espacio Profundo (DSAC).

Con 16 kilos, un tamaño de 16 × 27 × 23 centímetros y 44 W de potencia, el DSAC es un reloj atómico de iones de mercurio (la cantidad que lleva cabría en dos latas de atún, afirma la NASA) varios órdenes de magnitud más estable que sus predecesores, a la vez que resulta menos sensible a los campos magnéticos y a los cambios de temperatura. Es unas 50 veces más estable que los relojes que llevan actualmente los satélites de GPS. El

nuevo reloj atómico va instalado en el minisatélite OTB-1 (Orbital Test Bed-1).

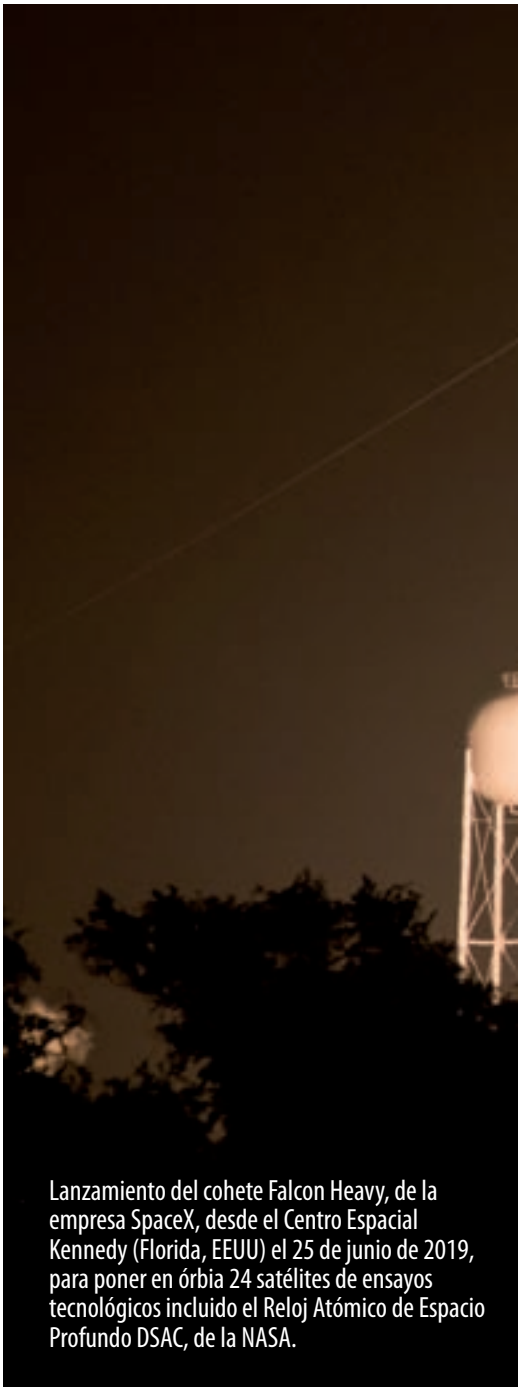
Los relojes atómicos funcionando en la Tierra han sido hasta ahora elementos esenciales en la navegación de la mayoría de los vehículos de exploración en el espacio profundo, es decir, los que van más allá de la Luna. "Actualmente, los responsables de navegación indican a una nave espacial a dónde tienen que ir calculando su posición respecto a la Tierra y enviándole los datos de localización al espacio mediante un sistema de comunicación de doble sentido que puede tardar varios minutos o varias horas en proporcionar la localización", explica la NASA. "Este método de navegación significa que, independientemente de lo lejos que una misión viaje por el Sistema Solar, la nave sigue *atada* a la Tierra, esperando comandos de nuestro planeta". El DSAC permitirá a las naves espaciales saber dónde están exactamente sin depender permanentemente de los datos enviados desde la Tierra, lo que facilitará un alto grado de navegación autónoma.

Actualmente, para guiar una nave de viaje por el espacio se le envían desde la Tierra, con grandes antenas, radioseñales que la nave rebota hacia aquí; con relojes atómicos en el centro de control se mide el tiempo de ida y vuelta de la señal (que viaja a una velocidad conocida, la de la luz) con una precisión de una milmillonésima de segundo y se calcula entonces dónde está el artefacto y qué velocidad y trayectoria lleva; con esos datos se envían las órdenes de navegación a la nave. "Es igual que un eco: si estoy frente a una montaña y doy un grito, cuanto más tarde el eco en volver, más lejos está la montaña", explicó Seubert. Pero los tiempos en el espacio pueden ser enormes –y desesperantes para determinadas maniobras- dadas las grandes distancias en las que se trabaja: en 2012, las radioseñales que envió el robot *Curiosity* desde Marte a la Tierra confirmando que había llegado al suelo del planeta rojo sin percances tardaron 14 minutos (de angustia en el centro de control) en llegarnos, viajando a la velocidad de la luz. El recorrido de las radioseñales a Júpiter ronda la hora y media y a Saturno las dos horas y media.

"La navegación en el espacio profundo exige medir enormes distancias utilizando nuestro conocimiento de cómo se propagan en el espacio las radioseñales", explicó Todd Ely en el JPL. "La navegación rutinaria requiere medidas de distancia con una precisión de un metro o superior y, dado que las radioseñales viajan a la velocidad de la luz, eso significa que necesitamos medir su tiempo de viaje con una precisión de unos pocos nanosegundos. Los relojes atómicos

GENERAL ATOMICS ELECTROMAGNETIC SYSTEMS

Dos expertos ultiman el montaje del Reloj Atómico de Espacio Profundo (ESAC) antes de su lanzamiento.



Lanzamiento del cohete Falcon Heavy, de la empresa SpaceX, desde el Centro Espacial Kennedy (Florida, EEUU) el 25 de junio de 2019, para poner en órbia 24 satélites de ensayos tecnológicos incluido el Reloj Atómico de Espacio Profundo DSAC, de la NASA.

lo vienen haciendo de modo rutinario en la superficie terrestre desde hace décadas, pero con el DSAC se trata de hacerlo en el espacio".

El DSAC puede eliminar ese sistema de doble sentido Tierra/nave en la navegación por el espacio profundo, siempre y cuando sea suficientemente preciso (y pequeño y resistente para viajar en una nave espacial). Es lo que se está probando con el prototipo. "Al igual que sus primos terrestres, el DSAC a bordo de una nave puede medir el tiempo que tarda en llegar hasta ella la señal que le envían desde la Tierra para calcular a bordo su posición y trayectoria", detallan los expertos de la NASA, de manera que puede controlar autónomamente su navegación. Eric Burton, responsable del desarrollo del DSAC, junto con el físico Robert Tjoelker y John Prestage, han creado el reloj atómico de iones de mercurio que debe mantener su estabilidad en el espacio igual que los voluminosos relojes atómicos en la Tierra. La cuestión ahora es comprobar que efectivamente permanece estable en condiciones de vuelo orbital prolongado.

Además, una misma señal enviada al espacio puede ser recibida por varias naves espaciales a la vez para que cada una

NASA/JOEL KOWSKY

determine sus parámetros de viaje, lo que aligerará enormemente las labores de control en la Tierra, que ahora exigen cálculos específicos para cada misión (casi una treintena de naves controla actualmente la Red de Espacio Profundo –DSN– de la NASA), abaratando los costes de operación de las misiones al tiempo que se incrementa la recepción de datos científicos.

No cabe embarcar en una nave espacial un reloj atómico ultrapreciso como los que funcionan en la Tierra, no solo por su gran tamaño y peso (dos parámetros que, junto con el consumo energético, condicionan cualquier artefacto o instrumento que se envía al espacio), sino porque difícilmente soportaría la radiación, las condiciones extremas de temperatura y las vibraciones que sufre todo satélite o nave en un cohete en el lanzamiento. De ahí el interés en la miniaturización al ensayar el prototipo del DSAC en condiciones reales de vuelo espacial.

Pero sí que funcionan relojes atómicos en el espacio de forma rutinaria. Los satélites del GPS estadounidense (o del Galileo europeo), por ejemplo, llevan relojes que permiten calcular por triangulación la posición de un receptor midiendo los tiempos que tardan las señales en llegarle. Son dispositivos adecuados para distancias moderadas (en términos espaciales), como las del entorno terrestre. Pero los relojes de los sistemas de posicionamiento global, aun siendo tan precisos que deben ser corregidos para tener en cuenta el efecto de la gravedad por su efecto en el espacio/tiempo, no son suficientemente exactos para naves espaciales en el espacio profundo, "cuando un retraso o adelanto de menos de un segundo puede significar perder un planeta por muchos kilómetros", señalan los expertos. Por ahora, las naves que se van más allá de una órbita terrestre no llevan relojes atómicos para guiar su dirección.

"El DSAC tiene una tolerancia a la radiación similar a la de los relojes atómicos de rubidio del sistema GPS", afirmó Ely. El programa contempla el desarrollo de generaciones sucesivas del reloj atómico tras la validación del prototipo. Así, explicó el jefe del proyecto, una segunda generación rondará los 10 kilos o menos y exigirá menos potencia (menos de 40 W).

El prototipo del DSAC fue lanzado al espacio en un cohete Falcon Heavy (de la empresa Space X) desde el Centro Espacial Kennedy, en Florida (EEUU). Dos docenas de artefactos de ensayos tecnológicos en el espacio iban a bordo, incluidos cuatro de la NASA: uno para

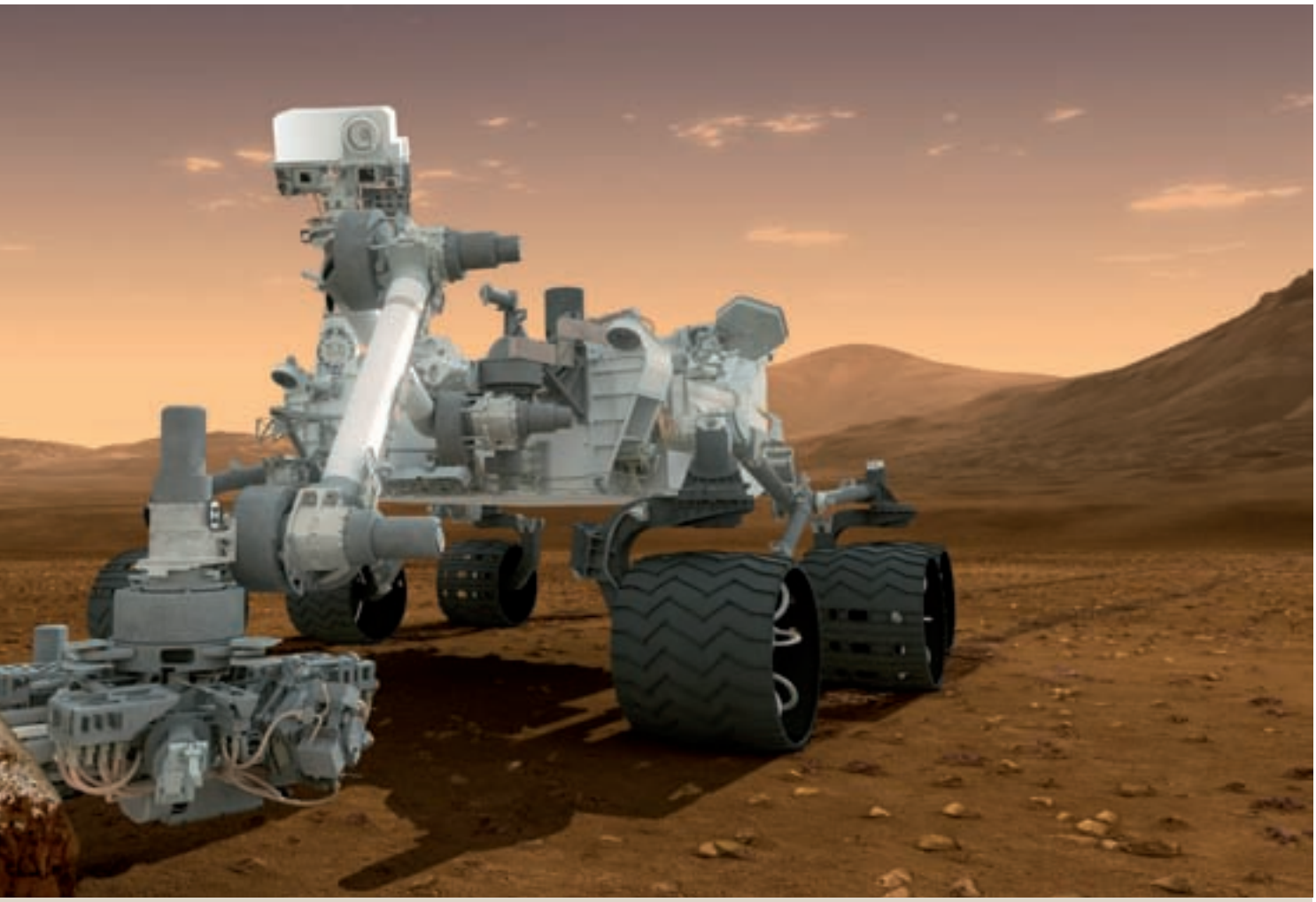
GENERAL ATOMICS ELECTROMAGNETIC SYSTEMS

Ilustración del Reloj Atómico de Espacio Profundo DSAC, de la NASA, en órbita terrestre para realizar pruebas.

