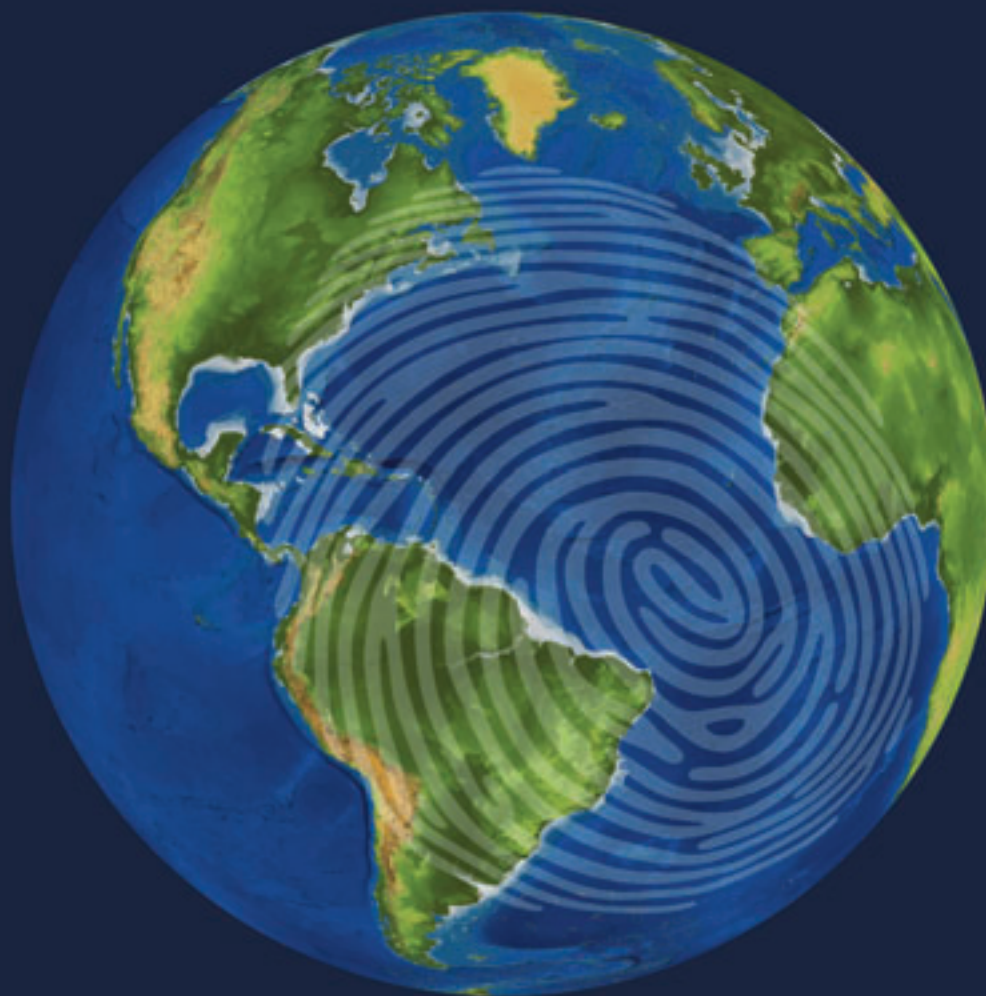




ANTROPOCENO: La huella humana en el planeta

Verificaciones de la Unión Europea sobre la vigilancia de la radiactividad en el medio ambiente

Javier Cacho, físico atmosférico y escritor: “El Tratado de Montreal sobre el ozono fue la primera gran victoria ambiental de la humanidad”

Harriet Brooks, la pionera que dejó su impronta en la tabla periódica y la radiactividad

¡Conecta con nosotros!



https://twitter.com/CSN_es



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



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



<http://www.csn.es>

Una nueva etapa en la historia geológica terrestre

Terminamos este 2021 analizando en Alfa la huella que los humanos estamos dejando en la Tierra con un reportaje sobre el Antropoceno, el nombre de un estrato nuevo en el registro geológico cuyo reconocimiento es motivo de debate científico. En cualquier caso, es una forma de llamar la atención sobre el impacto ambiental provocado por nuestra especie sobre la piel del planeta.

Si llegado el caso, debido a ese impacto,uviésemos que abandonar la Tierra, Marte tendría muchas papeletas para alojarnos. La NASA estudia nuevos diseños conceptuales de reactores nucleares para la propulsión espacial, como una tecnología más eficiente, que agilice las misiones tripuladas a grandes distancias.

Entre los reportajes de Alfa, nos adentramos en la materia oscura a la que la ciencia trata de poner cara después de que la astrónoma Vera Rubin dedujera su existencia en 1975 al estudiar la curva de rotación de las galaxias. Todo lo que percibimos del universo, como las galaxias y las estrellas, solo es una pequeña fracción de toda su materia, el 85 % es esa extraña materia oscura.

Además, conoceremos para qué se emplea la criomicroscopía electrónica o la manera de observar –con una resolución atómica– la estructura de las proteínas, virus, etc. Sus aplicaciones van desde el diseño de fármacos hasta el des-

arrollo de vacunas. En España, el Centro Nacional de Biotecnología ha adquirido el criomicroscopio electrónico más potente del mercado.

Cerramos la sección de reportajes repasando el Atlas Celular Humano, un proyecto que quiere completar el catálogo de todas las células de nuestro organismo, a partir de su expresión genética. El resultado permitirá nuevas aplicaciones biomédicas.

La NASA estudia nuevos diseños de reactores nucleares para la propulsión espacial, lo que permitirá agilizar las misiones tripuladas a grandes distancias

La científica canadiense Harriet Brooks es el perfil seleccionado para *Ciencia con nombre propio* y es que las convenciones sociales de finales del siglo XIX la obligaron a abandonar su labor científica, en la que destacó por sus aportaciones en el descubrimiento y caracterización del radón y la desintegración radiactiva secuencial, trabajando, entre otros, con James Rutherford.

En la entrevista charlamos con Jesús Cacho, quien, además de tener una isla con su nombre en las Shetland del Sur (la Isla Cacho), ha plasmado su fascinación profesional por la Antártida en más de media docena de libros. Este físico madrileño ha sido pionero y principal experto español en la capa de ozono de la estratosfera.

Las misiones de verificación contempladas en el artículo 35 del Tratado Euratom son el mecanismo de los Estados miembro de la Unión Europea para controlar permanentemente el nivel de radiactividad en la tierra, el aire y las aguas y permite a la Comisión comprobar el cumplimiento de los compromisos alcanzados en la protección de la población de los efectos de las radiaciones ionizantes.

La parte más técnica de Alfa se cierra con la metodología MORT, la forma de investigación de incidentes y accidentes principalmente en centrales nucleares. Además muestra el diseño de un programa óptimo de seguridad e indica cómo identificar los descuidos y riesgos asumidos por una organización en el establecimiento y la supervisión de sus programas de seguridad.

Aprovechando que este número 48 ha llegado a tus manos, desde Alfa quedamos deseando unas Felices Fiestas y un año 2022 lleno de positividad. 

ALFA

Revista de seguridad nuclear
y protección radiológica
Editada por el CSN
Número 48
Diciembre 2021



Comité Editorial

Josep Maria Serena i Sender
Pilar Lucio Carrasco
Francisco Castejón Magaña
Elvira Romera Gutiérrez
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. Trabajo del Camino
24010 León

Fotografía de portada

Recreación de una huella humana
sobre la superficie terrestre.

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 Antropoceno, la huella geológica humana

En la Tierra se pueden observar los distintos estratos rocosos que se han ido formando en el transcurso de su historia, cada uno a lo largo de millones de años. Numerosos científicos plantean ahora que la presencia humana y su impacto ambiental pueden considerarse un nuevo período en la historia geológica de nuestro planeta.

12 Propulsión nuclear para viajar a Marte y más allá

Hasta ahora, la tecnología de propulsión química ha conformado a los cohetes lanzados al espacio. Sin embargo, la NASA estudia la posibilidad de utilizar energía nuclear, capaz de ensanchar los horizontes de las misiones, lo que permitiría viajar a regiones más alejadas del sistema solar y llevar a cabo exploraciones de momento inabordables.

32 Los hilos transparentes del cosmos

Todo aquello que somos capaces de percibir del universo, como las galaxias y las estrellas, solo conforma una pequeña fracción de toda su materia, ya que el 80% es la denominada materia oscura, de cuya existencia sabemos por sus efectos gravitatorios, pero que aún no ha sido detectada, dado que no emite ningún tipo de radiación electromagnética.

37 De la célula al átomo

La microscopía electrónica a muy bajas temperaturas, o criomicroscopía, una tecnología que mereció el premio Nobel de Química 2017, ha conseguido resoluciones atómicas y sus aplicaciones son cada vez más destacables, incluido el diseño de fármacos y vacunas contra las espículas del virus SARS-CoV-2, causante de la covid-19.

50 El mapa íntimo de los humanos

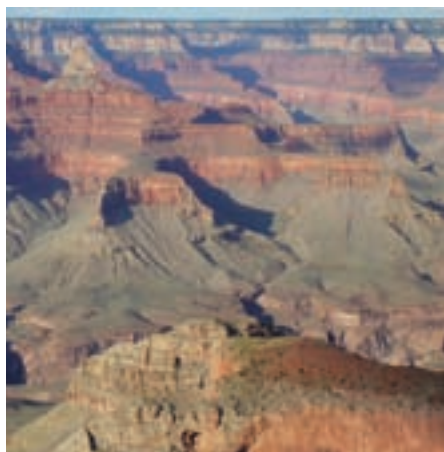
Un proyecto internacional, en el que participan científicos españoles, intenta completar el catálogo de todas las células de nuestro organismo, a partir de la expresión genética de cada una de ellas y sus propiedades. El resultado permitirá nuevas aplicaciones biomédicas en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades.

CIENCIA CON NOMBRE PROPIO

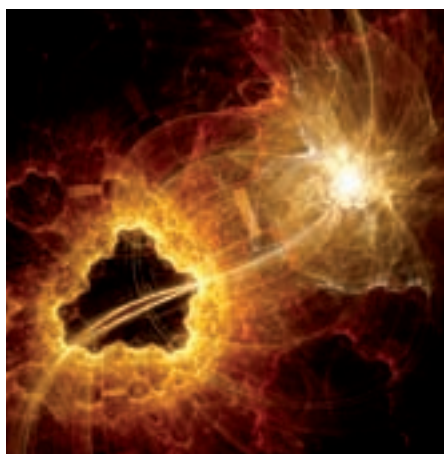
56 Harriet Brooks, la pionera que dejó su huella en la tabla periódica y la radiactividad

A principios del siglo XX una científica canadiense, Harriet Brooks, tuvo un papel determinante en la física nuclear, con aportaciones en el descubrimiento y caracterización del radón y la desintegración radiactiva secuencial; batallando frente a las convenciones sociales de su época, que le llevaron a abandonar muy pronto su labor científica.

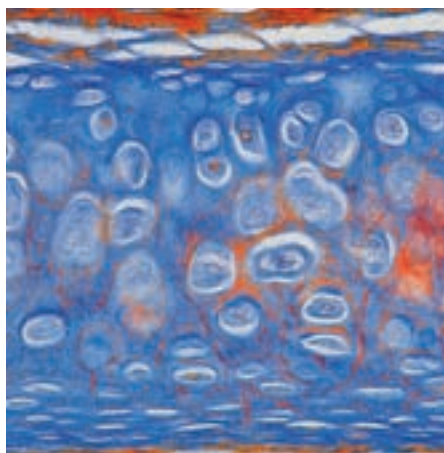
IFB



DEPOSITPHOTOS



JOSEP MARIA BARRÉS / ISTOCKPHOTO



RADIOGRAFÍA

26 La recarga de combustible en las centrales nucleares

Los elementos combustibles de los reactores nucleares deben ser renovados periódicamente para su correcto funcionamiento. En estas paradas de recarga, además, se ejecutan pruebas y modificaciones de las instalaciones y los equipos, para asegurar la viabilidad del siguiente ciclo de operación.

ENTREVISTA

28 Javier Cacho, físico atmosférico y escritor

“El Tratado de Montreal sobre la capa de ozono fue la primera gran victoria ambiental de la humanidad”.

ARTÍCULOS TÉCNICOS

18 Árbol de Gestión de Riesgos y Descuidos (MORT)

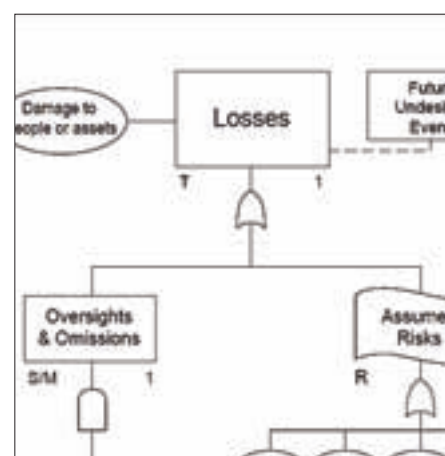
MORT es una metodología de investigación de los incidentes y accidentes que se producen en el curso de un proceso tecnológico. Muestra el diseño de un programa óptimo de seguridad y, por otro lado, indica cómo identificar los descuidos y riesgos asumidos por una organización en el establecimiento y la supervisión de sus programas de seguridad, susceptibles de conducir a un accidente.