El robot Curiosity en Marte.

Un GPS en Marte

"Imagínense una astronauta recorriendo Marte, tal vez con el Monte Olimpus al fondo, y que pueda consultar la edición marciana de Google Maps para ver dónde está", explica Jill Seubert, investigadora principal adjunta del programa Reloj Atómico de Espacio Profundo (DSAC). Con un sistema que permita su localización exacta, los astronautas podrán realizar maniobras precisas y reaccionar más rápidamente ante situaciones inesperadas que esperando los datos que se envíen desde la Tierra, señalan los expertos. "En otros mundos, los satélites utilizarían sus DSAC de a bordo



NASA

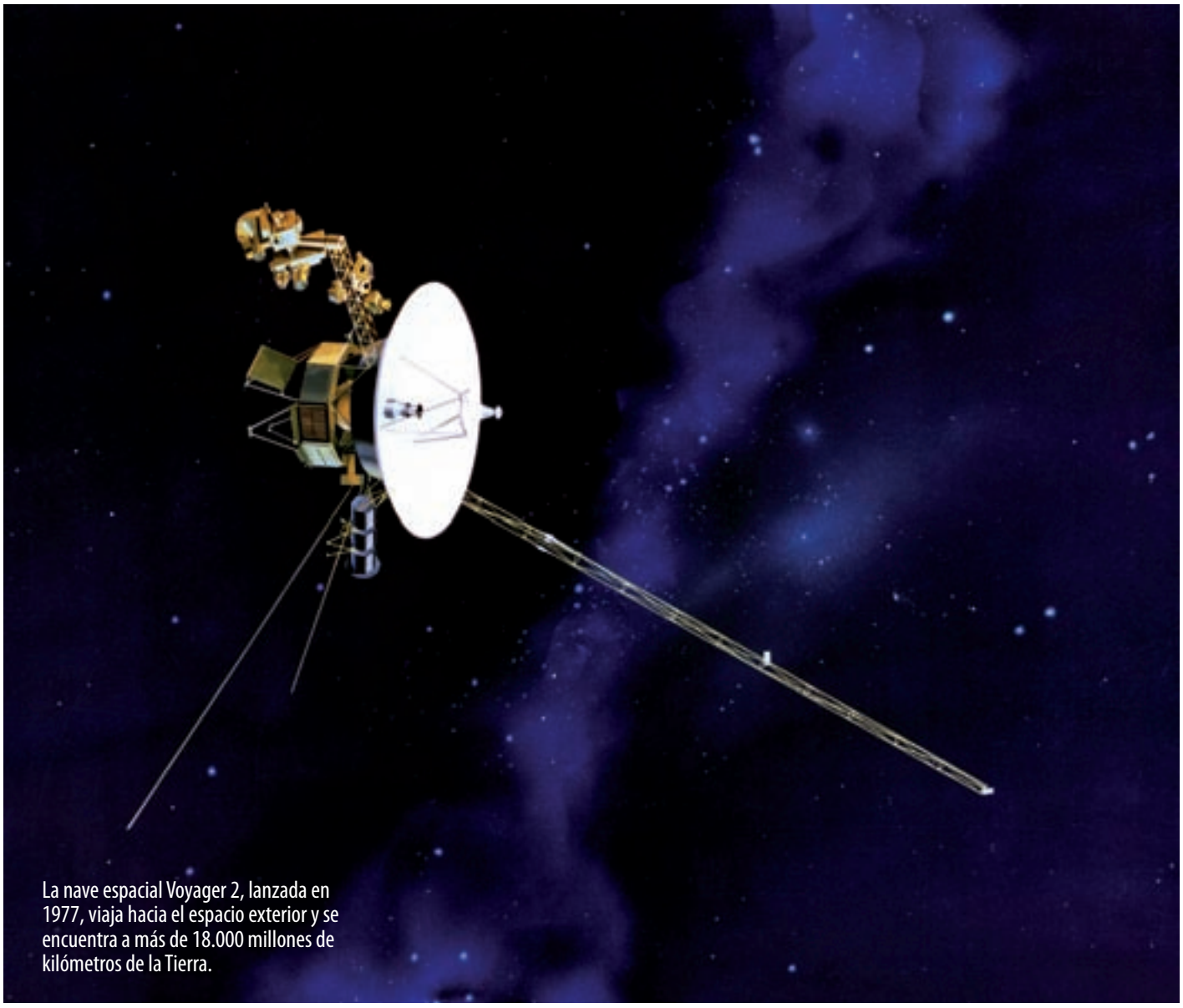
para emitir señales con tiempos precisos que podrían ser utilizados por cualquier receptor de GPS para triangular su posición", explicaba María Temming, de *Science News*, antes del lanzamiento del DSAC.

"Si múltiples DSAC estuvieran en órbita de Marte, por ejemplo, podrían constituir una red del tipo GPS capaz de proporcionar indicaciones a los humanos y a los robots en la superficie del planeta", señalaba David Grossman en *Popular Mechanics*, citando a Eric Burt, responsable del desarrollo del reloj de iones de mercurio: "Una forma de verlo es como si tuviéramos un GPS en otros planetas".

Pero los relojes atómicos en otros planetas no sólo facilitarían enormemente las actividades allí, sino que los viajes hasta esos destinos se beneficiarían de la capacidad de navegación autónoma de las naves. "¿Cómo pueden los astronautas alejarse de la Tierra si no tienen un control inmediato de su viaje? ¿Y cómo pueden aterrizar con precisión en otro planeta cuando hay unos retrasos de las señales que afectan a la rapidez con la que pueden ajustar su trayectoria en la atmósfera de otro mundo?", se plantean los expertos de la NASA.

"Si el DSAC funciona como se espera durante las actuales pruebas, puede allanar el camino hacia una forma de navegación en la que los astronautas se guíen por un sistema tipo GPS en la superficie de la Luna y que puedan volar con seguridad en las misiones a Marte y más allá". El control de la navegación a bordo permitirá realizar operaciones eficaces y rápidas, así como maniobras precisas y ajustes antes situaciones inesperadas, destaca la NASA, "lo que permitirá a los astronautas centrarse en los objetivos de la misión cuando estén en la Luna o más allá".

Las ventajas de la ultraprecisión en el espacio no se limitan a la navegación autónoma y la posibilidad de localización exacta de los astronautas en otros mundos. También se beneficiará de las prestaciones de un reloj atómico como el DSAC la investigación en diferentes áreas de radio-ciencia, como el estudio de los campos gravitatorios y las atmósferas de otros planetas.



NASA

La nave espacial Voyager 2, lanzada en 1977, viaja hacia el espacio exterior y se encuentra a más de 18.000 millones de kilómetros de la Tierra.

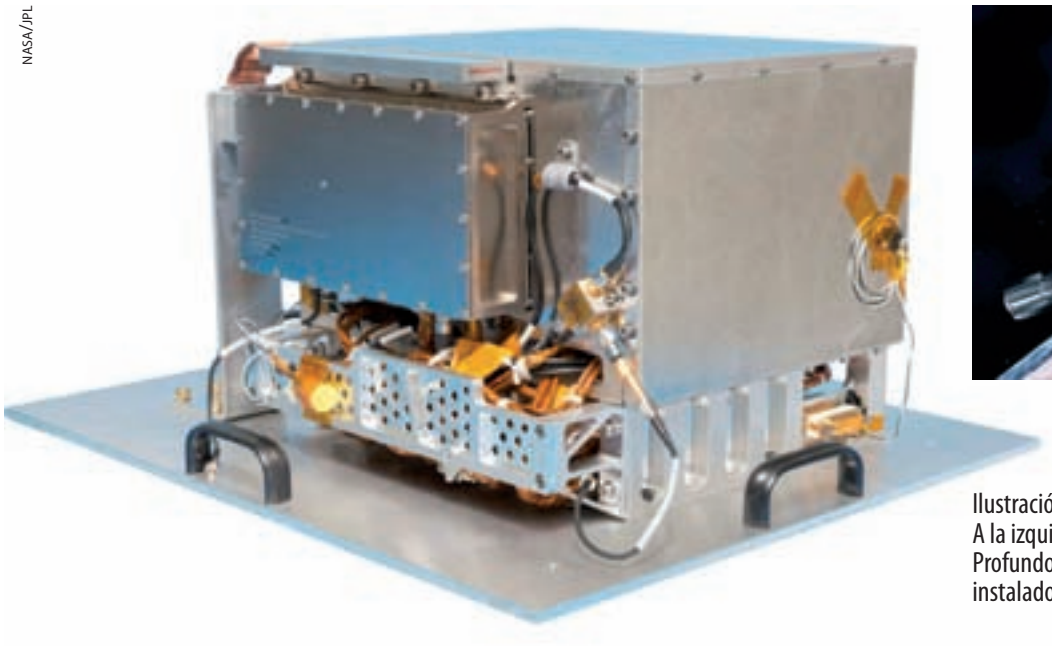
probar un nuevo combustible no tóxico para pequeños satélites, otro para hacer mediciones de partículas cargadas en la alta atmósfera terrestre y otro sobre protección de naves espaciales frente a la radiación y mitigación de sus impactos, además del DSAC. El reloj atómico va en la plataforma orbital de ensayos OTB-1 (proporcionado por la empresa General Atomics Electromagnetic Systems), que se situó en órbita baja terrestre a 720 kilómetros de altura.

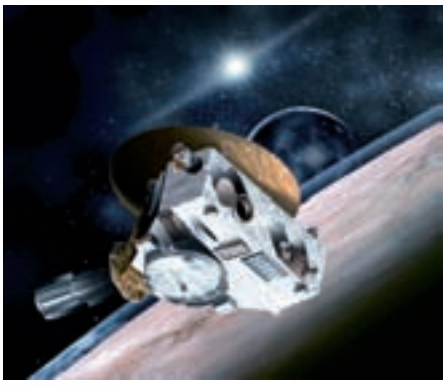
El DSAC utiliza iones de mercurio, en lugar de los relojes de átomos neutros de rubidio del sistema GPS actual. También llevan dos relojes atómicos de rubidio, más dos de máseres de hidrógeno, cada uno de los satélites del sistema Galileo europeo, equipos que dieron no pocos quebraderos de cabeza a sus responsables hace un par de años al fallar varios de ellos en órbita, debido a cortocircuitos producidos en uno de sus componentes, aunque no supusieron merma de prestaciones a los usuarios dada la redundancia de los relojes en cada satélite, según informó la Agencia Europea del Espacio (ESA).

A diferencia de los átomos neutros, los iones de mercurio, al estar eléctricamente cargados, quedan atrapados mediante campos eléctricos, con lo que se evita la interacción con las paredes del contenedor, como sucede en los de rubidio, provocando desajustes que exigen un par de correcciones diarias desde Tierra en el sistema GPS actual, explicó Ely, según *Space News*. Con el nuevo reloj atómico, "esas correcciones, en lugar de días, serán necesarias en semanas, si no en meses", añadió.

Estamos acostumbrados a los relojes de cuarzo, dispositivos basados en el hecho de que, cuando se les aplica un voltaje, los cristales de cuarzo vibran

NASA/JPL





NASA

Ilustración del PlutoFlyby-NewHorizons. A la izquierda, el Reloj Atómico de Espacio Profundo DSAC, de la NASA, antes de ser instalado en el satélite de ensayos en órbita.

con una frecuencia precisa, explican los expertos del JPL. Esas vibraciones de los cristales hacen el trabajo del *péndulo* de los antiguos relojes. Pero los relojes de cuarzo no son suficientemente estables para las necesidades de la navegación espacial ya que, en apenas una hora, incluso los mejores aparatos pueden desviarse hasta un nanosegundo (una milmillonésima de segundo). Esto significa que, en un viaje espacial, en seis semanas el reloj puede estar desajustado en una milésima de segundo, lo que supondría un error de 300 kilómetros a la hora de determinar la posición de una nave espacial desplazándose a gran velocidad.

"Los relojes atómicos combinan la oscilación de los cristales de cuarzo con un conjunto de átomos para lograr mayor estabilidad", señala la NASA, recalcando que el DSAC está diseñado para desajustarse menos de un nanosegundo en cuatro días y menos de un microsegundo (una millonésima de segundo) cada 10 millones de años.

El truco de los relojes atómicos reside en que los átomos están formados por un núcleo (protones y neutrones) rodeado de capas (a menudo denominadas *órbitas*) de electrones con niveles exactos de energía. Un electrón puede saltar de una capa a la siguiente si se le aplica la cantidad exacta de energía necesaria, por ejemplo, mediante microondas, que debe tener la frecuencia especifica. La energía requerida para que los electrones salten de una capa a otras es única en cada elemento e idéntica en todo el universo para todos los átomos de cada elemento, añaden los expertos de la agencia espacial. "El hecho de que la diferencia de energía entre esas *órbitas* sea un valor tan preciso y estable es la clave los relojes atómicos, la razón por la que son muy superiores a los relojes mecánicos", señala Eric Burt, físico del JPL. La cuestión es medir esa frecuencia (las ondas que pasan por un punto en una determinada unidad de tiempo) fija en un átomo particular para obtener una medida del tiempo universal estandarizada. De hecho, recuerda la NASA, un segundo se determina oficialmente por la frecuencia necesaria para hacer que los electrones de un átomo de cesio salten entre dos niveles específicos de energía.

El DSAC utiliza las oscilaciones ultraregulares de los iones de mercurio para contar el tiempo. En un reloj atómico, continúan los expertos de la NASA, "la frecuencia de un oscilador de cuarzo se transforma en una frecuencia que se aplica a átomos de manera que si dicha frecuencia es correcta muchos electrones cambiarán de niveles de energía, mientras que si es incorrecta *saltarán* muchos menos; así se determina si el oscilador de cuarzo está desajustado y cuánto, para poder aplicar la corrección y que recupere la frecuencia debida", ajuste que se produce cada pocos segundos.

En los relojes atómicos al uso los átomos están en cámaras de vacío, con el inconveniente de que dichos átomos pueden interactuar con las paredes de la cámara y provocar errores de frecuencia. En el DSAC, los átomos eléctricamente cargados (iones de mercurio), se contienen en una jaula electromagnética, evitando dichas interacciones, lo que permite alcanzar un altísimo nivel de precisión y resultando mucho más estable y exacto que los relojes atómicos embarcados ahora en los satélites del sistema GPS. Con esos iones de mercurios se mantiene ajustado el oscilador de cuarzo.

Qué es la experiencia operativa y por qué es cosa de todos

Cuando se pregunta a los asistentes a un curso qué es para ellos la experiencia operativa, en la mayor parte de las respuestas aparece la palabra "aprender", ya sea aprender de errores propios del pasado para no repetirlos o aprender de los errores de la gente que nos rodea para intentar hacer las cosas bien a la primera; incluso vuelve a aparecer la palabra aprender para repetir las cosas que nos han salido bien y asegurarnos el éxito en nuestra actuación.

Todos, en nuestra vida diaria, utilizamos la experiencia operativa sin darnos cuenta. Con la llegada de internet, esta práctica se ha puesto al alcance de la mano de todo el mundo. Así, a casi nadie se le ocurre ir a un hotel sin teclearlo previamente en Google para consultar las opiniones de aquellos que han estado allí antes, o que han leído ya el libro que queríamos comprar. Pero no nos vale cualquier opinión; ver cinco estrellitas o sólo una estrellita marcada no nos da ninguna pista sobre si nos va a gustar la compra o no, por ello siempre intentamos buscar aquellas opiniones más completas y detalladas, a poder ser con fotos. ¿Por qué es tan importante el detalle y la foto? Simplemente porque necesitamos saber las causas por las que un hotel o un libro han sido fantásticos (o no) y tener todas las herramientas a mano para decidir, es decir, utilizamos las lecciones aprendidas de los demás para nuestro beneficio.

Seguramente a nadie se le ocurre pensar que este proceso que realizamos a diario de forma inconsciente, tiene nombre: experiencia operativa; y es una herramienta muy potente en todos los sectores, incluido el nuclear, para hacer que la operación sea más segura.

■ Texto: **Vanessa Miranda Abad** | Técnico del Área de Experiencia Operativa y Normativa del CSN ■

"Debemos aprender de los errores de los demás. No vamos a vivir lo suficiente como para cometerlos todos nosotros mismos". Esta frase del humorista americano San Levenson define a la perfección el propósito de la experiencia operativa, pero no siempre ha sido tan evidente la importancia del uso de esta herramienta en las centrales nucleares, ni mucho menos ha sido siempre el proceso sistemático y estructurado que podemos encontrar ahora en las plantas.

Para saber cómo llegó la experiencia operativa al sector nuclear vamos a hacer un poco de historia. El 28 de marzo de 1979 tuvo lugar el peor accidente en una central nuclear comercial en EE UU, que resultó en la fusión de la mitad del núcleo del reactor y el cierre definitivo de la central de Three Mile Island 2. Aunque no hubo daños personales, la

Portada del informe de la comisión presidencial sobre el accidente de Three Mile Island.

confianza del público en la industria nuclear se tambaleó de tal manera que se suspendieron los proyectos para la construcción de nuevas centrales nucleares y algunas, que estaban en construcción, no llegaron a terminarse.

El suceso puede resumirse brevemente así: durante un transitorio de la central, una válvula de alivio del presionador permaneció abierta cuando debía estar cerrada, permitiendo una fuga del refrigerante. Los operadores no fueron conscientes de ello, ya que la válvula no tenía indicación en sala de control. Confundidos por el gran número de alarmas, los operadores tomaron una serie de acciones que empeoraron la situación, ya que redujeron el caudal de refrigerante a través del núcleo, lo que provocó su calentamiento y fusión parcial.

Irónicamente, un suceso similar había ocurrido dos años antes en la central nuclear de Davis Besse, con la diferencia de que los operadores reconocieron la válvula abierta y pudieron cerrarla a tiempo, por lo que el suceso no tuvo consecuencias. En ese momento, el proceso de experiencia operativa no se tenía en cuenta

WIKIMEDIA

Central nuclear de Three Mile Island.

ni se realizaba de forma sistemática, por lo que las centrales perdieron la oportunidad de tomar medidas antes de que se produjera otro suceso similar.

Este accidente marcó un antes y un después en muchos ámbitos de la industria nuclear y se tomaron acciones en cuanto a procedimientos, formación y diseño de salas de control desde el punto de vista de los factores humanos; pero lo que nos interesa en este artículo fue la siguiente recomendación que hizo la Comisión Kemmeny, creada para investigar este accidente: "Debería haber una recolección sistemática, revisión y análisis de la experiencia operativa en las centrales nucleares [...] junto con una red de comunicaciones internacionales para facilitar la velocidad e intercambio de información de las partes afectadas". Esta recomendación puso de manifiesto la importancia de la aplicación de forma efectiva de la experiencia operativa.

Como acción correctiva de esta causa, se creó el INPO (Institute of Nuclear Power Operations) en EE UU, cuyo propósito es "promover los más altos niveles de seguridad y fiabilidad (y promover la excelencia) en la operación de las centrales nucleares comerciales". Para conseguir su misión, INPO cuenta, entre otros, con un programa de experiencia operativa que la NRC (Nuclear Regulatory Commission) convirtió en normativo mediante la publicación de la Generic Letter GL 82-04, "Use of INPO See-in Program". Este programa se ha revisado con el paso de los años en varios documentos, pero siempre manteniendo su esencia, basada en compartir experiencia para aprender.

Mientras INPO ponía en marcha su programa de experiencia operativa en Estados Unidos algunos otros países, como España, Francia y Alemania, decidieron participar en los programas de INPO, pero tuvo que ocurrir otra catástrofe para que el resto del mundo reaccionara.

Así, el 26 de abril de 1986, tuvo lugar el accidente que provocó la destrucción del reactor número 4 de Chernóbil, como consecuencia de los errores cometidos durante la realización de una prueba, en la que se desactivaron los sistemas de seguridad. A raíz de este accidente se puso de manifiesto la necesidad de la colaboración internacional y el intercambio de experiencias entre las centrales a nivel mundial. Según dice la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) en su documento INSAG 7, "The Chernobyl Accident": "El accidente de

Sede del Institute of Nuclear Power Operations (INPO).

La central nuclear de Chernóbil en 2009.

Chernobyl demostró que las lecciones aprendidas de Three Mile Island no se habían implantado en la URSS; en particular, la evaluación de la experiencia operativa; la necesidad de fortalecer la capacidad de gestión y técnica en el emplazamiento, incluyendo la mejora de la formación de los operadores; y la importancia de la interfaz hombre-máquina". Para dar solución a este problema a nivel mundial se creó WANO (World Association of Nuclear Operators), de tal manera que funcionara para todos los países del mundo de la misma forma que lo hacía INPO en Estados Unidos, y cuyo propósito es "maximizar la seguridad y la fiabilidad de las centrales nucleares de todo el mundo trabajando juntos para evaluar, comparar y mejorar la gestión a través del apoyo mutuo, el intercambio de información y la emulación de buenas prácticas"

Criterios INPO y WANO

Para INPO, "el objetivo de un programa de experiencia operativa de una central nuclear es utilizar las lecciones aprendidas de la industria y de su propia experiencia de forma efectiva para mejorar la seguridad y fiabilidad de la planta y reducir el número y las consecuencias de los sucesos". Por su parte, WANO señala que "el uso eficaz de la experiencia operativa incluye el análisis de la experiencia operativa –tanto la interna como la externa– para identificar puntos débiles fundamentales y, a continuación, determinar las acciones correctoras apropiadas, particulares de cada central nuclear, que minimizarán la probabilidad de sucesos similares". Comprobamos en estas definiciones que, al igual que en la vida cotidiana, aparece la palabra aprender, aparecen nuestros errores y los errores de los demás y aparece el objetivo de su uso que es reducir los sucesos en un futuro. Obviamente, en un sector como el nuclear, no se puede dejar el uso de la ex-

MATTI PAAVONEN / WIKIMEDIA

periencia operativa al azar, sino que debe ser un proceso sistemático, estructurado y con una serie de elementos que hagan posible que sea eficaz.

Vamos a ver qué nos proponen INPO y WANO como proceso de experiencia operativa y vamos a analizar cada uno de sus elementos. Como se aprecia en el gráfico 1, un proceso de experiencia operativa tiene dos ramas separadas, que no deben confundirse: la experiencia operativa propia y experiencia operativa ajena.

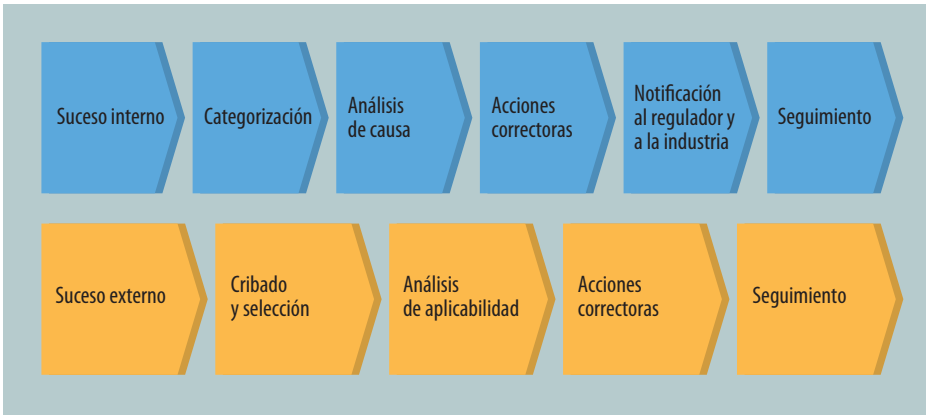


Gráfico 1. Proceso simplificado de experiencia operativa.

Experiencia operativa propia

Durante la operación rutinaria de las centrales nucleares se producen fallos de equipos, sucesos e incidentes. Por supuesto, no todos ellos tienen la misma importancia en cuanto al riesgo que entrañan, pero sí es importante que la central aprenda de todos ellos y tome medidas para evitar su repetición. Esta

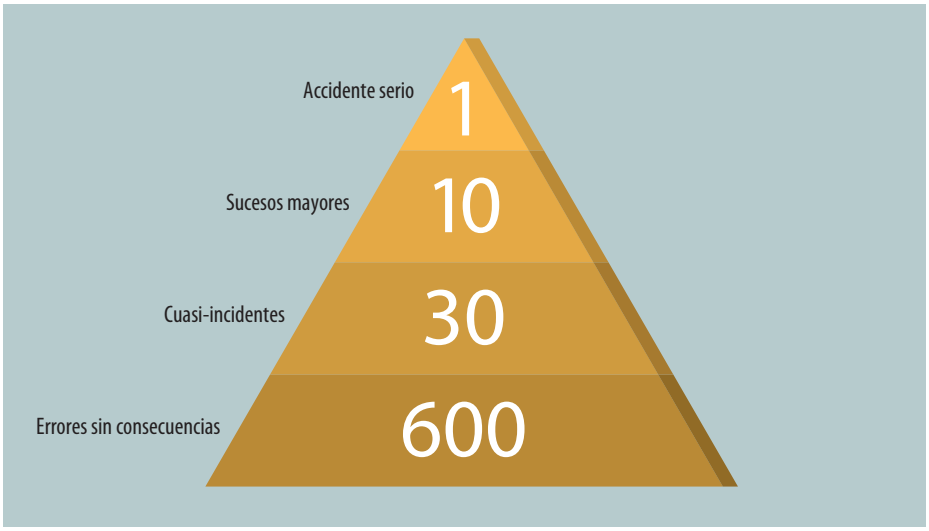


Gráfico 2. Pirámide de severidad o de Bird.