43 Verificaciones de la Unión Europea sobre la vigilancia de la radiactividad en el medio ambiente

El artículo 35 del Tratado de Euratom está dedicado a velar por la seguridad de la población, protegiéndola de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. Para ello, obliga a los Estados miembros a controlar permanentemente el nivel de radiactividad en la tierra, el aire y las aguas y permite a la Comisión Europea comprobar el cumplimiento de los compromisos alcanzados en esta materia.



LUCÍA CASAS



ENSA

62 Reacción en cadena

66 Panorama

69 Acuerdos del Pleno

70 Publicaciones

71 Abstracts



La sucesión de estratos se aprecia con claridad en el Gran Cañón del Colorado. Su formación se produce a lo largo de millones de años.

Los científicos debaten sobre la existencia o no de unos estratos rocosos caracterizados por la destrucción ambiental provocada por nuestra especie

Antropoceno, la huella geológica humana

En el 2002, el premio nobel de química Paul Crutzen popularizó una nueva palabra, Antropoceno, para describir la etapa actual en la que la humanidad está provocando una gran degradación del medio ambiente. Desde entonces, los geólogos discuten si incluirlo como un periodo más de la historia geológica de la Tierra. Sus defensores lo consideran justificado, dado el aumento brusco de la temperatura media de la tierra, la concentración de gases de efecto

invernadero, el desencadenamiento de la sexta extinción y la acumulación de deshechos, entre otros efectos de la acción humana. Los detractores, en cambio, consideran que dentro de millones de años no quedará vestigio del hombre, ni de sus plásticos, ni de sus grandes edificios... ni de sus residuos nucleares. La Unión Internacional de Ciencias Geológicas no ha tomado todavía una decisión al respecto.

■ Texto: **Elvira del Pozo** | Periodista de ciencia ■

La Tierra existe desde hace unos de 4.600 millones de años. El *Homo sapiens* apareció hace apenas 300.000. De momento, somos tan efímeros como nos parecen a nosotros las flores de un día. O menos: si condensamos la historia del planeta en un año —cada día simbolizaría unos 13 millones de años—, el hombre actual aparecería el 31 de diciembre sobre las 23:30 de la noche. Un parpadeo estelar.

Sin embargo, la ciencia señala como decisivos a los descendientes del humano que creó la máquina de vapor y cubrió de hollín, literalmente, hasta el hielo de los polos. Nos considera responsables del cambio climático más drástico desde que existe el género *Homo* (2,5 millones de años) y de la posible sexta extinción masiva que ha conocido la Tierra. Nuestra especie, además, ha hecho lo que ninguna otra antes: ha creado nuevos materiales, como los plásticos; o como el plutonio-239, el isótopo radiactivo creado artificialmente que provocó la explosión de Fat Man, la bomba nuclear que arrasó Nagasaki (Japón) y puso fin a la Segunda Guerra Mundial. Trazas de ambos, plástico y plutonio, se detectan ya en toda la superficie del planeta.

Tal es el enorme impacto de la civilización humana sobre los ecosistemas

terrestres que algunos investigadores consideran que estamos inmersos en una época geológica distinta, el Antropoceno (del griego *anthropos*, hombre, y *kainos*, nuevo). La conocida como Edad del Hombre sucedería e incluso reemplazaría a la actual, el Holoceno, que comenzó hace unos 12.000 años, tras el retroceso de la última glaciación. La propuesta está ganando adeptos, aunque todavía no hay consenso entre la comunidad científica.

La palabra Antropoceno la popularizó en el 2002 el premio Nobel de química Paul Crutzen. En pocos años, pasó de ser un término informal para describir la época en la que vivimos una gran degradación del medio ambiente por parte del hombre, a ser objeto de debate como un posible escalón dentro de la estrati-

grafía geológica de la Tierra. Palabras mayores porque cada periodo geológico tiene unas características y unos límites muy marcados. Tanto es así que dos décadas después, la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, que es la que tiene la última palabra en la materia, todavía no se ha pronunciado. Entre las dudas está saber si esos cambios de origen antropogénico son suficientemente profundos, universales y duraderos... geológicamente hablando, claro, como para tener suficiente entidad reconocible dentro de millones de años.

Según Ana María Alonso, directora del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), en la conferencia que impartió recientemente sobre la materia, para saber si el Antropoceno tiene sen-

Abajo, acumulación de residuos plásticos. A la derecha, Ana María Alonso.



De color de rosa

La enorme producción de carne que demandamos toda la humanidad ha hecho que el pollo industrial (*Gallus gallus domesticus*) sea la especie más común de aves y de animales en cautividad; y la más extendida en todo el mundo, donde se comen 60.000 millones al año. Donde hay humanos, hay pollos. Es tal su omnipresencia que sus huesos, arrojados al medio tras ser engullida la carne que les rodea, son considerados como la señal global que podría quedar en el suelo y mostrar el paso del hombre moderno por la Tierra.

Y ahí es donde aparece el Pink Chicken Project (pinkchickenproject.com), una iniciativa que pretende modificar genéticamente a estas aves con el fin de hacer su esqueleto más perdurable. Y además, teñirlo de rosa. ¿Con qué propósito? Quieren crear una especie de cápsula del tiempo en forma de estrato rosado con los huesos de la comida favorita del protagonista del Antropoceno. Con un mensaje, codificado en el ADN del animal, que le revela al observador del futuro las malas prácticas antrópicas que devastaron el planeta. Para que no vuelva a repetirse. ▶

PINK CHICKEN PROJECT



tido hay que responder tres preguntas: “¿Ha cambiado la humanidad el sistema Tierra lo suficiente para que los depósitos geológicos que se están formando sean distintos a los del Holoceno? ¿Esto sucede en todo el planeta? ¿Perdurará en el tiempo?”.

Las hojas del libro de piedra

Los geólogos estudian el origen, evolución y estructuras de la Tierra y para ha-

cerlo miran algo que puede durar tanto como ella: las rocas. No el clima, no el agua, no la cantidad de animales y selvas que existen. Solo rocas. Éstas van creando capas, unas encima de otras, con distintas formas y composiciones en función de qué estuviera pasando a su alrededor en el momento de su formación, como los anillos de un tronco cortado. Cada estrato del suelo es una hoja de un libro donde se pueden leer millones y millones de

años de historia de nuestro planeta. Eso sí, lo que no esté reflejado en él, no existe en geología.

¿El rastro humano aparece en esa novela de piedras? Aparece. “Se han identificado minerales nuevos de origen antropogénico a partir de elementos industriales como ladrillos, hormigón, plásticos... que al liberarse en el medio se han integrado en las rocas sedimentarias, en las superficies terrestres y en océanos de todo el mundo”. Alonso se refiere, por ejemplo, a los depósitos de varios metros de espesor de rocas sedimentarias formadas por escombros arrojados en zonas del mar Cantábrico durante años por las industrias siderometalúrgicas y que pueden reconocerse en algunas costas del norte de España”.

También ha dejado huella la humanidad en el tipo y cantidad de sedimentos líticos. “Su actividad ha acelerado tanto los procesos erosivos que la sedimentación debida a la acción humana es 24 veces superior a la generada por todos los ríos del mundo”, cuenta Alonso. El principal responsable de este proceso sedimentario es el paso de la vida nómada a la agricultura de nuestros antepasados durante el Neolítico; poco después del inicio del Holoceno. En cambio, el hielo polar refleja cambios bruscos en épocas más recientes: “Concentraciones de CO₂, de metano, de nitratos y otros indicadores geoquímicos han experimentado un aumento importante desde la última mitad del siglo pasado, lo que diferencia a estos registros de los del resto del Holoceno”, apunta Alonso.

Otro de los aspectos en los que hay evidencia científica de que el hombre moderno está directamente involucrado es en la actual desaparición masiva de especies: una de cada ocho está en riesgo de extinguirse en las próximas décadas, alerta el último informe de la Plataforma Intergubernamental sobre la Biodiversidad y los Servicios de los Ecosistemas (IPBES), impulsado por la ONU. Y, ¡sor-



Restos industriales cementados. Playa de Azkorri, Getxo, Euskadi.

presa!, eso también está plasmándose en el registro geológico. “Se han observado restos de especies invasoras —una de las principales causas de este fenómeno— en registros sedimentarios”.

Sin embargo, pese a todas estas evidencias, a escala de tiempo geológico, hay un sector de la comunidad científica que contempla que en realidad los humanos no están dejando un gran impacto en los cuerpos sedimentarios de la Tierra o que estos son extremadamente escasos. “Dentro de 100.000 años —que no es nada en geología—, ¿qué más dará lo que haya sucedido?”, se pregunta el geólogo y paleontólogo del Instituto de Geociencias del Consejo Superior de Investigaciones Científicas Juan Carlos Gutiérrez-Marco. En su opinión, no quedará resto de los llamados tecnofósiles, en referencia a los

artefactos creados por el hombre como edificios y máquinas electrónicas. “No habrá plásticos, porque los más lentos tardan en descomponerse poco más de 1.000 años; tampoco quedarán restos de los isótopos radiactivos que se crearon durante las bombas nucleares porque el que más perdura desaparece a los 24.000 años. En definitiva, apenas va a quedar un testimonio geológico del paso del hombre por el planeta”. Y es tajante al declarar que “el Antropoceno no está escrito en las rocas, sino en la historia, en los periódicos, libros de historia o cualquier otro soporte de información”.

Clavo dorado

A los defensores del Antropoceno les aparece otra piedra del camino: ¿en qué momento específico los humanos co-

menzaron a influir en los estratos de roca? Esto es vital para dar por iniciada la época. Todos los peldaños geológicos se definen por un límite inferior a escala global, es decir, cuándo empiezan. Se denomina GSSP a un estrato global que se marca literalmente con un clavo dorado e indica la manifestación física de un cambio que se registra en la señal estratigráfica. Puede ser la aparición repentina de determinados organismos o bien una señal geoquímica o geofísica que refleja un fenómeno que se produce a nivel global. A veces, no hay un límite claro y se acuerda una edad de consenso.

La caída de un gran meteorito en la península del Yucatán (México) hace 65 millones de años quedó inmortalizada en una fina capa de unos tres milímetros de iridio, un metal escaso en

la Tierra, pero común en los asteroides. El impacto, equivalente a 100 millones de bombas atómicas, cubrió toda la superficie del planeta de polvo y acabó con el 70 por ciento de las especies de aquel momento, entre ellas los dinosaurios. Esa capa es en realidad una fina línea rocosa, de apenas 5 mm en las zonas más próximas al impacto, aunque aflora en distintas partes del globo (en Europa es de 1 mm) formando el conocido como límite K/T (ahora denominado K/Pg), y marca el final de Cretácico y comienzo del Paleógeno. “Eso es lo que se busca: un límite igual de claro y global para el Antropoceno”, explica Alonso.

WIKIPEDIA COMMONS



Los geólogos debaten si el momento en el que empieza esta posible nueva etapa es cuando desapareció la megafauna con la glaciación de hace entre 55.000 y 100.000 años. Otros plantean que pudo ser cuando el *Homo sapiens* desarrolló la agricultura, hace unos 10.000 años, lo que supondría un mero cambio de nombre del Holoceno al Antropoceno. También, se plantea un momento mucho más reciente, pero de alto impacto en el sistema Tierra, que sería el choque entre el viejo y el nuevo mundo, allá por el siglo XVI, que acarreó un intercambio de especies a uno y otro lado del Atlántico. Otra alternativa es el límite que se asocia con la revolución industrial, a partir de mediados del siglo XIX, debido al gran impacto dejado por el comienzo de la combustión masiva de carbón, con mayor incidencia en el noroeste de Europa. Y aún más cerca de nuestros días, se considera que el Antropoceno podría comenzar en el momento de la detonación de las primeras bombas nucleares, que liberaron isótopos radiactivos persistentes.

KIRK JOHNSON / NSF



Capa K/Pg cerca de Raton Pass, al sur de Colorado (EEUU).

Para Gutiérrez, discernir entre si uno u otro momento es más representativo del comienzo del cambio ocasio-

nado por la especie humana en la parte superficial de la Tierra es difícil, si no casi imposible. “¿Es más importante el paso del hombre prehistórico a la agricultura, que supuso la deforestación masiva y el aumento de los sedimentos? ¿O tuvo un mayor impacto el descubrimiento de la máquina de vapor, que cubrió con hollín hasta los glaciares polares?”

De todos los posibles inicios, parece que hay un mayor consenso en situar

el límite del Antropoceno en el año 1950. Las voces críticas señalan que los cambios que originaron la era industrial no fueron culpa de todo el ser humano sino de aquella parte que vive en países ricos, bajo regímenes capitalistas, cuyo objetivo es el crecimiento permanente y sin tener en consideración las limitaciones del sistema Tierra. Por ello, algunos pensadores que se refieren al momento actual como el Capitaloceno, que incorpora además otros procesos



Juan Carlos Gutiérrez-Marco.

humanos como el colonialismo, la globalización, el racismo y el patriarcado, como los verdaderos motores de un cambio de paradigma que estamos atravesando.

Gutiérrez no duda en resaltar que, se llame como se llame, “se trata de un cambio social, económico, ecológico... pero no geológico”. Y, en cualquier caso, “se trata de una invención interesada para provocar un cambio radical en el comportamiento humano desde el miedo

a los aspectos irreversibles de la sostenibilidad de nuestra especie y de los ecosistemas que habitamos”.