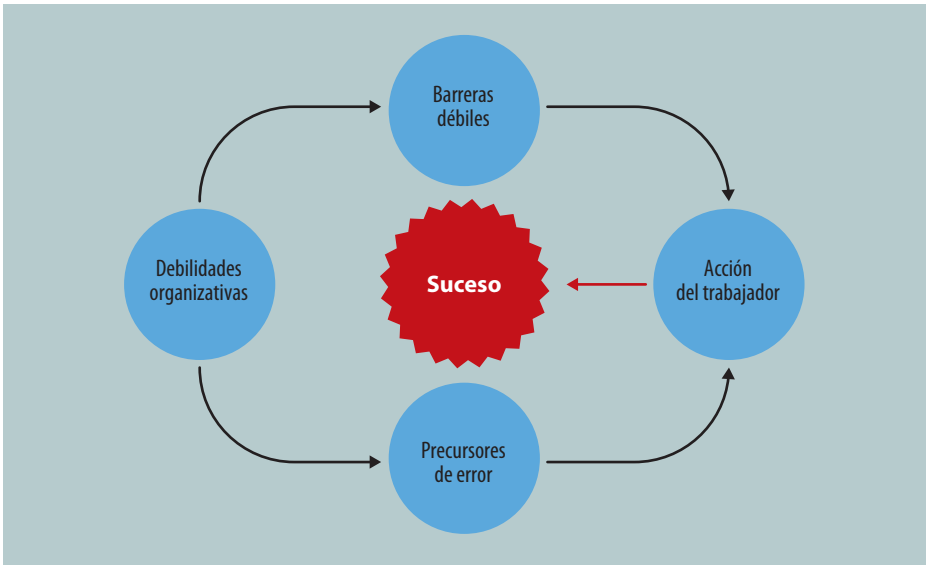


Gráfico 3. Anatomía de un suceso.

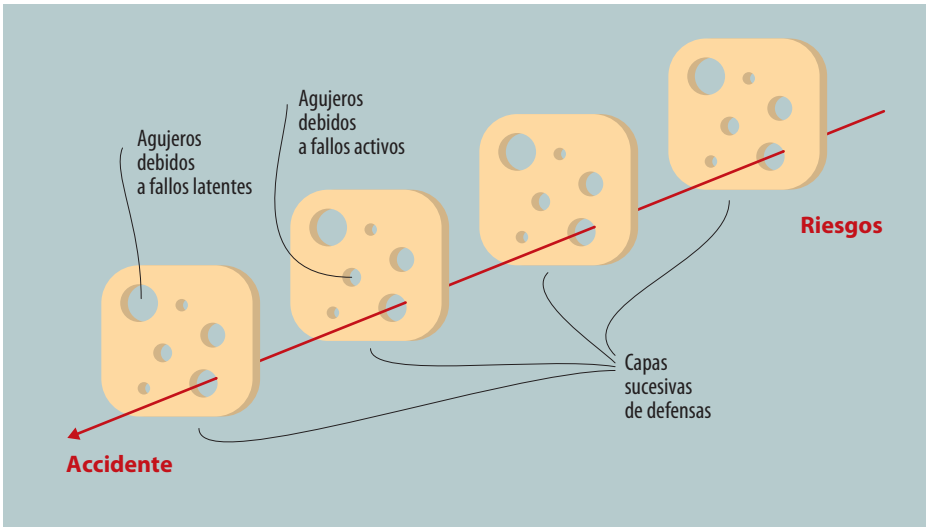


Gráfico 4. Teoría del queso.

práctica incide directamente en la seguridad de la central y en su fiabilidad.

La pirámide de severidad o pirámide de Bird (gráfico 2) nos da una idea aproximada de la proporción en la que nos encontramos los sucesos en una planta; así, vemos que por cada suceso muy grave, tenemos diez sucesos importantes, treinta cuasi-incidentes (o *near-misses*) y seiscientos sucesos sin consecuencias.

Teniendo en cuenta el modelo de INPO (INPO 06-003) "Anatomía de un Suceso" (gráfico 3), la mayoría de los sucesos (accidentes/ incidentes) se producen por un error activo combinado con una serie de barreras rotas o debilitadas y unos fallos organizativos latentes. Pero ¿qué queremos decir con cada uno de estos términos?

La acción iniciadora es la mayoría de las veces una acción humana, ya sea correcta o errónea. Este error activo tiene unas consecuencias no deseadas que son inmediatas y observables. Por lo que una forma de prevenir sucesos será anticiparse y prevenir los errores activos. Por ejemplo, cuando los trabajadores manipulan equipos significativos para el riesgo.

Las defensas o barreras son los sistemas que protegen de los riesgos (por radiación, químicos o de otro tipo), promueven un comportamiento adecuado, anticipando, previniendo o detectando errores en el lugar de trabajo, y mitigan las consecuencias de los riesgos en caso de que un error haya ocurrido. Ejemplos de barreras son los procedimientos, el etiquetado, los bloqueos, los descargos, etcétera. Cuando se debilitan, no pueden cumplir su misión de frenar el error antes de que ocurra el suceso.

Los precursores del error son condiciones desfavorables en el lugar de trabajo que aumentan la probabilidad de cometer un error al realizar una acción específica. Por ejemplo, la sobrecarga de trabajo, la falta de estándares claros, las

distracciones o interrupciones, las indicaciones confusas y el estrés, entre otras.

Por último, entendemos como debilidades organizativas latentes las condiciones que, en el control de los procesos por parte de la dirección, pueden provocar errores y degradar la integridad de las barreras. Ejemplos de herramientas organizativas serían las políticas, los valores o la toma de decisiones.

Una vez entendido cómo se produce un suceso, se aprecia que la gravedad de las consecuencias va a depender del número de barreras falladas, pero la mayoría de las veces se comprueba que las causas raíz de los sucesos (entendiendo por causas raíz aquellas que si se eliminan se minimiza la probabilidad de que el suceso vuelva a ocurrir), sobre todo aquellas que se refieren a las debilidades organizativas, van a ser las mismas en sucesos significativos y en sucesos menores, por lo que analizando los sucesos menos importantes, podremos prevenir los importantes corrigiendo procesos, prácticas de trabajo y debilidades en la organización (ver gráfico 4).

La experiencia nos muestra que, en una central, los sucesos significativos tienden a ocurrir una vez en muchos años, pero no tiene por qué ser así. Entendiendo con el modelo anterior cómo se producen los sucesos, se puede romper el ciclo y prevenirlos; y es aquí donde la experiencia operativa juega un papel fundamental.

Hay distintas formas de implantar un proceso de experiencia operativa interna en una central nuclear, pero en ninguno de ellos pueden faltar los siguientes elementos:

- Registro de sucesos y categorización
- Análisis de los sucesos para determinar las causas
- Acciones correctivas y seguimiento de las mismas
- Informar a los departamentos afectados
- Compartir con la industria

La asociación mundial de operadores nucleares WANO (World Association of Nuclear Operators) se creó para fortalecer la evaluación de la experiencia operativa.

En todo sistema de experiencia operativa interna, se registran todos los sucesos en una base de datos. La mayoría serán por mal funcionamiento de equipos o errores del personal que no tendrán ninguna importancia y será suficiente una corrección inmediata de su causa directa para solucionarlos. Estos sucesos se encuentran en la base de la pirámide de Bird y lo interesante es almacenarlos para realizar análisis de tendencias, teniendo en cuenta que, si se repiten continuamente, escalarán de categoría y requerirán un análisis más profundo para determinar las causas que los provocan.

En cambio, otros sucesos más complejos, como disparos, fallos de equipos importantes que sean relevantes para la seguridad o sucesos que afecten a varios departamentos, serán categorizados en la parte media-alta de la pirámide de Bird y se requerirá un análisis más exhaustivo para determinar las causas raíz y los factores contribuyentes que los han originado. La mayoría de las veces, este análisis será llevado a cabo por un grupo multidisciplinar de personas formadas en análisis de sucesos. Existe un gran número de metodologías de análisis de causa raíz, pero es importante utilizar una metodología

sistemática y estructurada que esté reconocida internacionalmente. Las centrales utilizan la metodología *Human Performance Enhancement System* (HPES) o la *Management Oversight and Risk Tree* (MORT)

Una vez determinadas las causas raíz y los factores contribuyentes es necesario implantar una serie de acciones para corregirlas y que el suceso no vuelva a ocurrir. Estas acciones correctivas se dan de alta en una base de datos para facilitar su seguimiento y se les asignará una prioridad, un plazo y un responsable. Finalmente, es necesario realizar un seguimiento de las acciones correctivas propuestas para comprobar su eficacia a lo largo del tiempo.

Cuando los sucesos internos de una central nuclear cumplen con unos criterios determinados (en el caso de las centrales nucleares españolas estos criterios se encuentran recogidos en la Instrucción del CSN IS-10, rev 1 sobre los criterios de notificación de sucesos al CSN por parte de las centrales nucleares) se notificarán al resto de centrales y al regulador. Además WANO requiere que las centrales nucleares del mundo notifiquen un número determinado de sucesos al año, para intercambiar con el resto de centrales.

Experiencia operativa ajena

En el mundo hay más de cuatrocientas centrales nucleares. En la operación rutinaria de cada una de ellas ocurre un cierto número de incidentes o accidentes, lo que en total nos da un número muy elevado de sucesos. Teniendo esto en cuenta, podemos preguntarnos cuál es la probabilidad de que ocurra algún incidente que no haya ocurrido nunca antes en alguna central.

La experiencia operativa ajena es la herramienta con la que cuentan las centrales nucleares para tratar los sucesos del resto de plantas, aprender de sus análisis y tomar medidas para evitar que esos mismos sucesos les ocurran a ellas. Dado que las plantas pueden recibir una gran cantidad de informes de sucesos diariamente, es necesario que su tratamiento se haga de una forma estructurada y sistemática para utilizar las lecciones aprendidas de una forma efectiva.

Un proceso de experiencia operativa ajena debe contar con los siguientes elementos:

- Recepción y registro de los informes de experiencia operativa
- Cribado y selección
- Análisis de aplicabilidad
- Acciones correctivas
- Seguimiento de acciones

Los informes de experiencia operativa ajena que reciben las centrales pueden provenir de distintas fuentes. Pueden proceder de WANO, de informes de suministradores, del CSN, de los organismos reguladores del país de origen de la tecnología de la central, del OIEA, de otras centrales nucleares españolas o de otras fuentes.

En el momento de la recepción y registro se determinará qué informes requieren una atención inmediata y se distribuirán al personal especialista para que realice el análisis de aplicabilidad. Dentro de estos informes se encuentran, entre otros, los documentos de INPO (INPO Event Report Level 1 y Level 2) y WANO (Significant Operating Event Report —SOER— y Significant Event Report —SER—) que, por el compromiso de las centrales con WANO, son de obligado análisis. En estos casos la central tendrá que analizar la mejor forma de implantar las recomendaciones de dichos documentos.

Durante el cribado y selección se descartan los documentos que claramente no sean aplicables a la central y se envían para análisis aquellos documentos que, a primera vista, puedan tener un impacto en la seguridad y fiabilidad de la planta. En cualquier caso, debe quedar registrado, junto con el documento, la justificación de la no selección del suceso para análisis de aplicabilidad y, en el caso de que sea aplicable, una prioridad para su tratamiento. Tanto la selección como el descarte deben realizarse con una visión amplia de lo que es la aplicabilidad, intentando no descartar por tecnología, fabricante, modelo u otras consideraciones.

El documento se remitirá al personal especialista, que será el encargado de estudiar si las causas del suceso ajeno pueden ocurrir en su central y debe proponer acciones para evitar que dichas causas aplicables ocurran. En este caso, la planta estaría aprendiendo de la experiencia ajena para evitar tener los mismos sucesos. Relacionando este paso con la experiencia operativa interna, se deduce que cuanto mejor se haya realizado el análisis de causa raíz de un suceso propio, más útil será dicha información para que otra planta realice su análisis de aplicabilidad.

Como resultado de este análisis de aplicabilidad se debe proponer una serie de acciones correctivas que evitarán que el suceso ajeno ocurra en la central. Estas acciones, igual en la experiencia operativa interna, se priorizan, tienen una fecha límite y deben ser revisadas para comprobar su eficacia.

Es importante destacar que, en general, las acciones determinadas en un análisis de causa raíz no serán de aplicación en otra planta, ya que cada una tiene una organización, unos procesos, unos equipos y unos sistemas distintos y tendrán que decidir qué acciones tomar con sus recursos, sus políticas y su organización.