Evento, no etapa

En un intento de solucionar un dilema que anda más de dos décadas enquistado, el pasado septiembre el antropólogo de la Universidad de Stanford Andrew Bauer publicó una carta en *Nature*. En el escrito proponía que el Antropoceno pase a ser un evento geológico de los

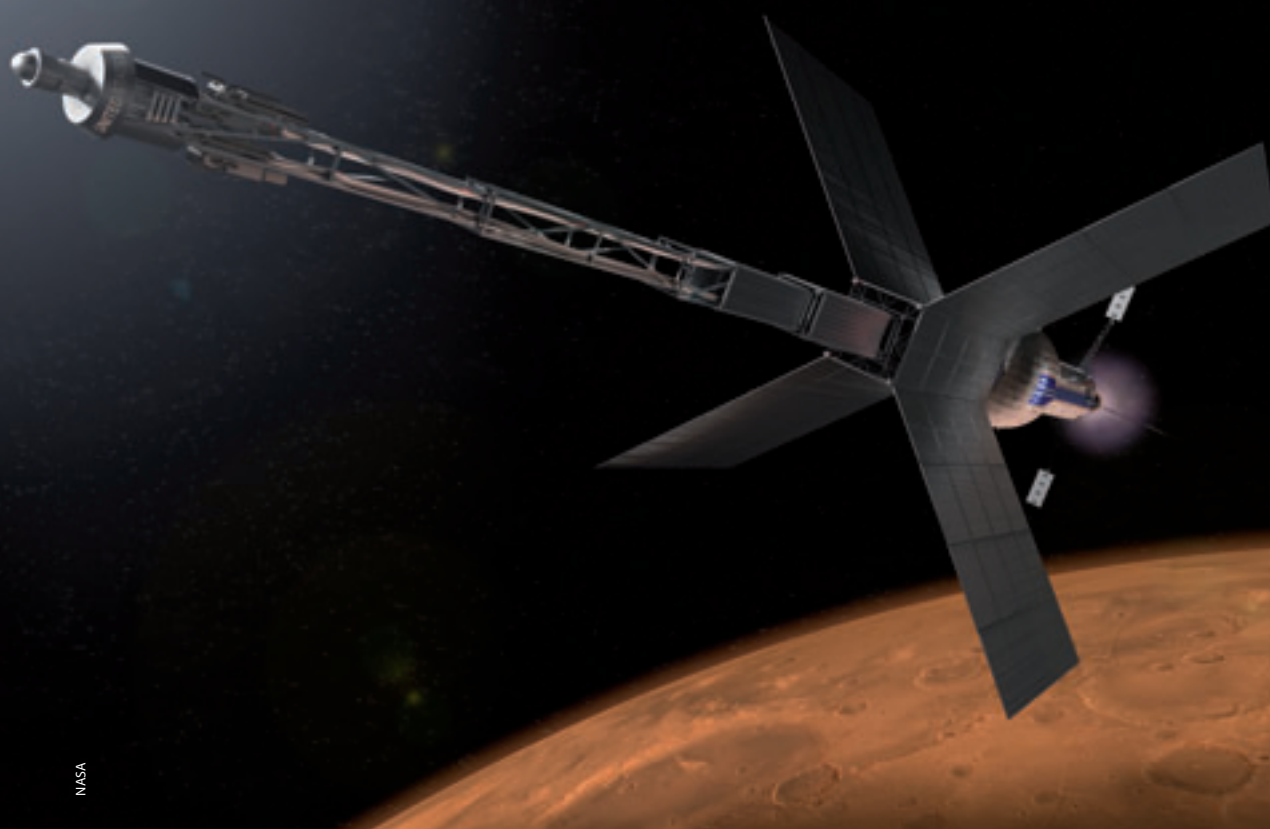
muchos registrados en la historia del planeta y no una etapa, que requiere un mayor encorsetamiento dentro de las reglas geológicas. Un evento fue la “Gran oxidación” de hace 2.400 millones de años, cuando las cianobacterias comenzaron a producir grandes cantidades de oxígeno atmosférico con la fotosíntesis, lo que provocó la extinción masiva de los microorganismos anaerobios dominantes entonces. También lo es “Gran biodiversificación del Ordovícico”, hace 466 millones de años.

“A diferencia de las unidades globales formalmente definidas, los eventos geológicos pueden abarcar la heterogeneidad espacial y temporal y los diversos procesos, ambientales y ahora sociales, que interactúan para producir cambios ambientales globales. Definir el Antropoceno de esta manera implicaría mejor cómo se ha utilizado y criticado el término en todo el mundo académico”, defiende la misiva que firman otros cinco investigadores.

“Esto tiene mucho más sentido que forzar su clasificación en la Tabla Cronoestratigráfica Internacional, donde la mayoría de los grandes eventos (evolutivos, climáticos, isotópicos, oceanográficos, paleomagnéticos, etc.) no necesariamente coinciden con límites cronoestratigráficos”, señala Gutiérrez. Es como plantearse subir un piso más en lugar de cambiar de edificio.

Por su parte, Alonso cree que sea o no finalmente considerado un término geológico, debemos plantearnos el concepto del Antropoceno. “Es innegable que estamos produciendo todos estos cambios en el sistema Tierra y nos llama a la responsabilidad y la reflexión, más allá de si es una época geológica o no, sobre cuál es nuestro papel en el planeta y qué estamos haciendo y dilucidar cómo arreglarlo. Aunque sea por egoísmo, porque nuestra supervivencia está amenazada”, concluye. ©

Ilustración de un posible vehículo de transporte de astronautas a Marte con un sistema de propulsión nuclear.



La NASA y el DOE exploran la viabilidad de utilizar reactores atómicos para acelerar las naves espaciales y las misiones tripuladas

Propulsión nuclear para viajar a Marte y más allá

La NASA y el Departamento de Energía estadounidense (DOE, por sus siglas en inglés) han aprobado la financiación de tres proyectos que deben culminar en diseños conceptuales de un reactor nuclear apto para la propulsión en el espacio. El objetivo es avanzar hacia una tecnología mucho más eficiente que los actuales cohetes de propulsión química para viajar a otros planetas y explorar las regiones más alejadas del sistema solar. Los tres contratos, de cinco millo-

nes de dólares cada uno, se han firmado en julio de 2021 con otras tantas empresas que disponen de un año para hacer el desarrollo conceptual y el diseño de un reactor adecuado. Según Jim Reuter, responsable de la dirección de Tecnologías de Misiones Espaciales de la NASA, es un paso importante hacia equipos que puedan impulsar nuevas misiones y realizar emocionantes descubrimientos.

■ Texto: **Alicia Rivera** | Periodista científica ■

La decisión de dar este paso tecnológico hacia la propulsión nuclear de misiones espaciales se apoya en un reciente informe favorable de las academias nacionales de EE. UU., encargado por la propia NASA. Dicho informe, no obstante, advierte que tanto la propulsión térmica nuclear (NTP) como la nuclear eléctrica (NEP) tienen que superar obstáculos significativos para ser utilizadas en una misión tripulada a Marte a finales de la próxima década, como se pretende.

Las ideas y los trabajos preliminares en estas tecnologías tienen ya una trayectoria en EE. UU., llena de altibajos, aunque parece que ahora ganan impulso, tal vez espolcados por las intenciones declaradas de otras potencias espaciales en el mismo sentido.

En 2018, por ejemplo, concluyeron en las instalaciones de alta seguridad en Nevada (EE. UU.), las pruebas de un nuevo reactor nuclear, denominado Kilopower, para su utilización en el espacio, según la revista *Physics Today*. Durante 28 horas, el reactor mantuvo una reacción en cadena controlada de uranio-235, que generó entre tres y cuatro kilovatios de energía térmica para producir electricidad. Y el interés por desarrollar esta tecnología se va concretando: en su plan presupuestario para 2022, la NASA propone una inversión de 585 millones de dólares en varios años para avanzar el ámbito de la propulsión nuclear. Los nuevos diseños y el desarrollo de nuevos materiales parecen despejar ahora el largo camino de esta tecnología.

Las potenciales aplicaciones militares no son ajenas a este desarrollo tecnológico. La Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para Defensa (DARPA) aprobó en abril de 2021 un contrato de 22 millones de dólares con la empresa General Atomic (California) para diseñar un pequeño reactor nuclear de propulsión espacial. Se trata de la primera fase de un proyecto de demostración cuyo

objetivo es “ensayar en órbita un sistema de propulsión térmica nuclear en 2025”, según informó SpaceNews.

Por su parte, Rusia y China no están dispuestas a quedarse atrás: ambas potencias han anunciado programas de propulsión espacial nuclear, que pretenden concretar con equipos en órbita hacia 2030 y 2045, respectivamente.

Mientras tanto, Reino Unido firmó en enero de 2021 un contrato de inves-

el trayecto, y esa posición adecuada tiene lugar, aproximadamente, cada 26 meses (por eso las diferentes misiones a Marte en las últimas décadas parece que parten en oleadas cada poco más de dos años). Pero en misiones tripuladas, los astronautas tienen que regresar a casa y “la espera de la alineación planetaria adecuada para el regreso exigiría que los astronautas permanecieran en el planeta vecino, tal vez sin mucho que hacer, du-



NASA/JPL-CALTECH

El generador termoelectrico del vehículo de exploración de Marte Curiosity se aprecia en esta fotografía tomada por las cámaras de a bordo en la superficie del planeta rojo.

tigación con la empresa Rolls Royce con la vista puesta en el mismo propósito: definir y dar forma a soluciones nucleares para la Agencia Espacial británica, sin perder de vista el horizonte de la Agencia Europea del Espacio (ESA).

Objetivo: Marte

Un sistema eficaz y seguro de propulsión nuclear agilizaría las misiones espaciales lejanas y acortaría los tiempos de viaje. En esto coinciden todos sus defensores.

“Hasta ahora, solo han viajado a Marte robots de exploración, que no necesitan regresar a la Tierra”, recuerda la NASA. Los viajes se planifican aprovechando la posición orbital óptima de la Tierra y el planeta rojo para minimizar

rante más de un año, lo que alargaría la misión de ida y vuelta a más de tres años”, continúa la NASA. “El objetivo es minimizar el tiempo de viaje de las tripulaciones a unos dos años y los sistemas de propulsión nuclear pueden permitir acortar el plazo y aumentar la flexibilidad y la eficiencia”, añade la agencia espacial estadounidense.

La duración de una misión a Marte, dependiendo de las estrategias de viaje adoptadas, podría reducirse a la mitad si el viaje se realiza con propulsión termonuclear, sostiene el DOE, recalando que en viajes más cortos los astronautas permanecerían menos tiempo expuestos a la radiación que soportarían durante el viaje interplanetario.

Radioisótopos para la exploración planetaria

Más de medio siglo llevan el Departamento de Energía estadounidense y las instituciones anteriores suministrando equipos nucleares para las misiones de exploración planetaria de la NASA. Son sistemas de energía de radioisótopos (RPS) que convierten en electricidad el calor generado en la desintegración del plutonio-238.

El DOE se encarga de fabricar, ensayar, analizar y proporcionar los RPS tanto a la NASA como a las misiones de Defensa. En concreto, “suministra dos tipos de sistemas: los que proporcionan electricidad, como los generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG); y las pequeñas unidades de calor de radioisótopos (RHU), que mantienen a temperatura adecuada los componentes de los artefactos espaciales”, explica este organismo.

El Laboratorio Nacional de Oak Ridge brinda materiales y equipos; el plutonio-238 se purifica y encapsula en el laboratorio de Los Álamos y el de Idaho monta el combustible encapsulado en fuentes de calor diseñadas para contener

el combustible en caso de accidente, además de integrar los equipos que se montan en los artefactos espaciales, mientras que el laboratorio de Sandia se encarga del desarrollo y el mantenimiento.

“Los sistemas RTG son ideales cuando los paneles solares no pueden suministrar la energía necesaria en sondas espaciales alejadas del Sol”, recalca el DOE.

El ejemplo más actual es el de los vehículos que están explorando la superficie de Marte: Curiosity (desde 2012) y su prácticamente gemelo Perseverance (desde 2021). La opción de los RTG resultó obvia tras la experiencia con los vehículos anteriores, Spirit y Opportunity, que, pese a su éxito como misiones en la superficie del planeta rojo, tuvieron que vérselas con el omnipresente polvo marciano, que cubría sus paneles solares restándoles eficacia, aunque en ambos se habían instalado RHU para mantener calientes los instrumentos de a bordo durante las frías noches marcianas. Pero esperar a que el viento barriera los paneles o abrirlos y cerrarlos para sacudir

NASA/MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER



En la década de 1960, Wernher von Braun, entonces director del Centro de Vuelos Espaciales Marshall, de la NASA, propuso utilizar sistemas de propulsión termonuclear para enviar una misión tripulada a Marte.

Y quien dice Marte, dice más allá: las nuevas tecnologías ensanchan el horizonte de la exploración veloz del espacio lejano tanto con misiones tripuladas como con robots.

La idea de la propulsión nuclear espacial no es una novedad en la NASA, que tuvo en marcha un programa para su desarrollo en los años sesenta. Entre 1959 y 1972, la Oficina de Propulsión Nuclear Espacial de la agencia realizó 23 ensayos de reactor en las instalaciones de la Comisión de Energía Atómica (AEC) en Nevada, recuerda Universe Today. La NASA y la AEC se embarcaron en el programa NERVA (Nuclear Engine Rocket Vehicle Applications) cuyo objetivo era desarrollar reactores nucleares para motores de cohetes. Pero los cambios de prioridades y los ajustes presupuestarios llevaron a la NASA a archivar estos trabajos a finales de 1972.