Fuentes

— INPO SEE-IN Program
— INPO 06-003, Human Performance Reference Manual"
— Curso Experiencia Operativa de Tecnatom
— Events that shape the Industry (INPO)
— Curso de Human Performance Enhancement System (HPES) de Tecnatom
— Curso de Management Oversight and Risk Tree (MORT). Dorian Coger y Tecnatom

Emmy Noether
La matemática que cambió el curso de la física

Como tantas otras mujeres que trataron de dedicarse a la ciencia en su tiempo, Emmy Noether tuvo que enfrentarse a los arraigados prejuicios sexistas del mundo académico, y también a los derivados de su condición racial de judía, en una Alemania en la que empezaba a emerger el nazismo. Muchas sucumbieron a las dificultades, pero ella consiguió irlas enfrentando y superando, pese a su persistencia, gracias a su genio. Sus contribuciones matemáticas fueron reconocidas en vida por algunos de los más ilustres científicos de la época, entre ellos Albert Einstein, en cuya teoría de la relatividad trabajó, y David Hilbert, el matemático de mayor reconocimiento en las primeras décadas del siglo XX. Su legado, especialmente el teorema que lleva su nombre, ha tenido una enorme influencia en el devenir de la física del siglo XX.

■ Texto: **Vicente Fernández de Bobadilla** | periodista ■

Cuando se repasan las biografías de las mujeres científicas que vivieron y trabajaron durante la primera mitad del pasado siglo, no tardan en surgir unas irritantes características comunes, que se repiten como un patrón en todas ellas. La lucha por acceder a estudios académicos superiores; la conformidad con puestos de trabajo secundarios, muy por debajo de su talento y siempre bajo la tutela masculina; la escasez, cuando no la carencia absoluta, de

reconocimiento oficial. Si la biografía pertenece a una mujer judía en la Alemania circundante a los años de la Segunda Guerra Mundial, puede añadirse a todo esto el destierro o la huida hacia otro país donde reconstruir su vida y su obra; al menos, en esto último, no sufrieron ninguna diferencia de trato con respecto a sus colegas masculinos.

Emmy Noether (1882-1935) no fue una excepción, aunque sus circunstancias personales le permitieron mitigar algunas de estas experiencias casi obligatorias; la posición acomodada de su familia le facilitó resistir durante años en un puesto profesional sin sueldo, y su aportación a la resolución de la teoría de la relatividad general fue tan sobresaliente que su nombre se impuso sin dificultad como una referencia en los campos de la matemática y la física. Su muerte prematura, cuando estaba todavía en plena posesión de facultades, dejó el regusto amargo de todo lo que todavía habría podido alcanzar en unos años más. Albert Einstein lo dejó muy claro en la carta que envió a *The New York Times* después del fallecimiento de Noether; con ella se había ido "la matemática más grande de todos los tiempos". No fue ni mucho menos el único científico que pensó así.

No deja de ser curioso cómo las distintas disciplinas en el mundo científico no son impermeables a las modas ni a las demandas del mercado laboral; las matemáticas, el campo en el que Noether destacó, viven actualmente una edad de oro profesional derivada de la carencia de desarrolladores de algoritmos para la siempre hambrienta industria digital. Hace no demasiados años, se las percibía como confinadas a la investigación y la docencia. Y, cuando Noether llegó a ellas, estaban a punto de vivir una pequeña revolución, donde ella sería, obviamente, uno de los líderes, y que desembocaría en una nueva serie de aplicaciones, entre ellas la mencionada contribución a la teoría de la relatividad, y al mundo de la física en general. Y estremece pensar que todo aquello podría haberse quedado en nada de no haber sido por un puñado de hombres que recurrieron a ella, salvando los prejuicios de la sociedad de entonces y fijándose únicamente en el genio científico que palpitaba en la mente de aquella mujer.

Emmy Noether vivió entre matemáticas desde su nacimiento en Erlangen (Alemania) el 23 de marzo de 1882; su padre, Max Noether, era un reputado especialista en geometría algebraica; su madre, Ida Amalia Kaufmann, era hija de un próspero comerciante. Emmy fue la mayor de cuatro hijos, y aunque dos de sus hermanos se dedicaron también a la ciencia, su apellido se recuerda hoy sobre todo gracias a ella. No cupo duda de que había heredado la vocación paterna cuando, tras concluir su educación formal y obtener un diploma que la habría calificado para impartir clases de idiomas en escuelas de señoritas, decidió cursar estudios superiores, estudiar la carrera de matemáticas y realizar su doctorado bajo la tutela de Paul Albert Gordan, por aquel entonces el mayor experto mundial en la teoría de invariantes (según la cual, el valor numérico de una cantidad no se altera por una transformación de coordenadas). En aquellos años de transición del siglo XIX al

Emmy Noether y sus hermanos antes de 1918.

Paul Albert Gordan, su director de tesis.

Emmy Noether en Göttingen.

David Hilbert.

XX, era difícil determinar cuál de las tres cosas parecía más inalcanzable.

La Universidad de Erlangen parecía la elección más lógica, ya que su padre impartía clases en ella, pero ni siquiera eso era suficiente para admitirla como estudiante, ya que las leyes de la institución vetaban la matriculación de mujeres, que sólo podían asistir a las clases como oyentes, y siempre con el permiso del profesor. La ley fue modificada en 1904, y Noether ingresó ese mismo año; una de las dos mujeres admitidas entre mil alumnos masculinos. Tres años después, se graduó, y se convirtió en la única estudiante femenina de doctorado que tuvo Paul Gordan. Tras la lectura de su tesis en 1908, trabajó en el Instituto de Matemáticas de la Universidad de Erlangen durante siete años como profesora sin sueldo.

En esa época comenzó a colaborar con el algebrista Ernst Otto Fischer, y empezó su trabajo en el álgebra teórica, que un tiempo después se convertiría en una de sus principales especialidades. Por su parte, Gordan había quedado tan impresionado por su talento que la recomendó para que la contrataran en la Universidad de Göttingen, una recomendación que no pasó desapercibida para su amigo y colega David Hilbert, quien se había percatado también de sus facultades y consideraba —acertadamente, como luego se vio— que podía aportar una nueva visión para desatrancar las complicaciones a las que se enfrentaban los distintos científicos que trabajaban por aquel entonces en lo que luego sería conocido como la teoría de la relatividad general.

Lo que ocurrió a continuación ha pasado por derecho propio a formar parte de las anécdotas más conocidas y absurdas de la historia de la ciencia, y tiene que ver con el cisma que la propuesta de contratar a Noether desató entre distintos departamentos y profesores; curiosamente, los mayores oponentes se encontraban en las áreas de Humanidades, y se habla de una protesta formal del departamento de filosofía, que argumentaba "¿qué pensarán nuestros soldados cuando regresen a la universidad y encuentren que se les pedirá que aprendan de una mujer?". A todos ellos opuso Hilbert su famosa contestación según la cual "no veo que el sexo del candidato tenga que ser un argumento para su admisión como *privatdozent*. Después de todo, esto no es una casa de baños". Su insistencia consiguió que fuera admitida, aunque no fue hasta 1923 cuando se le concedió el puesto de ayudante de investigación, de nuevo sin sueldo. Esto último no le preocupaba especialmente, ya que su familia podía permitirse mantenerla; en cuanto a la veracidad de su puesto de ayudante, ella misma se encargó de demolerlo sistemáticamente con la brillantez de su trabajo.

Con o sin paga, para cualquier matemático con ambición de aprender, Göttingen era, en aquella época, el sitio donde estar. Era uno de los centros de investigación de referencia mundial, donde las mentes más brillantes se afanaban por dar respuestas a nuevos campos científicos que entonces estaban comenzando a atisbarse. En 1915, Noether comenzó a trabajar con los matemáticos David Hilbert y Felix Klein en la teoría de la relatividad, con el encargo específico de investigar un aspecto de la misma sobre la conservación de la

El teorema definitivo

Considerado uno de los más importantes formulados en el siglo XX, lo que se conoce como el teorema de Noether fue presentado el 23 de julio de 1918 en una conferencia en la Sociedad Matemática de Göttingen, y publicado en *Göttingen Nachrichten*.

A grandes rasgos, Noether detectó un enlace entre dos importantes conceptos en física: las leyes de conservación y las simetrías. Las primeras establecen que una cantidad debe siempre permanecer constante, y uno de los campos donde mejor se comprende es el de la energía: no puede crearse ni destruirse. Un ejemplo clásico en las clases de física es el de dos bolas de billar que chocan entre sí: parte de la energía de la primera bola se queda en ella, parte pasa a la segunda bola, y otra parte genera ruido o calor, pero la cantidad total de energía permanece invariable.

En cuanto a las simetrías, describen los cambios que pueden llevarse a cabo sin alterar el aspecto o el comportamiento de un objeto. Al igual que una esfera, la miremos desde donde la miremos, tiene siempre el mismo aspecto, las ecuaciones que forman la física no cambian en distintos lugares del tiempo o del espacio. Por muy lejos que viajemos en el cosmos, estaremos ligados siempre a las mismas leyes físicas.

Lo que Emmy Noether descubrió es que cada una de esas simetrías continuas tiene una ley de conservación asociada, y viceversa: por cada ley de conservación, hay una simetría asociada. Estas conexiones desvelan que el Universo se rige por unos principios de ritmo y razón muy concretos, que parecían arbitrarios antes de que se descubriera esa relación.

Curiosamente, y pese a su enorme importancia, este trabajo de Noether pasó relativamente desapercibido, hasta que en la segunda mitad del siglo XX se reveló como la clave para desarrollar nuevas investigaciones en numerosos campos de la física. Una influencia que continúa hoy en día y que todo indica que, al igual que los principios que el mismo establecer, se mantendrá por siempre invariable.

DANIEL SCHWEN / WIKIPEDIA COMMONS

El departamento de matemáticas de la Universidad de Gotinga permitió la habilitación de Noether en 1919, cuatro años después de que hubiera comenzado a dar clases en su facultad.

energía. El resultado de su trabajo fueron dos teoremas, que suelen citarse como uno solo; pero las tres simples palabras de su denominación —teorema de Noether— no hacen justicia a todo lo que supuso para las matemáticas y la física de las décadas posteriores (ver recuadro superior).

Noether no sólo mantuvo una asombrosa indiferencia hacia las repercusiones de su trabajo, sino que con el tiempo llegaría a aventarlo de su memoria, recordándolo tan sólo como "una bagatela de juventud". No se trataba tanto de que no fuera consciente de lo que había logrado como de su predisposición natural a no mirar hacia el pasado y lanzarse, tan pronto concluía un trabajo, a por el siguiente desafío. Se tomaba con filosofía su peculiar condición en la universidad, centrándose en su verdadero interés de la investigación por la investigación, y el placer de enseñar y confraternizar. Acostumbraba a pasear por los

El Kollegienhaus de Erlangen, uno de los edificios de la antigua universidad donde se graduó y dio sus primeras lecciones Emmy Noether.

campos que circundaban la institución con colegas y alumnos, discutiendo y hablando a toda velocidad sobre matemáticas. A veces invitaba a algunos de estos últimos —que no tardaron en ser conocidos como "los chicos de Noether"— a sus habitaciones para degustar un pudding "a la Noether", que no era sino una excusa para prolongar sus debates hasta bien entrada la noche. No era de extrañar que los mejores estudiantes la quisieran como profesora, ni que expertos de otros países llegaran en número creciente a visitarla en busca de consejo.

Poco a poco, se fue convirtiendo en el epicentro de las matemáticas de Göttingen; le faltaba el reconocimiento oficial, pero nunca hubo dudas sobre hasta qué punto disfrutaba del oficioso. En 1923 consiguió por fin el puesto de profesor asociado no numerario y con él su primer salario, pero ya no conseguiría llegar mucho más allá en el escalafón, lo cual acogió con su despreocupación habitual; en cambio, sí hay evidencias de que le molestó de forma notable que su nombre no apareciera en la portada de los *Mathematische Annalen*, junto con el resto de los colaboradores, una reacción comprensible si se considera que esta publicación universitaria era una de las más reputadas del mundo matemático, y que Noether había trabajado en su edición de forma especialmente intensa, casi como una redactora jefe, también en funciones. Sus trabajos, de todos modos, sí aparecían en su interior con su correspondiente firma, y los expertos internacionales a los que llegaba la publicación sabían dónde buscar y qué valorar.

El nombre de Noether seguía creciendo, tanto por su labor incesante como por su clara toma de posición en las corrientes que circulaban entonces en el mundo matemático. El espíritu curioso y transgresor de la época que con tanta plasticidad se traspasó a la

A. SAVIN / WIKIMEDIA COMMONS

Universidad Estatal de Moscú donde Emmy Noether enseño en el curso 1928-29.