El célebre pionero espacial Wernher Von Braun, entonces director del Marshall Space Flight Center, miraba más lejos

el polvo constituía una tarea exasperante. Lo mismo sucede con los módulos fijos en el suelo de Marte. Y tanto el Generador Termoeléctrico de Radioisótopos Multimisión (MMRTG) del Curiosity como el del Perseverance han demostrado su eficacia.

Mucho antes, en 1977, fueron lanzadas al espacio las sondas Voyager 1 y Voyager 2 para realizar su histórica exploración de los planetas exteriores del Sistema Solar y que ahora ya viajan por el medio interestelar. En viajes tan lejanos, los RTG eran imprescindibles para generar energía a bordo y alimentar todos sus sistemas.

También la sonda Cassini, que entró en órbita de Saturno en 2004, llevaba RTG (tres unidades con 32 kilos de plutonio-238 de combustible). Pero el lanzamiento de la misión Cassini-Huygens, de la NASA y la Agencia Europea del Espacio (ESA), en 1997, provocó numerosas protestas en contra de la utilización de la energía nuclear, aglutinadas en la campaña Stop Cassini, que convocó manifestaciones en Cabo Cañaveral. Aun con todo, los análisis y pruebas de los expertos reiteraron que el riesgo con el plutonio-238 en el lanzamiento del cohete era “excepcionalmente bajo”.

Más reciente es la New Horizons que, con sus RTG que proporcionan electricidad y calor a la nave y sus instrumentos, sobrevoló Plutón en 2015 y continuó su viaje hacia el espacio interestelar.

Sin embargo, la ESA realizó su misión Rosetta al cometa Churyumov-Gerasimenko, entre 2014 y 2016, utilizando como fuente principal de energía dos enormes paneles solares, de 32 metros cuadrados cada uno, pese a que en su viaje se alejó hasta la distancia de Júpiter.

“Desde 1961, la NASA ha volado más de 25 misiones con generadores nucleares”, destaca la agencia espacial estadounidense. “Estos sistemas son fiables y eficientes”, recalca June Zakrajsek, directora del Programa de Sistemas de Radioisótopos para la NASA en el Centro de Investigación Glenn, en Cleveland. “Operan continuamente durante misiones de larga duración, independientemente de la luz solar, la temperatura, la radiación de partículas cargadas o las nubes y polvo en superficie; y nos permiten explorar desde el Sol hasta Plutón y más allá”.

aún y planteó en 1969 una misión a Marte con una tripulación de 12 astronautas, que viajarían en dos cohetes, cada uno impulsado por tres motores NERVA. Detalló incluso que dicha misión se lanzaría en noviembre de 1981 y descendería en el planeta rojo en agosto de 1982. “Aunque emprender esta misión será un gran reto nacional, no es un reto mayor que el compromiso de 1961 de poner a un hombre en la Luna”, comentó el genio alemán.

Una vieja idea

“Se utilizó energía nuclear en el espacio en satélites de EE.

UU. y de la URSS desde 1961 hasta 1988, cuando la ONU recomendó no colocar mas sistemas nucleares en órbita terrestre, y ambos países lo cumplieron”, explica Miguel Belló-Mora, ingeniero aeronáu-



Miguel Belló-Mora.

tico y director del Atlantic International Research Centre (AIR Centre), con sede en Lisboa. “Eran, básicamente, reactores nucleares de fisión con uranio 235 y en 2001 todavía quedaban en órbita 33 sis-

temas rusos y uno estadounidense; los más numerosos, hasta 31, fueron los del programa RORSAT (Soviet Radar Ocean Reconnaissance Satellite Programme). En total, entre 1961 y 1988 se pusieron en órbita 1.600 kilos de material procedente del núcleo de los reactores y 1.000 kilos de combustible, sobre todo uranio y plutonio”, añade Belló-Mora.

“Los accidentes nucleares más importantes que generaron esos artefactos fueron el del Cosmos 954, al caer el 24 de enero de 1978 sobre Ca-

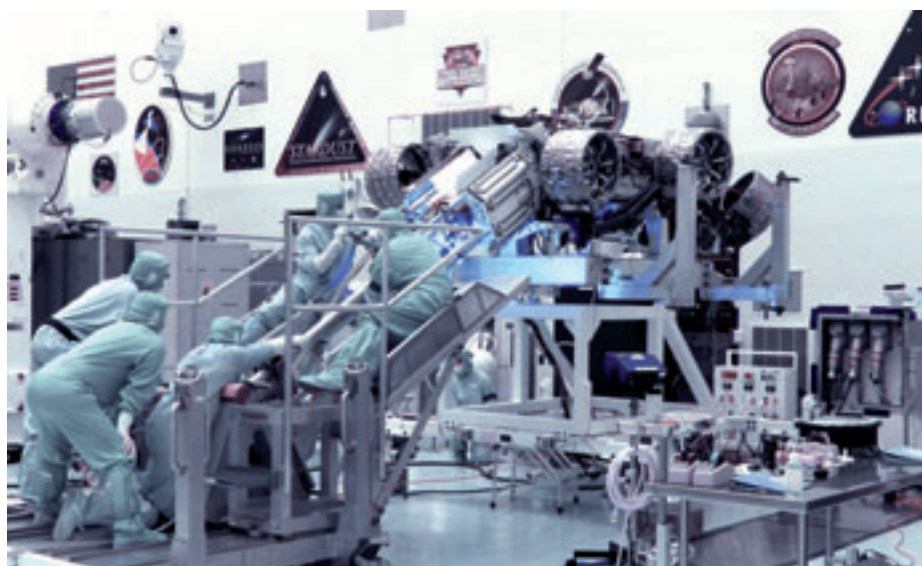
nadá y dejar una huella radiactiva de 2.000 kilómetros de largo, desde Fort Providence hasta Baker Lake, y el del Cosmos 1402, el 7 de febrero de 1983, que cayó sobre el Atlántico Sur. Por tanto, no

podemos olvidar que estos sistemas pueden provocar accidentes y que estos accidentes pueden ser muy serios”, añade este experto.

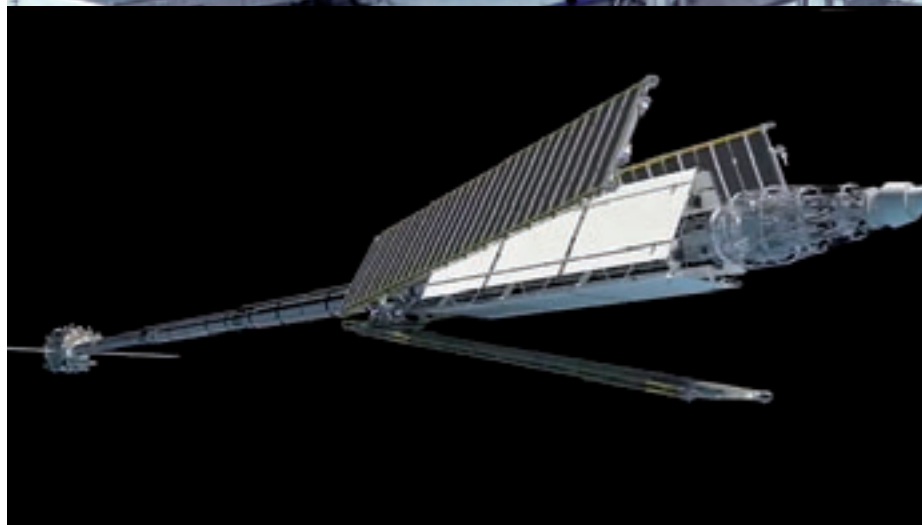
La propulsión nuclear eléctrica “utiliza un reactor para generar electricidad que carga gases propelentes como xenón o kriptón, acelerando iones a través de un propulsor que impulsa a la nave espacial” durante largos períodos de tiempo, explican los expertos de la NASA. La termonuclear proporciona mucho empuje y duplica la eficiencia de los cohetes químicos actuales.

El sistema funciona bombeando un propelente líquido, presumiblemente hidrógeno, a través de un reactor en el que la fisión de átomos de uranio genera calor; de este modo, el propelente se convierte en un gas que se expande a través de una tobera para generar empuje. “El impulso específico de un cohete químico tradicional de hidrógeno y oxígeno líquidos es de 450 segundos, la mitad de la eficiencia que se pretende alcanzar, en principio, con los cohetes nucleares, 900 segundos”, señalan los expertos del DOE. “Esto se debe a que los gases más ligeros son más fáciles de acelerar. Los cohetes químicos producen vapor de agua, un subproducto mucho más pesado que el hidrógeno que se utiliza en la NTP, lo que se traduce en mayor eficiencia que permite a los cohetes viajar más lejos con menos combustible”.

“La NASA, en colaboración con el DOE, está desarrollando y probando nuevos combustibles que utilizan uranio poco enriquecido para aplicaciones espaciales con el objetivo de estudiar cómo funcionan en las condiciones térmicas extremas y entornos radiactivos de la propulsión termonuclear”, precisa la agencia espacial estadounidense. La utilización de uranio poco enriquecido aliviaría considerablemente los requisitos de seguridad de estos sistemas. “Los sistemas NEP no se utilizarían en ningún caso en el lanzamiento: las misiones par-



NASA/JPL-CALTECH/KSC/DOE



KB ARSENAL

Un grupo de técnicos realiza las últimas revisiones del vehículo marciano Opportunity y el generador termoeléctrico MMRTG en el Centro Espacial Kennedy, en abril de 2020. Abajo, ilustración de un futuro vehículo espacial ruso con propulsión termonuclear TEM.

tirían con cohetes químicos y se encenderían en el espacio”, puntualiza el DOE, atendiendo a uno de los requisitos clave de la seguridad de estos sistemas.

De momento, EE. UU. está explorando tanto la opción NTP como la NEP para futuras misiones tripuladas a Marte, ya que cada tecnología tiene sus ventajas y sus retos. El reciente informe de las academias nacionales, sin embargo, se muestra más optimista respecto a las perspectivas de la NTP, aunque recalca los desafíos que tiene aún por delante, más allá de los que plantea el propio reactor, como calentar el propelente a la temperatura re-

querida de 2.700 K y hacerlo en muy poco tiempo. La alternativa NEP, por su parte, tiene que incrementar su capacidad mucho más allá de lo que se ha logrado hasta ahora para poder funcionar con reactores a nivel de megavatios. “No está claro si se lograría, incluso con un programa agresivo, desarrollar un sistema NEP viable en el plazo de 2039”, señala el informe.

Mientras tanto, tanto Rusia como China han hecho públicas sus intenciones de avanzar en la propulsión espacial nuclear, aunque sin sacar a la luz muchos detalles. China anunció en 2017 su objetivo de tener, hacia 2040, transborda-

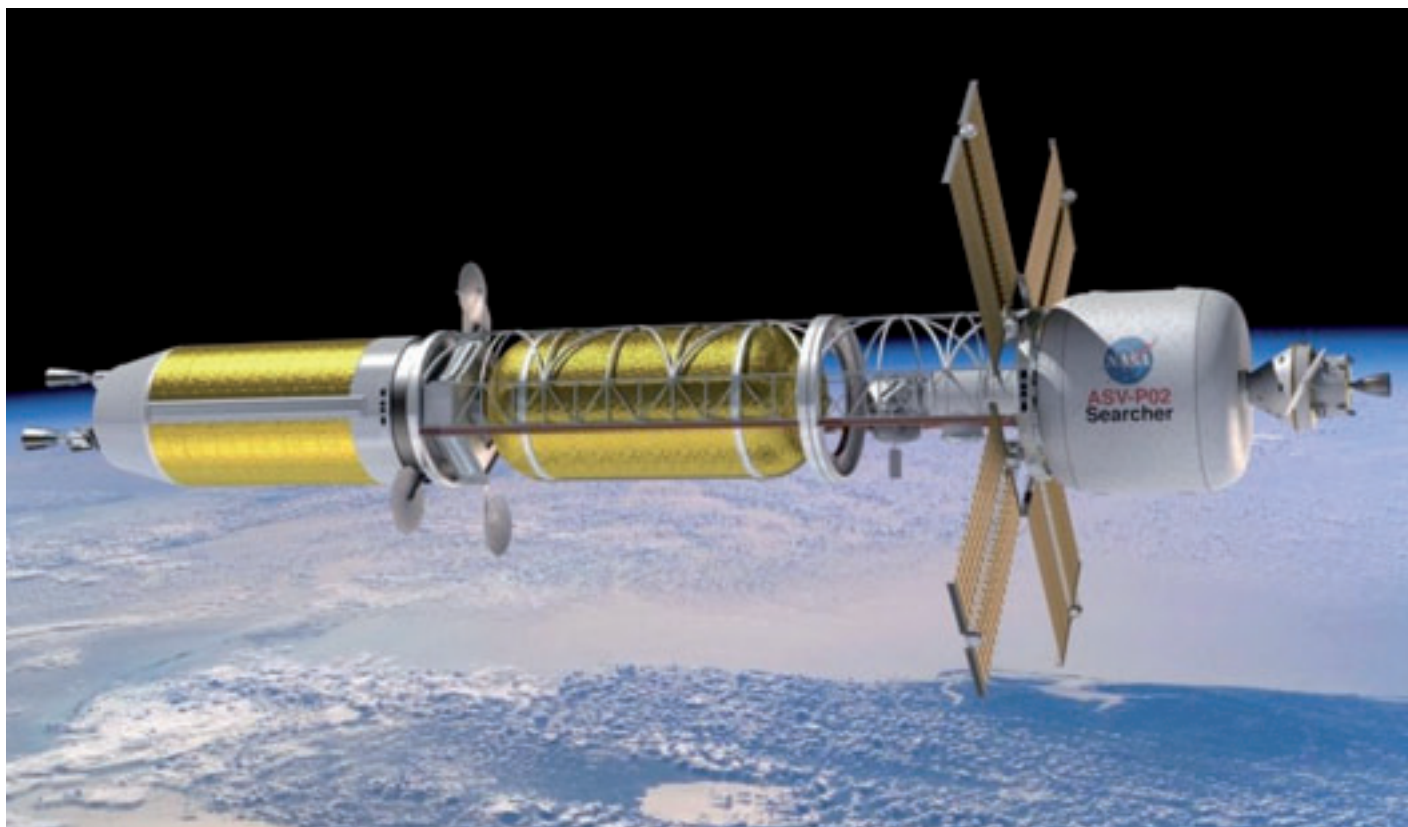


Ilustración de un diseño conceptual de una nave espacial que utiliza propulsión termonuclear.

dores espaciales nucleares. Se utilizarán “fundamentalmente para viajes de larga distancia y exploración del espacio profundo; además, serían la piedra angular para las estaciones en Marte”, señaló entonces a Global Times Jiao Weixi, profesor de Ciencias Espaciales de la Universidad de Pekín. Según explicó, los transbordadores espaciales estarían en órbita y no descenderían a la Tierra o a otros planetas, reduciendo así el riesgo de una potencial contaminación radiactiva.

Por su parte, Rusia ha anunciado en 2021 que tiene previsto lanzar la primera misión de un módulo de transporte espacial nuclear, retomando su proyecto TEM (Módulo de Transporte y Energía), que hasta la fecha ha tenido sus altibajos. Se trata de combinar un reactor nuclear con un motor-cohete eléctrico.

Usos militares

Las instituciones de Defensa estadounidenses son parcas en información deta-

llada sobre proyectos y planes, pero las perspectivas de la propulsión nuclear, tanto de aplicaciones defensivas como ofensivas, no se le escapan a nadie. Jim Bridestine, anterior director de la NASA, destacaba en 2019 “la utilidad de la propulsión termonuclear para aplicaciones más cercanas [que los viajes a Marte y más allá]; por ejemplo, el incremento de potencia permitiría a un artefacto espacial en órbita terrestre escapar de la línea de fuego de armas antisatélite”, según Space.com.

Otros expertos han destacado la utilidad que tendrían pequeños reactores de fisión para generar energía en bases militares remotas sin fácil acceso a la red de suministro. Y más específicamente en el capítulo de armamento. Rex Geveden, presidente de BWX Technologies Inc, comentó, en 2019, en una conferencia del Consejo Nacional Espacial (EE. UU.): “Por supuesto, cabe imaginar la utilización en combate de un reactor de gas a

alta temperatura para alimentar un arma de energía dirigida, por ejemplo. EE. UU. está utilizando combustible diésel ahora, pero eso no es sostenible en una batalla”, según recoge Space.com

La velocidad y la maniobrabilidad de artefactos en el espacio que puede lograrse con la propulsión nuclear tiene múltiples aplicaciones, como desplazar con agilidad satélites en órbita o alcanzar rápidamente “artefactos espaciales sospechosos”, señalan los expertos estadounidenses en defensa espacial, por lo que las miradas están puestas en la defensa de satélites de alerta, de comunicaciones, de navegación y posicionamiento, etcétera, sin olvidar las aplicaciones ofensivas y, por supuesto, con la mirada puesta en lo que puede hacer China y con el objetivo de mantener la supremacía en capacidades espaciales tan íntimamente relacionadas con el liderazgo económico y militar.



Árbol de Gestión de Riesgos y Descuidos (MORT)

MORT es la metodología más completa y extensa de las conocidas hasta la fecha para la investigación de incidentes y accidentes, consolidada por años de aplicación real. En su origen fue una aproximación sistemática para reflejar un sistema ideal de organización, con todas sus interrelaciones, recogiendo los riesgos inherentes a su funcionamiento, y los puntos donde es necesaria una supervisión para evitar que los descuidos progresen y deriven en accidentes. Así, entre ambos, riesgos y descuidos combinados, se producen los accidentes en un sistema sujeto mediante una organización que se debería concebir conceptualmente segura.

De aquí la doble vertiente en la que se puede aplicar MORT: 1) Mostrar el diseño ideal de una organización con vistas a la seguridad y, en consecuencia, su programa

óptimo de seguridad. 2) Mostrar los caminos y los cambios en los procesos mediante los cuales un conjunto de descuidos en el establecimiento y supervisión de los programas de seguridad nos conducen a un accidente.

Es importante discernir MORT, como metodología de investigación de incidentes, del resto de las técnicas y métodos complementarios (árbol de sucesos, árboles de fallos, análisis del cambio, análisis de barreras, FMEA, etc.) que se deben utilizar paralelamente a la aplicación de MORT para identificar los descuidos, fallos y riesgos asumidos en una organización que conducen o han conducido a un accidente.

■ Texto: **Rodolfo Isasia González** | Asesor Técnico de Consejero. Ex Jefe de Área de Experiencia Operativa. Especialista en Análisis de Causa Raíz ■

Antecedentes

El primer indicio sobre el significado de MORT (literalmente *The Management Oversight and Risk Tree*) lo tenemos en la palabra inglesa *oversight*, que traduce dos conceptos aparentemente antagónicos, como son “supervisión” y “descuido”. Se encuadra dentro de los métodos de árboles de fallos desarrollados en los años 70, pero incorpora aspectos organizativos y establece puentes entre los factores o causas organizativas y los fallos que puede haber en un proceso tecnológico (mantenimiento, operaciones, modificaciones, procedimientos, etc.). Además, en su evolución, MORT incluyó dentro de los factores organizativos el análisis de riesgos y el de riesgos asumidos, siendo este último un aspecto vital, porque no hay ningún diseño de sistema tecnológico en el que no se asuman riesgos que es necesario conocer.

En la época en que nació, la Comisión de Energía Atómica (AEC) de EE. UU., precursora de la actual U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC), disponía ya de programas para el control de accidentes, y muy en especial de

los incendios. Su trabajo en áreas de investigación como reactores, radiación y armamento había permitido desarrollar nuevos métodos para el control de problemas inusuales o improbables, incluyendo procedimientos más seguros para la utilización de fuentes de energía, nuevos materiales y procesos. La experiencia en el análisis de accidentes laborales de la AEC había sido muy alta en comparación con la experiencia de la industria en general, e igualaba los estándares de las empresas líderes en aquel momento.

A pesar de todo, los conceptos emergentes de análisis de sistemas, causalidad en accidentes, factores humanos, métodos en reducción de errores y evaluación del desempeño en seguridad, sugirieron la necesidad de desarrollar un control de orden superior sobre las fuentes de riesgo. Este deseo de la AEC por seguir mejorando un historial de seguridad ya de por sí excelente dio como resultado un contrato con W. G. Johnson, gerente general del Consejo Nacional de Seguridad de EE. UU. (NSC) recientemente retirado, trabajando con un Comité Directivo

compuesto por gerentes sénior, para el desarrollo de nuevos métodos de seguridad¹. Este estudio se tituló “Desarrollo de criterios de sistemas para la notificación y el análisis de accidentes, y para la medición del rendimiento de la seguridad”. Desde el comienzo de este programa, se aplicó una política estricta de «no experimentación» en su diseño. Esto significaba que todos los elementos básicos del programa debían representar métodos ya probados, los mejores utilizados hasta la fecha por los líderes en seguridad de la industria y el Gobierno. Este intenso trabajo tuvo varias fases:

■ La Fase I dio como resultado un borrador de texto que combinaba las mejores prácticas en seguridad ocupacional (conocida hoy en día como seguridad laboral), nuevos conceptos de seguridad de sistemas provenientes de la industria aeroespacial y nu-

¹ Ya en 1970, W.G. Johnson había publicado el documento *New approaches to safety industry*, que recogía los principios de seguridad de diversas fuentes y mostraba cómo aplicarlos a la industria.

clear y otros conceptos desarrollados por científicos sobre el comportamiento humano y los factores organizacionales.

- La Fase II produjo un texto revisado, basado en una extensa búsqueda de literatura y análisis crítico por parte del personal del NSC, y su revisión exhaustiva por la División de Seguridad Operacional (DOS) de la AEC.
- En las Fases III y IV los conceptos emergentes se compararon con los programas de seguridad reales en tres sitios de investigación respaldados por la AEC: Lawrence Radiation Laboratory (ahora Lawrence Berkeley Laboratory) perteneciente a la Universidad de California en Berkeley (Lawrence); los Laboratorios Sandia, en Albuquerque (Sandia); y la Corporación Nuclear de Idaho, en la Estación Nacional de Pruebas de Reactores, cerca de Idaho Falls (INC), ahora conocido como INEL. Algunos conceptos se probaron de manera preliminar, los laboratorios los adoptaron y se recopilaban numerosos datos útiles sobre programas de seguridad operativa que permitían su intercomparación y así contribuir al diseño de un modelo ideal de protección.

El resultado más importante de las Fases III y IV fue la evolución de una nueva forma de análisis de accidentes y evaluación de programas de seguridad, el MORT. Se partió de un esfuerzo por aplicar el árbol de fallos (*fault tree*), que se encontraba muy de moda en esa época, a la investigación de accidentes, pero finalmente se convirtió en un método para evaluar las características de un programa, así como los fallos específicos que darían lugar a accidentes. Así, MORT se convirtió en la base principal para la organización y preparación de un manual (Fase V) con la finalidad de llevar a cabo una aplicación de prueba del sistema (Fase VI).

Este primer resultado (Fase V) hacia el desarrollo de un programa de seguridad de sistemas completo e ideal llegó cuando se publicó el manual MORT (SAN 821-2, febrero de 1973) que incluía:

- El árbol analítico básico del que MORT deriva su nombre.
- Una representación esquemática de un modelo de seguridad de un sistema dinámico idealizado universal.
- Una colección de métodos para la implantación de elementos de seguridad en un sistema sujeto a una organización.
- Una colección de razonamientos filosóficos y consejos generales sobre la aplicación de conceptos de seguridad del sistema MORT.

Casi simultáneamente, se decidió que Johnson realizara durante los dos años siguientes pruebas piloto del modelo MORT en condiciones reales, dentro de las actividades del contrato con Aerojet, entonces un contratista principal de la Oficina de Operaciones de la AEC en Idaho (ID) con tasas de accidente muy bajas y con varios elementos del programa MORT ya incorporados en su organización². Las experiencias de estos ensayos, así como los nuevos sistemas de seguridad desarrollados y aportados por el consorcio AEC-ID y Aerojet, se incorporaron a una segunda versión del texto MORT de 1974, incluyendo los mejores elementos de seguridad de diferentes programas en todo el mundo.

Sobre la base de varios años de desarrollo, modelado cuidadoso y extensos estudios sobre ensayos reales, la AEC terminó adoptando MORT como modelo de seguridad de sistemas en agosto de

² Aerojet venía desarrollando y utilizando técnicas de "seguridad de sistemas" siguiendo el modelo de las metodologías iniciadas por la Administración Nacional del Espacio y Aeronáutica (NASA) y el Departamento de Defensa (DOD).

1974 y estableció el Centro de Desarrollo de Seguridad de Sistemas (SSDC) en el Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho, como base para el desarrollo de proyectos posteriores.

Cuando en 1975 se disolvió la AEC y se creó la Administración de Investigación y Desarrollo de Energía (ERDA), el precursor del actual Department of Energy (DOE), asumiendo los aspectos de la AEC que no se asignaron a la USNRC, el programa MORT fue reasignado a la División de Normas de Seguridad y Cumplimiento (SSC) de ERDA. Posteriormente, en 1977, ERDA creó un ambicioso Programa de Gestión de la Seguridad, con la finalidad de difundir el conocimiento sobre MORT desde el público en general hasta el personal técnico especializado que podría iniciarse en su aplicación. En octubre de 1976, EG&G Idaho obtuvo el contrato de operación principal en INEL, incluido el rol de administración del SSDC. Posteriormente, MORT fue desarrollado como herramienta de trabajo por el DOE, y publicado en 1992 (Figura 1).

Fundamentos

Johnson propuso la idea de que la aplicación de los controles y la gestión realizada por la gerencia de los programas de seguridad ocupacional podría clasificarse en cinco niveles de excelencia: 1. Cumplimiento inferior al mínimo de la regulación y códigos. 2. Cumplimiento mínimo de la regulación y códigos. 3. Aplicación de manuales y estándares. 4. Programas de seguridad avanzada ejemplificados por empresas industriales líderes en esta materia. 5. Un programa de seguridad superlativo, aún inexistente, sintetizado mediante la combinación de conceptos de «seguridad de sistemas» promovidos por la industria militar y aeroespacial, con las mejores prácticas de seguridad ocupacional y teniendo en cuenta los conceptos más novedosos de la ciencia del comportamiento, la organización y el análisis.

En opinión de Johnson, había datos suficientes para sugerir que la progresión de un nivel del programa de seguridad al siguiente podría resultar en una reducción de un orden de magnitud en la tasa anual de accidentes experimentados por una empresa. En consecuencia, la meta establecida para el sistema conceptualizado de quinto nivel, el desarrollado por el estudio ERDA, sería una mejora de un orden de magnitud en el historial de seguridad de ERDA, que se situaba previamente en el nivel 4.