WIKIMEDIA COMMONS

Emmy Noether hacia 1930.

pintura, la música, el cine o la arquitectura, encontró también un resquicio por donde entrar en el mundo de los números. Se trataba de abrir la puerta al desarrollo del álgebra abstracta moderna, desterrando conceptos que llevaban demasiado tiempo calcificados, y allí Noether se convertiría, como escribió un tiempo después el matemático Nathan Jacobson, en el estandarte "gracias a sus trabajos publicados, sus conferencias y su influencia personal en sus contemporáneos".

El final de la década coincidió con la jubilación de David Hilbert, y este nombró como su sucesor al matemático Hermann Weyl, que había sido alumno suyo y había obtenido su doctorado bajo su supervisión. Weyl llegaría a ser uno de los matemáticos más brillantes del siglo, pero en aquel momento, cuando regresó a la que había sido su Universidad, sintió una creciente intranquilidad ante la evidencia de que toda la vida matemática del departamento parecía

Con su hermano Fritz en el verano de 1933.

centrarse en una humilde profesora asociada. "Me sentí avergonzado", diría después "de ocupar un puesto tan relevante con respecto a ella, de quien sabía que era superior a mí como matemático en muchos aspectos".

Si Noether se había sentido molesta por haber sido, una vez más, despreciada para un puesto que se merecía sobradamente, no se lo hizo saber a su nuevo superior, quien también dijo de ella que era "cálida como una rebanada de pan" y que su corazón "no conocía la malicia". Además, ya estaban llegando los reconocimientos: en 1928-29 fue profesora visitante en la Universidad de Moscú, y en 1930, enseñó en Frankfurt. En 1932, fue invitada a pronunciar un discurso plenario en el Congreso Internacional de Matemáticos, celebrado en Zurich —uno de los mayores honores a los que un matemático podía aspirar—, y ese mismo año ganó el premio Ackermann-Teubner para la Promoción de las Ciencias Matemáticas, *ex aequo* con el alemán Emil Artin.

Sello de correos con Emmy Noether.

Sin embargo, la malicia de la que carecía Noether estaba empezando a impregnar todas las capas de la sociedad de su país. El progresivo avance del nazismo se hacía notar también en la Universidad, no sólo en forma de presión oficial contra los profesores e investigadores judíos sino también en siniestras anécdotas en el día a día: Ernst Witt, uno de los alumnos predilectos de Noether, había comenzado a asistir a las clases ataviado con uniforme nazi, y otro de los estudiantes, Oswald Teichmüller, que acabaría siendo un brillante matemático, organizó un boicot contra el curso de teoría numérica que impartía Edmund Landau, gritándole en medio de la clase "queremos matemáticas arias, no judías". Después de que la presión de los nazis obligara a Landau a renunciar, en 1933, Teichmuller se encontró con un problema imposible de resolver y no dudó en solicitar la ayuda de Noether. Si esto suena sorprendente, no lo es menos que Noether accediera a ayudarle con la solución, pero aquí hay que recordar de nuevo las palabras de Wey cuando habló de que "su espíritu conciliador fue un consuelo moral entre toda la bruma de odio, maldad, desesperación y pena que nos rodeaba".

En 1933, el gobierno nazi prohibió a Noether seguir impartiendo clases en la Universidad y se convirtió en uno de los muchos científicos judíos que tuvo la prudencia y la suerte de huir de su país antes de que las cosas pasaran a tener peor cariz. Tuvo dos ofertas, una del Sommerville College en Oxford, y otra, financiada por la Fundación Rockefeller, en el Bryn Mawr College, de alumnado exclusivamente femenino. Eligió la segunda, entre otros motivos por su proximidad a la Universidad de Princeton, que se estaba convirtiendo en el nuevo epicentro mundial en investigación matemática. En Bryn Mawr se reencontraría con su antigua amiga de Göttingen Olga Taussky, quien iniciaría bajo su tutela una carrera académica que la terminaría convirtiendo en la primera matemática de excelencia en Estados Unidos.

Taussky no fue la única, ya que no tardó en sustituir a sus "chicos de Noether" por un nutrido grupo de alumnas que se beneficiaron de una de las profesoras más brillantes con las que habrían podido soñar. Y tampoco tardó en entrar en Princeton, donde impartió un curso semanal de conferencias en el Instituto de Estudios Avanzados, al tiempo que continuaba con sus investigaciones. Pero, tras todos los obstáculos que había tenido

BOB IONESCU / WIKIPEDIA COMMONS

El Campus de Emmy Noether en la Universidad de Siegen es la sede del departamento de física y matemáticas.

que superar hasta lograr crearse aquella nueva vida, aún le quedaba uno que se demostraría insalvable: en 1935 se le diagnosticó un tumor uterino del que sería operada a los pocos días, pero como resultado de una infección posoperatoria falleció el 14 de abril.

No tuvieron que pasar muchos años para que se reconociera póstumamente su talento: el mundo académico quedó consternado, ya que, si bien los reconocimientos oficiales de que habría sin duda disfrutado de haber nacido varón, como más altas posiciones académicas y una carrera universitaria mucho más notable, le fueron negados, contaba con un reconocimiento oficioso mucho más destacado. Más frustrante fue el hecho de que falleciera con sólo 53 años de edad, y de todos los descubrimientos que se perdieron con la desaparición de aquel cerebro privilegiado aún en su plenitud.

Los restos mortales de Emmy Noether se encuentran en el pasaje que rodea el claustro de la Biblioteca M. Carey Thomas.

Su cuerpo fue enterrado en el pasillo de los claustros de la Biblioteca M. Carey Thomas, en Bryn Mawr, con una lápida cuya sencillez se ajustaba a la que presidió toda su vida: "E. N. 1882-1935". Ni siquiera figura su nombre completo, pero este no tardaría en ser citado y reivindicado por muchos de sus compañeros: el matemático ruso Pavel Aleksandrov la calificó como "uno de los seres humanos más cautivadores que he conocido" y resaltó las injusticias que tuvo que soportar en su carrera académica, marcados para siempre por quienes las perpetraron "como ejemplo de un sorprendente estancamiento e incapacidad de sobreponerse a los prejuicios".

Para Einstein, Noether fue "una genuina artista de las matemáticas, además de una investigadora y pensadora de enorme talento", y muchos años después, en 2004, los físicos Leon M. Lederman y Christopher T. Hill escribirían sobre su teorema que fue "uno de los más importantes jamás probados a la hora de dirigir el desarrollo de la física moderna, posiblemente a la par con el teorema de Pitágoras". Todavía hoy, los físicos siguen formulando nuevas teorías basándose en el trabajo de Noether. No es exagerado aventurar que muchos de ellos se sienten agradecidos a que su creadora no se dejara vencer por las circunstancias que la rodeaban, y fuera capaz de ir mucho más allá de su destino previsto como enseñante de idiomas para señoritas.

Reacción en cadena

Texto: **Nuria Chamorro Díaz** | Periodista científica.

NOTICIAS

El glaciar más peligroso del planeta se derrite

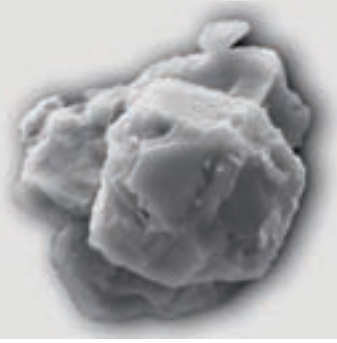
El glaciar Thwaites, situado en la Antártida Occidental, es un bloque de hielo del tamaño de Gran Bretaña y es considerado por muchos científicos como el glaciar "más peligroso del mundo". Es ya responsable del 4 % del aumento global del nivel del mar, pero su derretimiento completo elevaría ese nivel en más de un metro, inundando zonas costeras de todo el planeta.

Científicos de la Universidad de Nueva York y del Servicio Británico de Investigación Antártica, llevan a cabo un estudio a gran escala para explicar los fenómenos que están provocando el deshielo del glaciar, durante el cual se han recogido infinidad de datos. Uno de los más alarmantes es la presencia de agua a 2 °C en la zona donde el hielo hace la transición entre el lecho de roca donde se sustenta y el océano, una zona clave para medir la tasa de retroceso de un glaciar. Los científicos taladraron un orificio de acceso de 600 metros de profundidad y 35 cm de ancho y utilizaron un dispositivo, que mide la turbulencia del agua y otras propiedades como la temperatura.

"El agua caliente incrementa las tasas de derretimiento hasta cien veces", apunta el profesor Holland, líder de uno de los equipos del estudio. "El Thwaites no va a desaparecer de la noche a la mañana, pero las aguas cálidas en esta parte del mundo, por remotas que parezcan, son una advertencia sobre los posibles cambios en el planeta provocados por el cambio climático".

Hallado un material más antiguo que el Sistema Solar

En 1969 el meteorito Murchison cayó en la ciudad australiana del mismo nombre y trajo consigo el que, 50 años más tarde, se ha identificado como el material más antiguo hallado en nuestro planeta. Se trata de unos granos de polvo estelar que se generaron hace 7.000 millones de años, antes del nacimiento del propio Sistema Solar, y pueden darnos información sobre cómo se forman las estrellas en nuestra galaxia.

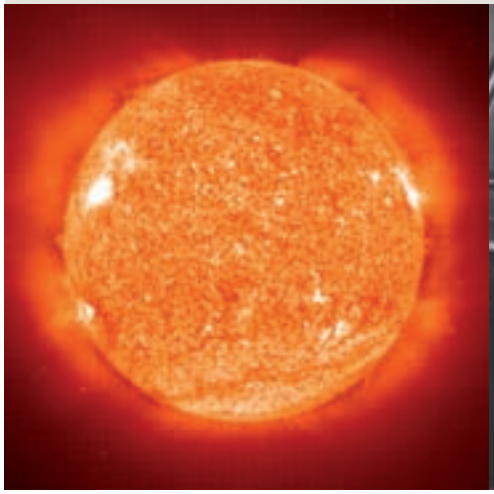


Aunque, ya en 1990, el científico Philipp Heck, del Museo Field de Chicago, identificó este material como granos de carburo de silicio anteriores al Sol, no pudo determinase su edad de forma precisa. Ahora, un estudio liderado por Heck y publicado en la revista *Proceedings of the National Academy of Science,* ha revelado la edad de estos granos. Aunque la mayoría oscila entre los 4.600 y 4.900 millones de años de antigüedad, algunos tienen más de 5.500 millones (hasta 7.000 en algunos casos). La datación se ha realizado gracias a los efectos de la radiación cósmica. "Algunos de estos rayos cósmicos interactúan con la materia y forman nuevos elementos. Es como poner un cubo en una tormenta. Suponiendo que la lluvia sea constante, la cantidad de agua que se acumula en el cubo te dice cuánto tiempo estuvo expuesto", explica Heck.

Este hallazgo evidencia la existencia de un periodo de formación de estrellas en nuestra galaxia hace 7.000 millones de años, lo que desmiente la idea de que la tasa de formación estelar de la galaxia es constante. "Es alucinante pensar en todo lo que esas pequeñas motas de polvo deben haber pasado antes de aterrizar aquí en la Tierra", dice el científico.

Se plantea la primera hipótesis sobre el origen de la energía del Sol

La potencia emitida por el Sol es de unos 3,9 x 10^{20} megavatios, un valor inexplicable para los científicos de hace un siglo, porque no podía justificarse mediante procesos de combustión convencionales. Reflexionando sobre el problema, en 1920 el astrónomo y astrofísico británico Arthur Stanley Eddington, el mismo que realizó la primera comprobación empírica de la teoría de la relatividad general de Einstein, planteó que la energía procedente del Sol se debía generar en su interior a partir de reacciones entre partículas subatómicas. Su hipótesis fue corroborada años más tarde, cuando Hans Bethe publicó su artículo "Energy Production in Stars", en el que explicaba el mecanismo de las reacciones nucleares que suministran energía a las estrellas, mediante la fusión de núcleos atómicos ligeros para formar otros más pesados, especialmente de hidrógeno que se convierten en helio.



Encuentran un tumor de más de 60 millones de años en de un dinosaurio

La cola fosilizada de un joven dinosaurio que vivió hace 60 millones de años en una pradera en el sur de Alberta, Canadá, alberga los restos de un tumor, relacionado con una enfermedad conocida como hictiocitosis de células de Langerhans (HCL), una patología rara que actualmente sigue afectando a los humanos, principalmente a los niños de menos de 10 años. Los resultados del estudio han sido publicados en *Scientific reports*.

Los científicos, de la Universidad de Tel Aviv, encontraron 11 segmentos óseos fosilizados de una cola de hadrosaurio, una especie hervíbora con pico de pato. De acuerdo con la Dra. Hila May, investigadora principal del estudio, observaron "grandes cavidades en dos de los segmentos de las vertebras", muy similares a las cavidades producidas por estos tumores. Esto atrajo la atención de los investigadores, por lo que se realizó un escaneo avanzado de las muestras. Los análisis confirmaron que era HCL. "Esta es la primera vez que se identifica esta enfermedad en un dinosaurio", confirmó la científica, aunque sí se habían encontrado en otros animales.