Una premisa importante de MORT es que su sistema de seguridad es congruente con un sistema de gestión complejo, de alto rendimiento y orientado a objetivos. Cabe destacar que MORT no representaba una metodología nueva no probada, sino una síntesis de los mejores elementos y conceptos de los programas de seguridad, con las técnicas más avanzadas de análisis y evaluación de los mismos.

Como documento de dominio público, MORT ha generado algunas variantes, muchas de ellas traducciones de su Manual del Usuario a otros idiomas. La pervivencia de MORT es un testimonio de su perfección y calidad. Se trata de una expresión muy lógica de las funciones necesarias para que una organización gestione los riesgos de forma eficaz. Estas funciones se han descrito de forma genérica: el énfasis está en el *qué* en lugar del *cómo* y esto permite que MORT sea aplicable a diferentes industrias. La longevidad de MORT también puede ser un reflejo de la filosofía con visión de futuro de la que surgió, una filosofía que sostenía que la forma más eficaz de gestionar la seguridad es convertirla en una parte integral de la gestión empresarial y el control operativo.

El diagrama MORT sirvió como índice gráfico del texto de Johnson, lo que permitió aplicar su contenido de manera metódica. Para ayudar a los investigadores,

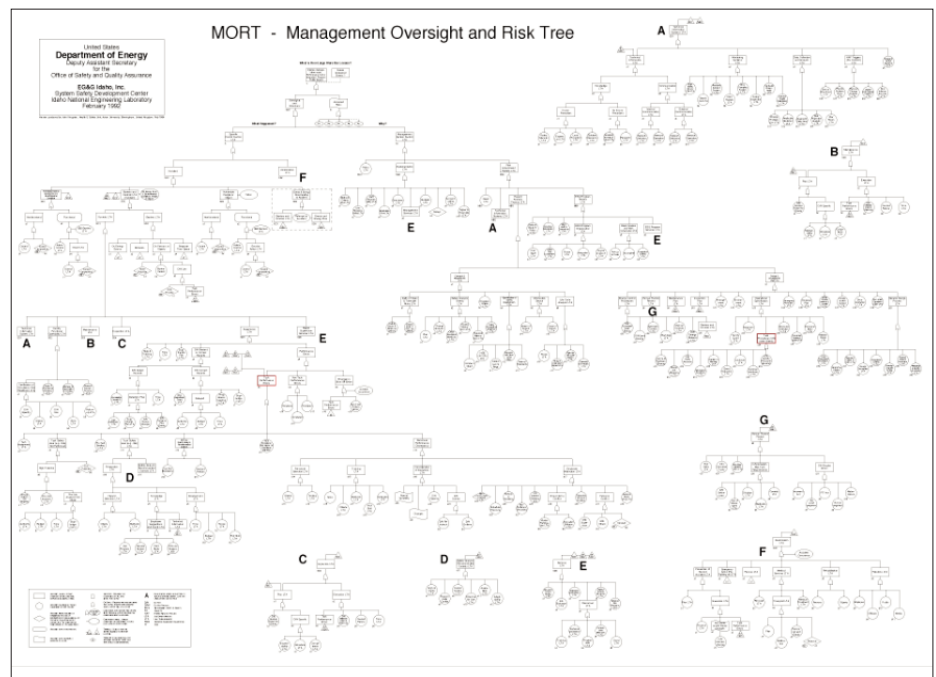


Figura 1. Diagrama MORT del DOE 1992.

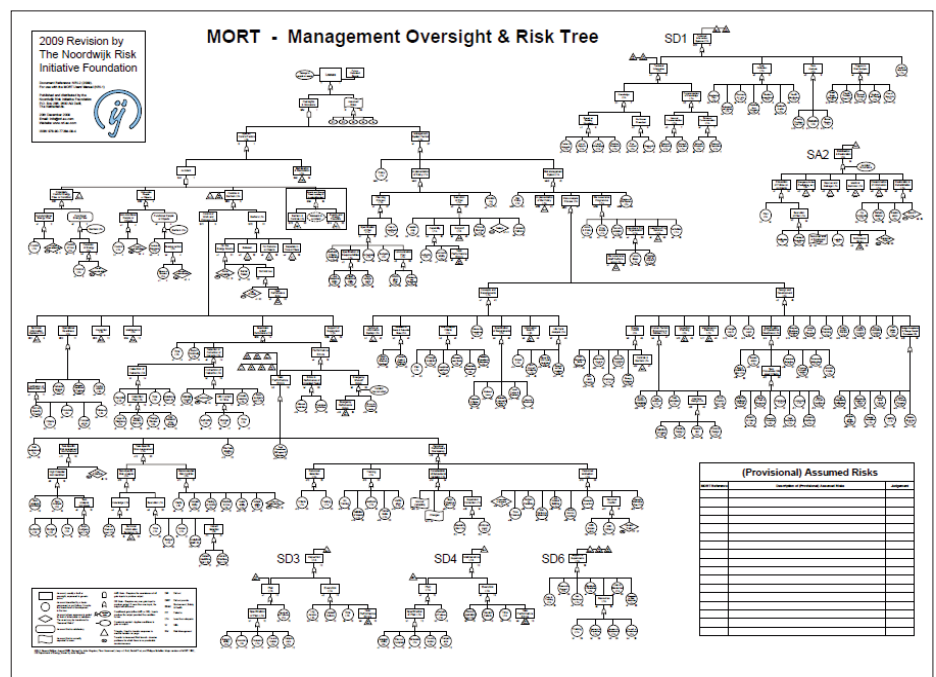


Figura 2. Diagrama MORT de NRI.

especialmente a los principiantes, el texto original (que tiene más de 500 páginas) se destiló en un conjunto de preguntas de cuarenta y dos páginas: el Manual de Usuario MORT. Como método, es ahora en gran medida independiente de MORT como programa, sobre todo en Europa. En la práctica, el texto MORT (es decir,

SAN 821-2) se ha dissociado del gráfico MORT, dejando el Manual de Usuario como la fuente de referencia más común.

En el año 2002, el organismo holandés The Noordwijk Risk Initiative Foundation (NRI) publicó otro manual de usuario, el NRI "MORT User's Manual" (Figura 2). La versión ofrecida en el Ma-

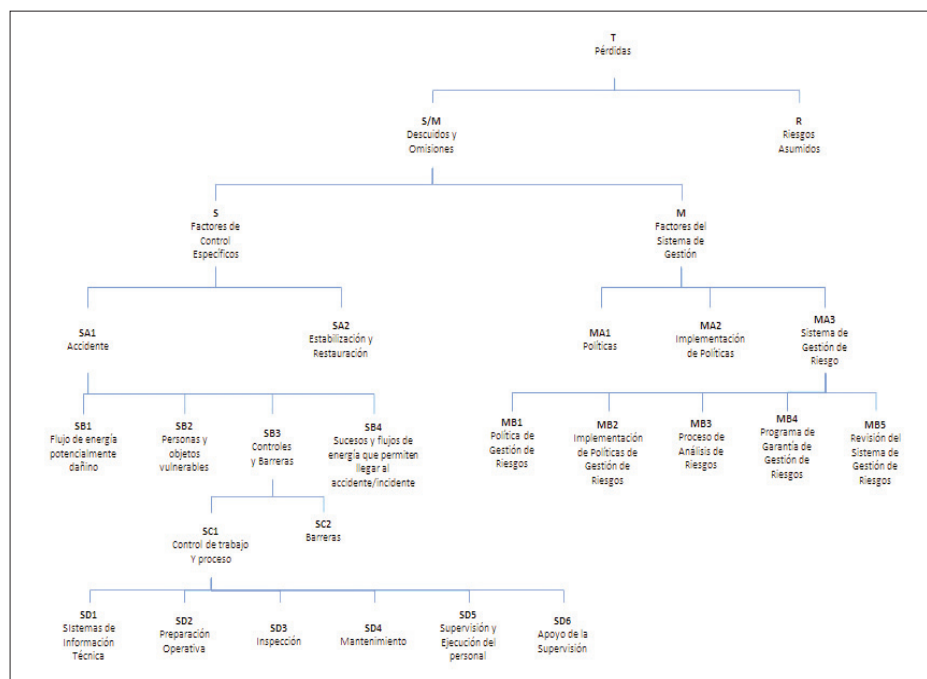


Figura 3. Esquema general de MORT.

nual de DOE no se ajustaba a sus necesidades, ya que, además de estar escrita en inglés de Estados Unidos, hacía referencia a documentos y organizaciones que eran relativamente desconocidas para las personas que no formaban parte del público para el que estaba escrito. Además, el manual del DOE ya tenía diez años de antigüedad. Uno de los factores que contribuyeron de forma notable a que la nueva guía fuese más práctica fue hacer más comprensible el estilo del lenguaje.

Metodología

En MORT, los accidentes se definen como eventos no planificados que producen daños o perjuicios, es decir, pérdidas, que se originan cuando una fuente de daño entra en contacto con una persona o un bien a proteger. Este contacto puede ocurrir debido a un fallo en la prevención (descuido) o como resultado desafortunado de un riesgo que ha sido evaluado y aceptado adecuadamente (el llamado riesgo asumido). Por lo tanto, MORT se basa en el concepto de que todas las pérdidas producidas por accidentes e incidentes surgen de dos fuentes:

- Descuidos
 - (1) En los trabajos y tareas específicos.
 - (2) En el sistema de gestión que controla los trabajos y tareas.
- Riesgos debidamente evaluados y «asumidos»

Los sucesos debidos a riesgos asumidos no pueden llamarse accidentes, en el sentido convencional, porque se sabe de antemano que podrían suceder, simplemente no se sabe cuándo, y se asume su existencia y sus consecuencias. Sin embargo, en términos de las definiciones de MORT, se tratan como accidentes. En otras palabras, dado que el riesgo no puede eliminarse por completo, los riesgos residuales que permanecen en un nivel de control evaluado y aceptado se denominan riesgos asumidos. No obstante, el análisis MORT siempre debe evaluar la ruta del fallo antes de considerar la hipótesis del riesgo asumido.

La idea general del diagrama MORT es evitar los descuidos mediante la supervisión y así identificar todo lo que pueda darnos problemas de seguridad. Sin em-

bargo, no es esperable que todas las organizaciones utilicen todos los métodos y pautas de mejora de MORT, pues los métodos para resolver problemas están pensados para ser usados solo si una organización tiene esos problemas. En el análisis MORT, la mayor parte del esfuerzo se dirige a identificar problemas en el control de un trabajo o proceso y deficiencias en las barreras protectoras asociadas con él. Posteriormente, estos problemas se analizan para determinar su origen en la planificación, el diseño, las políticas, etc.

La integridad del diagrama MORT se ha establecido a través de miles de ciclos de aplicación dentro y fuera de ERDA/DOE, tanto en ejercicios en aula como en actividades de evaluación e investigación en la vida real. Tanto los profesionales de la seguridad como el personal fuera del campo de la seguridad han utilizado el árbol y han proporcionado comentarios relacionados con el formato y el contenido. El resultado de todo esto es que podemos tener un alto grado de confianza en que los elementos incluidos en el árbol son necesarios y suficientes para un programa de seguridad ideal; es decir, todo lo que se necesita está ahí y no se ha incluido nada que no sea necesario.

Estructura MORT

El suceso principal en el diagrama MORT (Figura 3) está etiquetado como Pérdidas, debajo de las cuales se encuentran sus dos causas alternativas: (1) Descuidos y Omisiones, o (2) Riesgos Asumidos. Todos los factores que contribuyen a la secuencia del accidente se tratan como Descuidos y Omisiones, a menos que se transfieran a la rama de Riesgos Asumidos (Gráfico 1).

La entrada al suceso Descuidos y Omisiones se realiza a través de una puerta lógica AND. Esto significa que los problemas que se manifiestan en el control específico de las actividades laborales necesariamente

involucran cuestiones en los procesos de gestión que las rigen (Gráfico 2).

Las ramas Factores de Control Específicos y de Factores del Sistema de Gestión son las dos ramas principales de MORT. Los Factores de Control Específicos se dividen en dos clases: los relacionados con el incidente o accidente en sí (SA1) y los relacionados con el restablecimiento del control tras un accidente (SA2). Estos están debajo de una puerta OR, porque cualquiera de los dos puede ser una causa de pérdidas.

En el accidente en sí (SA1) nos encontramos la segunda y última puerta AND, y hace referencia a los cuatro ingredientes clave de un análisis de barreras para que se produzca el accidente:

- Flujo de energía o condición ambiental adversa.
 - Personas vulnerables u objetos que pueden ser dañados por ese flujo de energía o condición ambiental.
 - Ausencia o fallo de barreras y controles diseñados para separar los anteriores.
 - Sucesos y flujos de energía que permiten llegar hasta su objetivo.
- (Gráfico 3)

Esta puerta lógica enfatiza que el accidente se producirá únicamente cuando estén presentes estos elementos. El accidente no ocurrirá si alguno de los mismos no estuviese presente.

Existen varios niveles del diagrama MORT disponibles. El más completo, con unos 10.000 bloques, ocupa básicamente un libro. Hay un diagrama intermedio con aproximadamente 1500 bloques y un diagrama básico con aproximadamente 300. Por supuesto, es posible personalizar un diagrama MORT eligiendo varias ramas de su árbol y usando solo esos segmentos. MORT es esencialmente un árbol negativo, por lo que el proceso comienza colocando un evento de pérdida no deseado en la

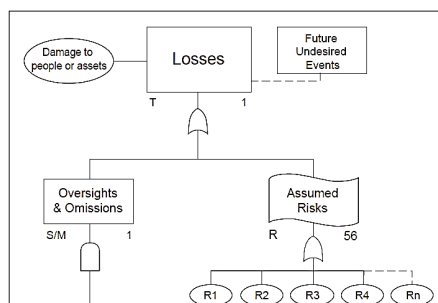


Gráfico 1. Suceso principal en el diagrama MORT.

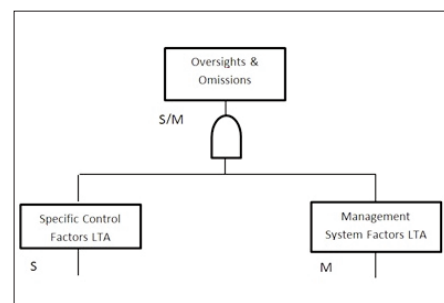


Gráfico 2. Entrada al suceso Descuidos y Omisiones.

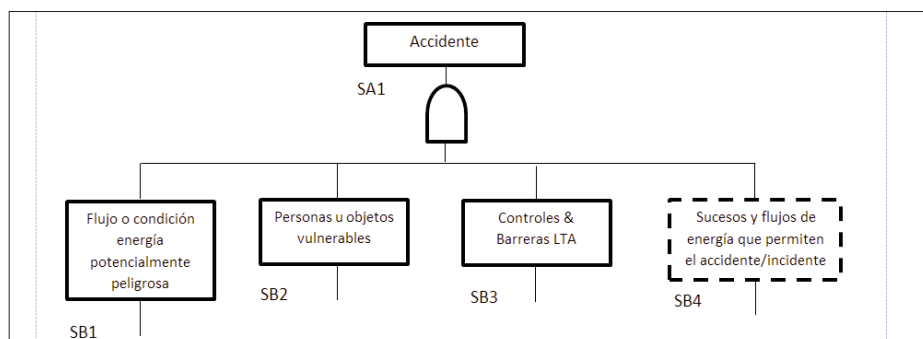


Gráfico 3. Desarrollo del accidente.

parte superior del diagrama. A continuación, el usuario de MORT responde sistemáticamente a las cuestiones planteadas por el diagrama. Se consideran todos los aspectos del diagrama y se resaltan los bloques que resulten «menos que adecuado» (LTA) para la acción de control de riesgo.

La aplicación de MORT más completa está reservada para los riesgos más altos, debido al tiempo y el gasto requerido, lo cual debe ser conmensurado con la importancia del incidente a analizar. MORT es básicamente una herramienta profesional que requiere un profesional en control de pérdidas especialmente capacitado para garantizar su aplicación adecuada.

Adaptación de MORT: Trabajo CSN-UPM

En el CSN la aplicación de MORT se remonta a la década de los 90, donde se realizaron algunas aplicaciones esporádicas no oficiales, todas ellas parciales, del diagrama. Fue ya en este siglo cuando se empezó a solicitar a los titulares la realización de análisis de causa raíz (ACR) utilizando la metodología de MORT, des-

tacando entre ellos el incidente de rotura del sistema de agua de servicios esenciales en Vandellós 2 en 2004 y el incidente de escape de partículas radiactivas al exterior en Ascó en 2007. A partir de ahí se ha considerado como objetivo el requerir a los titulares de centrales nucleares un ACR de aquellos sucesos en los que la clasificación en la Escala INES resulte igual o superior a nivel 1.

Posteriormente surgió, dentro del área de Modelos y Simulación del CSN (MOSI), la idea de facilitar el proceso de aplicación de MORT en nuestro país mediante una adaptación de la metodología. Para ello, se realizó un extenso trabajo de colaboración entre la Universidad Politécnica de Madrid y el Consejo de Seguridad Nuclear, dentro del marco de la Cátedra Federico Godet, en el que se llevó a cabo la comparación de las dos versiones públicas de manuales de usuario de MORT de uso más extendido y sus correspondientes diagramas de árbol lógico, para así poder estudiar y analizar las diferencias, deficiencias y adecuación de todos los sucesos que forman parte de estos.

Gráfico 4. Ejemplo de la hoja de cálculo utilizada para la adaptación en España.

	DOE	NRI	Comentarios
b1	Control LTA	Control LTA	
b2	Control impracticable	Control impracticable	
b3	Control of use LTA	Control of use LTA	
b4	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c1	Control LTA	Control LTA	
c2	Control impracticable	Control impracticable	
c3	Control LTA	Control LTA	
c4	Control impracticable	Control impracticable	
c5	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c6	Control LTA	Control LTA	
c7	Control impracticable	Control impracticable	
c8	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c9	Control LTA	Control LTA	
c10	Control impracticable	Control impracticable	
c11	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c12	Control LTA	Control LTA	
c13	Control impracticable	Control impracticable	
c14	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c15	Control LTA	Control LTA	
c16	Control impracticable	Control impracticable	
c17	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c18	Control LTA	Control LTA	
c19	Control impracticable	Control impracticable	
c20	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c21	Control LTA	Control LTA	
c22	Control impracticable	Control impracticable	
c23	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c24	Control LTA	Control LTA	
c25	Control impracticable	Control impracticable	
c26	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c27	Control LTA	Control LTA	
c28	Control impracticable	Control impracticable	
c29	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c30	Control LTA	Control LTA	
c31	Control impracticable	Control impracticable	
c32	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c33	Control LTA	Control LTA	
c34	Control impracticable	Control impracticable	
c35	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c36	Control LTA	Control LTA	
c37	Control impracticable	Control impracticable	
c38	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c39	Control LTA	Control LTA	
c40	Control impracticable	Control impracticable	
c41	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c42	Control LTA	Control LTA	
c43	Control impracticable	Control impracticable	
c44	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c45	Control LTA	Control LTA	
c46	Control impracticable	Control impracticable	
c47	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c48	Control LTA	Control LTA	
c49	Control impracticable	Control impracticable	
c50	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c51	Control LTA	Control LTA	
c52	Control impracticable	Control impracticable	
c53	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c54	Control LTA	Control LTA	
c55	Control impracticable	Control impracticable	
c56	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c57	Control LTA	Control LTA	
c58	Control impracticable	Control impracticable	
c59	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c60	Control LTA	Control LTA	
c61	Control impracticable	Control impracticable	
c62	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c63	Control LTA	Control LTA	
c64	Control impracticable	Control impracticable	
c65	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c66	Control LTA	Control LTA	
c67	Control impracticable	Control impracticable	
c68	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c69	Control LTA	Control LTA	
c70	Control impracticable	Control impracticable	
c71	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c72	Control LTA	Control LTA	
c73	Control impracticable	Control impracticable	
c74	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c75	Control LTA	Control LTA	
c76	Control impracticable	Control impracticable	
c77	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c78	Control LTA	Control LTA	
c79	Control impracticable	Control impracticable	
c80	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c81	Control LTA	Control LTA	
c82	Control impracticable	Control impracticable	
c83	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c84	Control LTA	Control LTA	
c85	Control impracticable	Control impracticable	
c86	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c87	Control LTA	Control LTA	
c88	Control impracticable	Control impracticable	
c89	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c90	Control LTA	Control LTA	
c91	Control impracticable	Control impracticable	
c92	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c93	Control LTA	Control LTA	
c94	Control impracticable	Control impracticable	
c95	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c96	Control LTA	Control LTA	
c97	Control impracticable	Control impracticable	
c98	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c99	Control LTA	Control LTA	
c100	Control impracticable	Control impracticable	
c101	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c102	Control LTA	Control LTA	
c103	Control impracticable	Control impracticable	
c104	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c105	Control LTA	Control LTA	
c106	Control impracticable	Control impracticable	
c107	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c108	Control LTA	Control LTA	
c109	Control impracticable	Control impracticable	
c110	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c111	Control LTA	Control LTA	
c112	Control impracticable	Control impracticable	
c113	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c114	Control LTA	Control LTA	
c115	Control impracticable	Control impracticable	
c116	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c117	Control LTA	Control LTA	
c118	Control impracticable	Control impracticable	
c119	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c120	Control LTA	Control LTA	
c121	Control impracticable	Control impracticable	
c122	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c123	Control LTA	Control LTA	
c124	Control impracticable	Control impracticable	
c125	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c126	Control LTA	Control LTA	
c127	Control impracticable	Control impracticable	
c128	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c129	Control LTA	Control LTA	
c130	Control impracticable	Control impracticable	
c131	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c132	Control LTA	Control LTA	
c133	Control impracticable	Control impracticable	
c134	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c135	Control LTA	Control LTA	
c136	Control impracticable	Control impracticable	
c137	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c138	Control LTA	Control LTA	
c139	Control impracticable	Control impracticable	
c140	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c141	Control LTA	Control LTA	
c142	Control impracticable	Control impracticable	
c143	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c144	Control LTA	Control LTA	
c145	Control impracticable	Control impracticable	
c146	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c147	Control LTA	Control LTA	
c148	Control impracticable	Control impracticable	
c149	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c150	Control LTA	Control LTA	
c151	Control impracticable	Control impracticable	
c152	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c153	Control LTA	Control LTA	
c154	Control impracticable	Control impracticable	
c155	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c156	Control LTA	Control LTA	
c157	Control impracticable	Control impracticable	
c158	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c159	Control LTA	Control LTA	
c160	Control impracticable	Control impracticable	
c161	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c162	Control LTA	Control LTA	
c163	Control impracticable	Control impracticable	
c164	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c165	Control LTA	Control LTA	
c166	Control impracticable	Control impracticable	
c167	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c168	Control LTA	Control LTA	
c169	Control impracticable	Control impracticable	
c170	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c171	Control LTA	Control LTA	
c172	Control impracticable	Control impracticable	
c173	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c174	Control LTA	Control LTA	
c175	Control impracticable	Control impracticable	
c176	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c177	Control LTA	Control LTA	
c178	Control impracticable	Control impracticable	
c179	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c180	Control LTA	Control LTA	
c181	Control impracticable	Control impracticable	
c182	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c183	Control LTA	Control LTA	
c184	Control impracticable	Control impracticable	
c185	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c186	Control LTA	Control LTA	
c187	Control impracticable	Control impracticable	
c188	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c189	Control LTA	Control LTA	
c190	Control impracticable	Control impracticable	
c191	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c192	Control LTA	Control LTA	
c193	Control impracticable	Control impracticable	
c194	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c195	Control LTA	Control LTA	
c196	Control impracticable	Control impracticable	
c197	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	
c198	Control LTA	Control LTA	
c199	Control impracticable	Control impracticable	
c200	Control of Exposure LTA	Control of Exposure LTA	

Gráfico 5. Tabla comparativa de los sucesos básicos en las tres versiones.

Para llevar a cabo la adaptación del análisis MORT al modelo organizativo español, se siguieron una serie de etapas:

- Comparación de las distintas versiones disponibles de MORT.
- Interpretación de los manuales de MORT de las versiones disponibles.
- Definición de la terminología y la jerga adecuada y comúnmente aceptada para el escenario español.
- Definición de un esquema MORT para el escenario español.
- Elaboración del Manual de Usuario de MORT en castellano.
- Delineación del diagrama MORT correspondiente.

Las versiones de MORT utilizadas para realizar la comparación fueron las dos públicas más conocidas:

- Departamento de Energía de Estados Unidos (Department of Energy – DOE), de 1992.
- La del Noordwijk Risk Initiative Foundation (NRI), de 2009; única versión europea de uso libre disponible.

La comparación se inició trasladando los diagramas de MORT de ambas versiones a una hoja de cálculo, en la que se clasificaron y ordenaron los sucesos en niveles y se realizó una primera comparación entre los sucesos básicos del diagrama (Gráfico 4).

El objetivo de este documento fue facilitar la comparación visual de los sucesos básicos de cada una de las versiones, clasificando estos sucesos según su analogía e indicando aquellos en los que se producen transferencias o se establecen riesgos asumidos. Este documento permitió disponer de una visión más ordenada, intuitiva y sintetizada del diagrama.

Para cada uno de los sucesos básicos del diagrama, se estableció una tabla comparativa de los mismos, en la que se presentaba el suceso básico correspondiente a cada una de las versiones de MORT, incluyendo comentarios explicativos de las diferencias encontradas (Gráfico 5).

Para facilitar la tarea de análisis se hizo uso de la leyenda de colores (Gráfico 6).

En la hoja de cálculo se estableció otra serie de colores para cada uno de los niveles del diagrama, con el objetivo de conseguir así una visualización y comprensión del diagrama más intuitiva, rápida y sencilla (Gráfico 6).

Una vez finalizada la comparación mediante este método, se hizo evidente una gran similitud entre ambas versiones del diagrama de MORT, más patente como era de esperar en la rama de Factores de Control Específicos (rama S), que corresponde a la parte más técnica del diagrama. Sin embargo, esta comparación fue solo una primera aproximación primaria de los sucesos básicos de ambas versiones. A continuación, se desarrolló una comparativa mucho más profunda y completa, teniendo en cuenta la definición y preguntas que presenta cada suceso del diagrama.

Tras realizar el estudio y comparación completa de los manuales de MORT, se procedió a elaborar uno que encajara en el marco español. Se llevó a cabo un proceso de interpretación y adaptación del lenguaje y la terminología, para elaborar un manual de usuario de acuerdo con el vocabulario y nomenclatura utilizados en las organizaciones españolas, tomando como modelo el ámbito nuclear.