"Este tipo de estudios, hacen una contribución importante e interesante a la medicina evolutiva, un campo de investigación que investiga el desarrollo y el comportamiento de las enfermedades a lo largo del tiempo", señala el profesor Israel Hershkovitz, del Departamento de Anatomía y Antropología de dicha universidad. "Estamos tratando de entender por qué ciertas enfermedades sobreviven a la evolución con el objetivo de descifrar sus causas para desarrollar formas nuevas y efectivas de tratarlas", concluye.

AGENDA

Exposición "Marte. La conquista de un sueño"
Abierta hasta el 31 de diciembre de 2020
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Av. Profesor López Piñero 7. Valencia

Marte ha despertado fascinación y curiosidad en el ser humano desde la antigüedad. Fue uno de los primeros planetas en ser observados a través de un microscopio, en 1610, y, desde mediados del siglo XIX, el interés y las especulaciones alrededor de este planeta no han dejado de aumentar.

Esta exposición nace con el objetivo de hacer llegar a sus visitantes todo lo que sabemos sobre el planeta rojo, tanto desde el punto de vista científico, como cultural e histórico. Para ello, se responden preguntas como ¿por qué despierta tanto interés? ¿En qué se distingue de otros planetas del Sistema Solar? y ¿Cuáles han sido los hitos de la carrera espacial hacia Marte? Además, la exposición cuenta con un módulo de realidad virtual para vivir la experiencia de desplazarse por la superficie marciana como un astronauta. También incluye piezas de gran valor histórico, libros e instrumentos astronómicos originales de los siglos XVI al XVIII del Museo Copernicano de Roma, un fragmento del meteorito de Marte caído el 3 de octubre de 1962 en Nigeria y una réplica del primer telescopio de Galileo Galilei.

La exposición está coproducida por la Fundación Telefónica y en ella han colaborado el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), la Agencia Espacial Europea (ESA) y el Instituto Nacional de Astrofísica de Italia (INAF).

REDES

@wyssinstitute
Cuenta oficial de Instagram del Instituto Wyss de la Universidad de Harvard, en la que se encuentran fantásticas imágenes microscópicas y las últimas noticias de sus investigaciones en el campo de la bioingeniería.

@newscientist
Una de las mejores fuentes para las últimas noticias en todos los campos de la ciencia. Desde el cambio climático hasta el espacio exterior y los avances médicos.

Quantum Fracture
Canal de animaciones creado por el físico José Luis Crespo, dedicado a mostrar de manera breve y sencilla aspectos curiosos del universo.

National Geographic
Cuenta oficial de la revista National Geographic donde incluyen noticias, fotografías, vídeos sobre animales, espacio, medio ambiente, ciencia, historia y viajes.

LIBROS

La visión del mundo de la nueva física
Max Planck
Edición de Carlos M. Pina
Editorial Escolar y Mayo
Madrid, 2019

A principios del siglo XX, Max Planck presentó al mundo una explicación de la radiación del cuerpo negro que proponía que la luz estaba formada por unidades discretas a las que llamó cuantos. Fue el inicio de un proceso que rompió con los conceptos tradicionales establecidos hasta el momento y abrió un campo inexplorado, el de la física cuántica, convirtiéndose en una de las mayores revoluciones científicas y filosóficas de todos los tiempos. *La visión del mundo de la nueva física* nace de la traducción al castellano de la conferencia del mismo nombre pronunciada por Planck en 1929. En ella, el científico expuso las principales ideas de esta teoría, haciendo comprensibles conceptos como la cuantización de la energía, la ecuación de Schrödinger, el principio de indeterminación de Heisenberg y las ondas de materia. Además, Planck profundizó en las implicaciones que la nueva física tenía en la visión del mundo. Sin duda, la física cuántica supuso una revolución conceptual en la forma en la que el ser humano se dirige a la naturaleza para comprenderla, y estas líneas nos invitan a reflexionar sobre ello.

Mineralogía a tiro de click

La relación de los seres humanos con los minerales es mucho más estrecha de lo que parece a simple vista. Desde tiempos muy antiguos, estos han sido utilizados para la construcción de herramientas y edificios, la obtención de joyas, de abonos y fertilizantes, además de su presencia en la tecnología moderna y en los propios sistemas biológicos. Esta estrecha relación, lleva al nacimiento de la mineralogía, una compleja ciencia, muy cercana a la química y a la geología, que se ha convertido en un *hobby* para muchas personas. Ya sea por el afán de aprender o por mero interés coleccionista, el número de interesados no deja de aumentar. Para ellos puede resultar una herramienta muy útil la web del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid: http://greco.fmc.cie.uva.es/buscar_propiedades.asp

Se trata de una web que suministra información de alrededor de 3.000 términos de especies minerales y se complementa con un curso de mineralogía y química mineral y una guía geográfica que nos indica los yacimientos españoles donde buscar estos minerales. Además, nos permite realizar búsquedas filtrando por diferentes categorías: nombre, propiedades físicas y químicas, sistemática, por fórmula y por yacimiento. En muchos casos, esta información se complementa con fotografías y difractogramas de rayos X.

Los secretos genéticos del cáncer

El cáncer es una de las primeras causas de muerte a nivel mundial. En concreto, solo en España, se estima que los casos de cáncer diagnosticados en 2020 ascenderán a los 277.394 afectados. Más de 1.300 investigadores de 37 países del mundo han unificado sus esfuerzos en el proyecto Pan-Cáncer, el estudio más grande y completo de genomas totales de cáncer realizado hasta la fecha. El proyecto, cuyos primeros resultados han sido publicados en la revista *Nature*, ayudará a comprender las causas del cáncer, informará de las estrategias de prevención y ayudará a señalar nuevas direcciones para el diagnóstico y el tratamiento de la enfermedad. Se puede acceder a la información sobre este proyecto en el portal de datos del *International Cancer Genome Consortium*, https://dcc.icgc.org/ pcawg.

El cáncer está causado por cambios genéticos (mutaciones) en el ADN de una célula, lo que provoca que comience a dividirse sin control. Hasta el momento, se han analizado más de 2.600 genomas de 38 tipos de tumores diferentes, y se ha encontrado al menos una mutación causal para el 95% de los casos analizados. Cada una de estas mutaciones nos da pistas sobre cómo y por qué se desarrolló el cáncer y, además, puede ser una posible diana para el desarrollo de nuevos fármacos. "El estudio de estas mutaciones podría ayudar a diagnosticar algunos tipos de cáncer y saber a qué medicamentos podrían responder", afirma Steven Rozen, autor principal del trabajo y profesor de la Facultad de Medicina de Duke-NUS, Singapur.

Panorama

El Pleno aprueba las actuaciones del CSN dentro del Plan Nacional contra el Radón

El radón es un gas radiactivo que se produce de forma natural por la desintegración de uranio en zonas donde predominan rocas que contienen este elemento, como las graníticas. Al aire libre se disipa con facilidad, por lo que no suele presentar concentraciones peligrosas, pero tiende a acumularse en las viviendas de dichas zonas, donde pueden darse concentraciones elevadas. También es relevante su presencia en determinadas actividades laborales.

El Consejo de Seguridad Nuclear colabora con otras instituciones estatales, autonómicas y locales en el control de este gas y en las recomendaciones para su gestión. En el marco de estas competencias, el Pleno del CSN aprobó en su reunión del 11 de diciembre informar favorablemente la propuesta de actuaciones que llevará a cabo el organismo regulador en relación con el Plan Nacional contra el Radón.

De acuerdo con la propuesta, el trabajo del CSN se centrará en cinco actuaciones que responden a tres objetivos específicos: evaluar la exposición de la población al radón, promover la fiabilidad y la calidad de las determinaciones de concentración de este gas y reducir las exposiciones ocupacionales al radón.

Dichas actuaciones son:

—Desarrollar y actualizar el mapa del potencial de radón de España y coordinar e integrar los mapas de radón a escala regional o local.

—Estudiar las contribuciones a las dosis por radón del agua corriente y de los materiales de construcción.

—Organizar intercomparaciones periódicas de medida de la concentración de radón en el aire.

—Validar y mejorar las estrategias de muestreo temporal utilizadas para comparar el promedio anual de concentración de radón y el nivel de referencia.

—Facilitar la aplicación de la Publicación 137 Parte 3 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) a la evaluación de dosis por radón en lugares de trabajo con condiciones extremas.

Dentro del Plan, el CSN participará también como colaborador en diversas actuaciones impulsadas por otros organismos.

De manera complementaria al Plan Nacional, en España la exposición ocupacional al radón está regulada desde 2001, de manera genérica, por el título VII del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI). Adicionalmente, en 2011, se emitió la Instrucción IS-33 del CSN, que aclaraba los niveles de referencia y las medidas de control a aplicar en caso de superación de estos.

Encuentro bilateral con el presidente de la Agencia Portuguesa del Ambiente

El 14 de enero, una delegación del CSN, encabezada por la consejera Pilar Lucio, mantuvo un encuentro bilateral con la Agencia Portuguesa del Ambiente (APA), regulador en el ámbito de la protección radiológica, para firmar un memorándum de entendimiento entre ambos reguladores. Por parte de la APA, asistió su presidente, Nuno Lacasta, la vocal y miembro del consejo de Dirección, Ana Teresa Pérez y el director de Protección Radiológica y Emergencias, João Martins. Durante la sesión, se abordaron acuerdos y protocolos de cooperación para la formación de los técnicos encargados de inspecciones, evaluaciones y desmantelamiento, y la ubicación de las nuevas estaciones de medición ambiental.

El presidente del CSN participa en la Tercera Conferencia Internacional sobre Seguridad Física Nuclear

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) celebró el pasado mes de febrero en Viena la tercera edición de la Conferencia Internacional sobre Seguridad Física Nuclear (ICONS 2020) bajo el lema: "Mantener e intensificar los esfuerzos". La delegación española estuvo formada por el embajador español ante los Organismos Internacionales en Viena, Senén Florensa Palau, y una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, encabezada por su presidente, Josep Maria Serena i Sender. La ponencia española, presentada por Senén Florensa, subrayó el apoyo al OIEA en su labor de fortalecer la cultura de seguridad física nuclear y de mitigar amenazas a través de programas de entrenamiento y capacitación y apostar por la cooperación regional e internacional.

Reunión del comité de enlace entre el CSN y el Comité de Energía Nuclear

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, junto con su secretario general y sus directores técnicos, encabezados por el presidente, Josep Maria Serena i Sender, participaron el pasado 23 de enero en el comité de enlace entre el organismo regulador y el Comité de Energía Nuclear (CEN) de las empresas eléctricas propietarias de centrales nucleares. Por parte de este último asistieron representantes de Iberdrola, Endesa, Naturgy, EDP España y del propio Comité. Durante la sesión, se repasaron varias acciones relacionadas con los procesos de emisión y revisión de normativa; inspección; supervisión; y control y licenciamiento. En este apartado, destacó la incorporación de herramientas de gestión operativa de las actividades realizadas por estas empresas. También se realizó el seguimiento de los procesos de transición a las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento Mejoradas (ETFM) y de la norma de protección contra incendios NFPA-805.

El consejero Javier Dies expone en el OIEA las lecciones obtenidas de la misión combinada IRRS-ARTEMIS

El pasado 7 de febrero, el Grupo de Reguladores Europeos de Seguridad Nuclear (ENSREG) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) organizaron una reunión en Viena para la optimización de las misiones combinadas del Servicio Integrado de Revisión Reguladora (IRRS) y del Servicio Integrado de Revisión para la Gestión y Desmantelamiento de Residuos Radioactivos y Combustible Gastado (ARTEMIS). El consejero del Consejo de Seguridad Nuclear, Javier Dies, participó en el encuentro con el propósito de compartir las lecciones aprendidas en España para integrar mejor los procesos de preparación y ejecución de estas misiones cuando se realizan de forma combinada, ya que España acogió la primera misión conjunta IRRS-ARTEMIS en 2018.

Comité de Enlace entre el CSN y ENSA

El Comité de Enlace entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la empresa ENSA, Equipos Nucleares S.A., mantuvo su segunda reunión el 27 de febrero en la sede de la empresa cántabra. La delegación del CSN estuvo encabezada por su presidente, Josep Maria Serena i Sender, a quien acompañaron los consejeros Javier Dies y Elvira Romera y el director técnico de Seguridad Nuclear, Rafael Cid. La representación de ENSA estuvo encabezada por el presidente de la empresa, José David Gomila.