El resultado del estudio y comparación de los manuales y diagramas de MORT de las versiones de DOE y NRI se ha presentado en forma de manual de usuario, junto con su correspondiente diagrama (Gráfico 7).

El esquema del manual de usuario elaborado presenta el mismo formato que el manual de usuario publicado en 2009 por NRI. Se decidió utilizar este por ser muy intuitivo y práctico a la hora de buscar las ramas y sucesos que se requieren en cada momento. Como puede verse en el gráfico, se recoge un pequeño esquema en la parte superior de cada hoja, el cual permite saber en todo momento en qué

	Sucesos básicos iguales
	Sucesos básicos parecidos
	Sucesos básicos inexistentes en una de las dos versiones
	Sucesos que solo aparecen en una de las dos versiones
	Ramas inexistentes en una de las dos versiones de MORT
	Transferencia a otra rama
	Riesgos asumidos

Gráfico 6. Leyenda de colores.

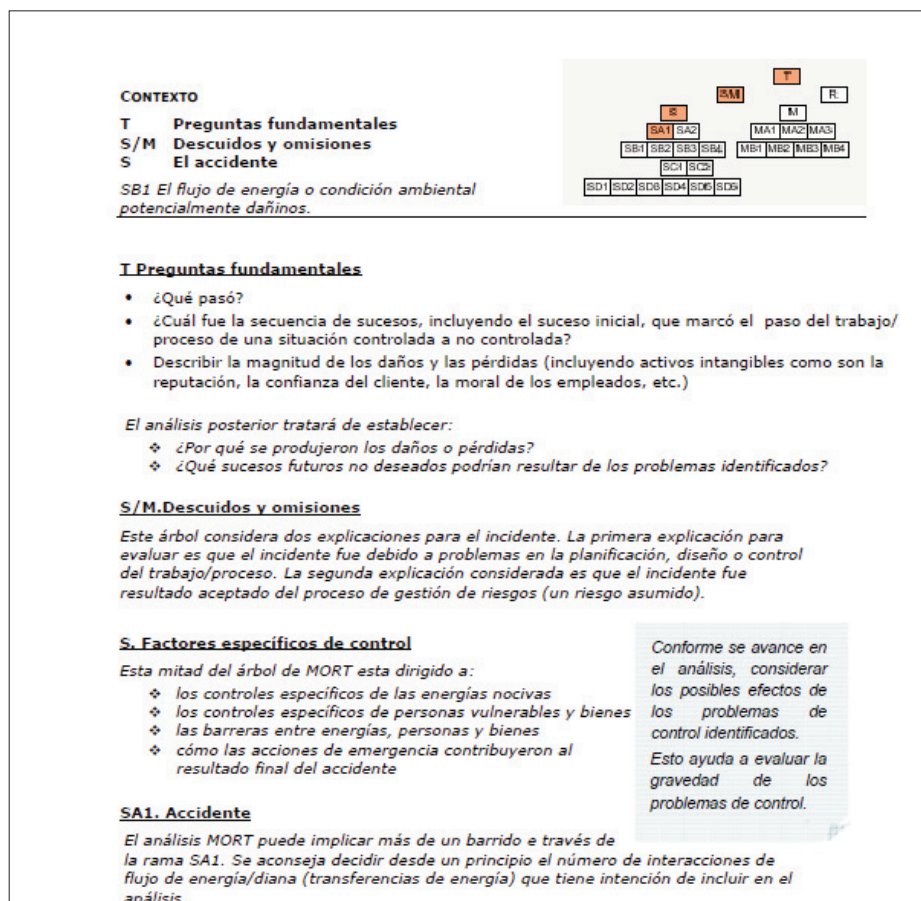


Gráfico 7. Ejemplo del Manual de Usuario MORT adoptado.

lugar del diagrama se encuentran los sucesos que aparecen en la misma. Además, la utilización de notas anexas clarifica y ayuda a comprender mejor cómo y hacia dónde se tienen que estudiar los sucesos; dichas notas quedan remarcadas en azul para clarificar que no forman parte de las preguntas de cada uno de los sucesos.

El diagrama lógico complementario (Figura 4) se ha realizado buscando claridad y orden, al ser una herramienta básica

para llevar a cabo el análisis, ya que facilita y agiliza el desarrollo del mismo, a la vez que proporciona una imagen completa y estructurada de todas las áreas que se deben estudiar ante un accidente o incidente.

En conclusión, se ha desarrollado una adaptación de la metodología MORT de investigación de accidentes, obteniendo un manual de usuario y correspondiente diagrama actualizado y adaptado a nuestro país. Una herramienta útil que

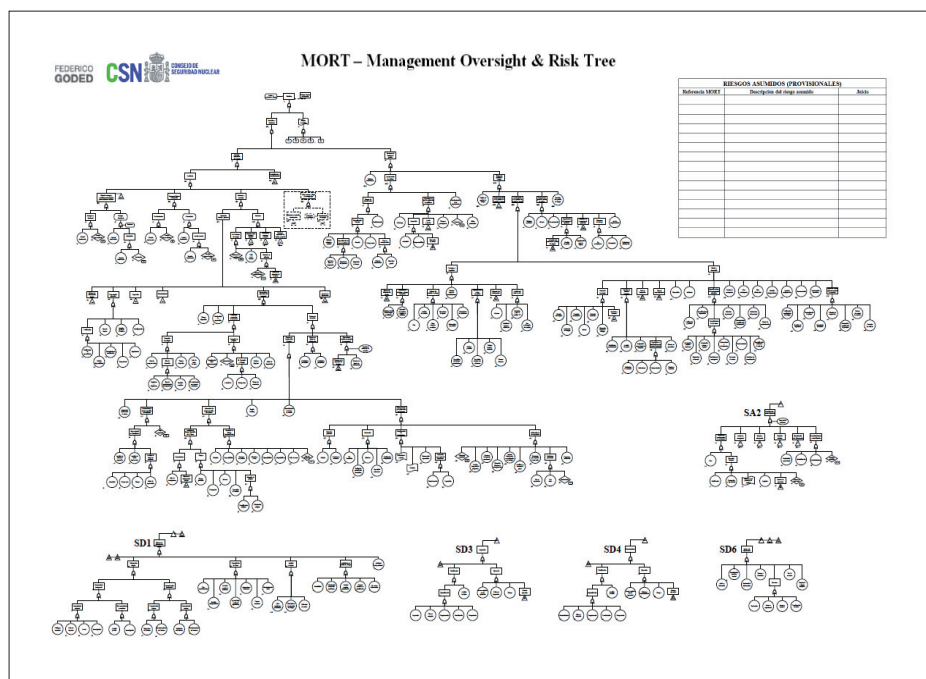


Figura 4. Diagrama MORT desarrollado entre el CSN y UPM.

tiene en cuenta todos los aspectos relacionados con la seguridad de las centrales y otras instalaciones que gestionen riesgo, desde los aspectos más técnicos, hasta los administrativos, teniendo en cuenta en todo momento el factor humano y organizativo.

Perspectivas y pasos siguientes

Es importante tomar en consideración que esta versión de MORT es un elemento vivo; es decir, se trata de un proceso iterativo: conforme se le dé uso, se descubrirán posibles deficiencias, aspectos de mejora o carencias que obligarán a nuevas incorporaciones o modificaciones al mismo. Entre los aspectos de mejora futura más importantes está introducir una nueva rama al árbol que recoja un análisis completo de los aspectos de “cultura de seguridad” de las organizaciones, así como analizar el impacto dinámico que tiene en el resto del árbol una omisión o descuido en un suceso básico.

En este sentido, los sistemas tecnológicos y organizativos actuales son tan complejos que se caracterizan por su falta de linealidad; esto hace que pequeñísimas va-

riaciones en el funcionamiento del sistema puedan dar como resultado una respuesta compleja e imprevista. Además, la descomposición del sistema en sus partes no permite explicar su funcionamiento complejo. Este tipo de modelos dinámicos tratan de representar el funcionamiento del sistema para determinar cómo variaciones pequeñas en su funcionamiento producen resultados catastróficos. Como ejemplo, tenemos el *FRAM Functional Resonance Analysis Method* de Erik Hollnagel (Ref.5)

El paso inmediato siguiente que es esperable desarrollar dentro del CSN será elevar este manual de usuario y el diagrama lógico a estatus de guía pública para que sea accesible a cualquier persona del ámbito nuclear. Puesto que la finalidad de su desarrollo radica en el uso para una industria con altos estándares de seguridad debido a sus riesgos inherentes, no se puede descartar que nuestros resultados sean de directa aplicación en otros sectores que también presentan riesgos, como son el transporte (vial, ferroviario o de aviación), la sanidad, el trabajo, la industria química, etc.

Referencias

1. Failure: Analysis of an engineering concept. Luca del Frate
2. Barriers and accident prevention. Erik Hollnagel
3. Safer complex industrial environments. Erik Hollnagel
4. Managing the risks of organizational accidents. James Reason
5. FRAM: The functional resonance analysis methods. Erik Hollnagel
6. Industrial accident prevention: A scientific approach. Heinrich, Herbert William.
7. Application and selection of nuclear event investigation methods, tools and techniques. Stanislovas Ziedelis, Marc Noel JRC
8. Review of methodologies for analysis of safety incidents at NPPs. IAEA-TECDOC-1278
9. Report to the President by the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident. Roger Commission
10. Root Cause Analysis Following an Event at a Nuclear Installation: Reference Manual. IAEA-TECDOC-1756
11. Root Cause Analysis Guidance Document. DOE-NE-STD-1004-92
12. The Management Oversight and Risk Tree (MORT): Including Systems Developed Idaho Operations Office and Aerojet Nuclear Company, by W. G. Johnson. SAN-821-2
12. Accident/Incident investigation manual. DOE/SSDC 76-45/27
13. Barrier Analysis. Technical Research and Analysis Center SCIENTECH, Inc. SCIE-DOE-01-TRAC-29-95
14. DOE Handbook: Accident and Operational Safety Analysis. DDOE HDBK 11208 2012 July 2012
15. Events and Causal Factors Analysis. Technical Research and Analysis Center SCIENTECH, Inc. SCIE-DOE-01-TRAC-14-95
16. DOE Workbook: Conducting Accident Investigations.
17. Rating Accident Models and Investigation Methodologies. Ludwig Benner, Jr.
18. The Management Oversight and Risk Tree (MORT) - A New System Safety Program. ERDA 4175026
19. MORT: The Management Oversight and Risk Tree (MORT) - A Safety Management Program developed for ERDA. ERDA-77/38
20. MORT User's Manual for use with the Management Oversight and Risk Tree Analytical Logic Diagram. DOE/SS 76-45/4. SSDC-4
21. NRI MORT User's Manual for use with the Management Oversight & Risk Tree analytical logic diagram. NRI-1 (2002)
22. NRI MORT User's Manual for use with the Management Oversight & Risk Tree analytical logic diagram. NRI-1 (2009)

Recarga de combustible en las centrales nucleares

■ Texto: **Rubén Martínez** | inspector residente del CSN en la central nuclear Trillo. ■

Los elementos combustibles del reactor de las centrales nucleares deben sustituirse periódicamente para mantener la operación de la planta, ya que se van quemando progresivamente. Además, aprovechando la necesidad de parada del reactor y los sistemas asociados, se planifican actuaciones de los equipos que, bien por razones operativas o bien por motivos radiológicos, no pueden ser realizadas en operación normal.

Por tanto, el objetivo de una parada para recarga es triple:

- Renovación de los elementos combustibles.
- Ejecución de pruebas requeridas por las Especificaciones de Funcionamiento.
- Mantenimiento o modificación de instalaciones, equipos y/o componentes para asegurar el correcto funcionamiento de la planta en el siguiente ciclo de operación.

La frecuencia de las paradas para la recarga de combustible varía de unas centrales a otras, entre 12 meses (Trillo), 18 meses (Almaraz I y II, Ascó I y II y Vandellós II) y 24 meses (Cofrentes). El período que transcurre entre dos paradas se denomina ciclo de operación.

La duración aproximada de una parada para recarga es de 30-40 días y depende del alcance de los trabajos de mantenimiento y las modificaciones de diseño que el titular haya planificado implantar.

Planificación

En una parada para recarga se realizan más de 7000 intervenciones, para lo cual el personal presente en la instalación puede llegar a multiplicarse por tres. Para garantizar la seguridad de la misma y la de los trabajadores y minimizar el tiempo en el que la instalación está parada, el titular desarrolla un trabajo de planificación que comienza al día siguiente de la finalización de la anterior parada.

Con el objetivo de analizar y vigilar las distintas configuraciones que se presentan en la recarga y evitar un impacto negativo en la seguridad, se definen unas funciones clave de seguridad en parada (FCSP), que permiten realizar un seguimiento de los parámetros básicos de seguridad e identificar su cumplimiento mediante un código de colores:

- Verde: situación óptima. Se dispone de más sistemas de seguridad adicionales a los obligatorios de los estándares internacionales.
- Naranja: situación básica. Se dispone de todos los sistemas de seguridad indicados en los estándares, pero no de los adicionales.
- Rojo: situación prohibida. Se dispone de menos sistemas de los indicados por los estándares.

Estas FCSP determinan cuándo se puede dejar fuera de servicio un equipo para llevar a cabo su mantenimiento, asegurando que el resto de equipos disponibles

de la instalación cumple con los estándares de seguridad exigidos.