En el encuentro se repasó el estado de las actividades de licenciamiento previstas para 2020 en las que ENSA está implicada, se analizaron indicadores como la cantidad de contenedores fabricados y el de los cargados con elementos de combustible en las centrales nucleares de Almaraz y Trillo y, finalmente, se propusieron varias oportunidades de mejora aplicables a ambas instituciones para optimizar los procesos de licenciamiento y establecer posibles colaboraciones en proyectos de I+D+i. La jornada finalizó con una visita a las instalaciones de Ensa, empresa que suministra grandes componentes y servicios a centrales nucleares de todo el mundo.

Encuentro con la Asociación de Municipios en Áreas de Centrales Nucleares

El pasado 11 de febrero tuvo lugar, en la sede del Consejo de Seguridad Nuclear, la primera reunión entre el organismo regulador y la Asociación de Municipios en Áreas de Centrales Nucleares (AMAC) tras las renovaciones realizadas en las cúpulas de ambas entidades. La reunión fue coordinada por la consejera del CSN Pilar Lucio, con el apoyo de los consejeros Elvira Romera, Javier Dies y Francisco Castejón. Por parte de la AMAC asistieron su presidente, Juan Pedro Sánchez Yebra, su vicepresidente, su secretaria general y el asesor de la asociación. Durante la sesión, se realizó un repaso al convenio marco firmado en 2003 y a los diferentes acuerdos específicos que en el pasado han mantenido ambas instituciones. Para el CSN esta colaboración resulta de gran interés, ya que se encuadra en las responsabilidades del organismo regulador relacionadas con la transparencia y comunicación a la población.

El CSN acoge la reunión para la elaboración del informe nacional sobre la Directiva europea de seguridad nuclear

El pasado 24 de febrero tuvo lugar en el Consejo de Seguridad Nuclear la reunión de lanzamiento del informe anual de la Directiva 2014/87/Euratom sobre seguridad nuclear. La sesión estuvo presidida por la consejera Elvira Romera y acudieron representantes del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (Enresa), de la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA) y del Comité de Energía Nuclear (CEN). Durante el encuentro, se acordaron las directrices para la elaboración del citado informe, que es de especial relevancia, ya que describe el compromiso de España con la seguridad nuclear.

Premio al Directorio de la Energía, en el que colabora el CSN

El Consejo de Cooperación Bibliotecaria, dependiente del Ministerio de Cultura y Deporte, entregó la *Distinción del sello CCB* en la categoría de bibliotecas especializadas al *Directorio de la energía,* un repositorio muy completo de información sobre la energía, coordinado por el Foro Nuclear, en el que participan varias empresas e instituciones, entre ellas la biblioteca del Consejo de Seguridad Nuclear.

El Directorio recopila las principales fuentes de información para el sector energético, incluyendo las referidas a Seguridad Nuclear y Protección Radiológica. Es fruto de la colaboración entre centros de información y documentación de los diferentes participantes y destaca el catálogo colectivo de publicaciones periódicas, que recoge todas las revistas suscritas por las bibliotecas integrantes y es de acceso restringido para los miembros del Comité. Está disponible *online* de forma gratuita en: www.directoriodelaenergia.es

El cuerpo técnico se refuerza con 24 nuevos funcionarios

El pasado 3 de marzo comenzaron su programa de formación práctica los 24 nuevos funcionarios que se incorporarán al Cuerpo Técnico de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica del Consejo de Seguridad Nuclear, tras superar las pruebas de acceso, de acuerdo con la oferta de empleo público de 2018, lo que supone un impulso a la gestión y transmisión del conocimiento necesaria para renovar la capacidad técnica de la plantilla del CSN.

Los nuevos funcionarios en prácticas fueron recibidos por los miembros del Pleno del CSN y los directores y subdirectores técnicos, que les dieron la bienvenida. El presidente del organismo, Josep María Serena i Sender, les felicitó por superar la oposición y recordó que se unen a un organismo que vela por la seguridad nuclear y por la protección radiológica, siendo la seguridad, la transparencia y la confianza las marcas de identidad que definen a todos los que configuran esta institución reguladora. En la anterior oferta pública de empleo, de 2017, se incorporaron ocho nuevos técnicos.

El Pleno recibe a la Sociedad Española de Protección Radiológica

El presidente y la vicepresidenta de la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR), Ricardo Torres Cabrera y Teresa Macías, respectivamente, visitaron el pasado 3 de marzo la sede del Consejo de Seguridad Nuclear, donde fueron recibidos por el Pleno del organismo regulador, su secretario general y los directores técnicos.

La SEPR presentó a su nueva junta directiva y explicó las actividades que contempla su Plan Estratégico 2019-2023, y recordó que este año se cumple su 40º aniversario. También anunció que presentarán en Seúl, durante la celebración en mayo del 15º Congreso Internacional de la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA), su candidatura para organizar en España la edición de este evento, en 2028, que contará con el apoyo del CSN.

Durante el encuentro, ambas instituciones han valorado la posibilidad de firmar un convenio marco de colaboración para impulsar las actuaciones conjuntas y mejorar la calidad de la protección radiológica en España.

Principales acuerdos del Pleno

Propuesta de expedientes sancionadores y apercibimientos a Garoña, Almaraz y Ascó

En sus reuniones del 27 de febrero y 6 de marzo el Pleno del Consejo acordó proponer la apertura de un expediente sancionador a los titulares de las centrales nucleares Santa María de Garoña y Almaraz, respectivamente. En el primer caso, el motivo de la propuesta es la identificación de desviaciones en el objetivo anual de dosis colectiva, que incumplen el manual de protección radiológica en cese de explotación. En el caso de Almaraz, se incumplió un apartado de la Instrucción Técnica Complementaria número 11 de la vigente autorización de explotación, relacionada con la implantación de instrumentación fija de caudal en alguna de las unidades de filtración. Asimismo, se aprobó un apercibimiento leve al titular de la central nuclear de Ascó por no remitir al CSN los informes correspondientes a los resultados de las campañas de vigilancia de pretensado del edificio de contención. Todas ellas son infracciones leves, ya que no han tenido repercusión en la seguridad de las personas, del medioambiente o de la instalación.

Instrucción de Seguridad IS-44 sobre planificación, preparación y respuesta ante emergencias de las instalaciones nucleares

El Pleno del CSN aprobó, en su reunión del 27 de febrero, la nueva Instrucción IS-44 sobre requisitos de planificación, preparación y respuesta ante emergencias de las instalaciones nucleares. Esta normativa busca consolidar en un único documento los aspectos fundamentales que deben seguir los titulares de las centrales nucleares españolas para gestionar de forma adecuada una emergencia en el interior de las instalaciones nucleares, tanto en cada una de las fases de vida, como durante el almacenamiento de material nuclear en sus instalaciones. Esta nueva IS no busca suplir ninguna laguna normativa sino consolidar en un único documento todos los apartados que permiten una adecuada gestión de emergencia en el interior de las instalaciones nucleares.

Revisión 1 de la Guía de Seguridad GS-10.10 sobre cualificación y certificación de personal que realiza ensayos no destructivos

En su reunión del 20 de febrero, el Pleno del CSN realizó la primera revisión de la Guía de Seguridad GS-10.10 relativa a la cualificación y certificación del personal que realiza ensayos no destructivos de las estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad de las instalaciones nucleares españolas. Estas guías de seguridad son documentos técnicos de carácter no obligatorio con los que el CSN dirige orientaciones a los sujetos afectados por la normativa vigente en materia de seguridad nuclear y protección radiológica.

Acuerdos con diversas universidades españolas en relación con los programas de vigilancia radiológica ambiental en España

El Pleno del Consejo, en su reunión del 18 de diciembre, aprobó la propuesta de firma de convenios con diferentes universidades del territorio nacional, en relación con los programas de vigilancia radiológica ambiental en España. Por un lado, se propusieron convenios específicos con las universidades de León, Salamanca, Cáceres y Sevilla (en colaboración con las de Granada y Málaga) para desarrollar los Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental Independiente (PVRAIN) a lo largo de los cuatro próximos años (2020-2023) en los entornos de la central nuclear Santa María de Garoña, la fábrica de combustible nuclear de Juzbado y la planta Quercus, la central nuclear de Almaraz, la clausurada fábrica de uranio de Andújar y el centro de almacenamiento de El Cabril, respectivamente. Por otro lado, se aprobaron convenios con 19 universidades de todo el territorio nacional, incluidos ambos archipiélagos, para el desarrollo de los programas de vigilancia radiológica ambiental en España que se denominan Red de Estaciones de Muestreo (REM), en cumplimiento de las funciones y compromisos internacionales en este campo.

Criterio para fijar el inicio de la vida de diseño de las centrales nucleares

En su reunión del 13 de noviembre, el Pleno del CSN aprobó la propuesta de establecer un criterio homogéneo que fije la fecha de inicio de la vida de diseño de las centrales nucleares españolas. Esta fecha se ha establecido en la primera conexión a la red eléctrica, momento a partir del cual diversas estructuras, sistemas y componentes (ESC) comienzan a estar expuestos a los efectos ambientales de temperatura, presión y radiación inherentes al funcionamiento normal de la instalación. La vida de diseño se aplica a las ESC y se define como el "tiempo de funcionamiento estimado en el diseño, durante el cual se espera que cumpla con su función". En el caso de las centrales nucleares españolas se ha realizado una hipótesis de vida de diseño de 40 años.

Publicaciones

Resultado de la vigilancia de los trabajadores controlados mediante dosimetría individual
Año 2015
Informe Sectorial

Iniciativa Española para el Mantenimiento, Aplicación y Mejora de los Códigos de Simulación Termohidráulica
Proyecto CAMP-España 2009-2013

Real Decreto 601/2019, sobre justificación y optimización del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas

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

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 Radiations to save the oceans

The International Atomic Energy Agency (IAEA) contributes to research into the dangers threatening the health of our oceans and the species that inhabit them. For this purpose it has several laboratories located in Monaco in which radioactive sources are used to analyse sediments and track contaminants.

19 The radioactive orchestra

In 2011, following the Fukushima accident, a group of Swedish scientists and artists decided to set up a project aimed at spreading the message that we live alongside radiation in our daily life. They designed a system to convert into musical notes the frequencies of the radiations emitted by different radioactive isotopes on decaying, thereby producing a record that enjoyed some critical acclaim and public success.

33 PET+MR, a revolutionary alliance

A new technology based on the combination of positron emission tomography and magnetic resonance is revolutionising diagnostic imaging. It allows two tests to be carried out simultaneously and the radiation dose received by the patient to be reduced. However, its high price and the lack of bibliographic references play against it.

38 Space travel with atomic accuracy

NASA is testing a prototype atomic clock known as DSAC aimed at improving the accuracy of navigation in space and allowing global positioning and satellite systems to be deployed on other planets. The novelty of this apparatus is its small size, a necessity when it comes to equipping space vessels.

53 Emmy Noether. The mathematician who changed the course of physics

Emmy Noether opened up a path for herself through the tangle of sexist prejudice affecting the academic world in the first half of the 20th century, emerging as an outstanding mathematician whose work had an enormous influence on the physics of the time. Figures of the importance of Albert Einstein and David Hilbert publicly expressed their admiration for her.

RADIOGRAPHY

24 A new shelter for Chernobyl

In 2019, following twelve years of construction, the gigantic structure that encompasses the Ukrainian nuclear power plant was completed. This structure, which weighs 30,000 tons, is designed to prevent the facility from having any radiological impact on the surrounding environment for at least a century.

INTERVIEW

26 Francisco Martínez Mojica, microbiologist and discoverer of the CRISPR system

"CRISPR is a toolbox with applications in all the life and health sciences".

TECHNICAL ARTICLES

12 Dosi-app: Mobile application for the dosimetry control of personnel intervening in nuclear and radiological emergencies

With a view to gaining insight into and managing the radiation doses received by workers intervening in nuclear and radiological emergencies, the CSN has created the application Dosi-app, which allows the control of the doses received by each such worker to be improved in order to be able to assess his or her interventions from a radiological point of view.

46 What is operating experience and why is it everybody's responsibility?

Learning from one's own mistakes and from those of others is an increasingly important tool in many different sectors, since it allows us to prevent their repetition and avoid their effects. In the nuclear industry it has shown itself to be essential and is performed in accordance with internationally recognised protocols.

Súmate a los 135.000

Desde su inauguración en 1998, los 135.000 visitantes del Centro de Información del Consejo de Seguridad Nuclear han tenido ocasión de aproximarse al conocimiento sobre las radiaciones ionizantes, sus usos, sus riesgos y los controles y la protección que son necesarios para garantizar su utilización fiable, en la cual el CSN –como organismo encargado de la seguridad nuclear y la protección radiológica– juega un papel muy importante.

En la vida diaria utilizamos las radiaciones con una enorme frecuencia, tanto en relación con la salud y la medicina –en diagnóstico y en terapia– como también en la industria y en la investigación. A través de un recorrido guiado por los 29 módulos, se pueden conocer con detalle estos aspectos relacionados con las radiaciones. Consigue más información en www.csn.es/index.php/es/centro-informacion o pide cita en centroinformacion@csn.es Súmate a los 135.000.

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR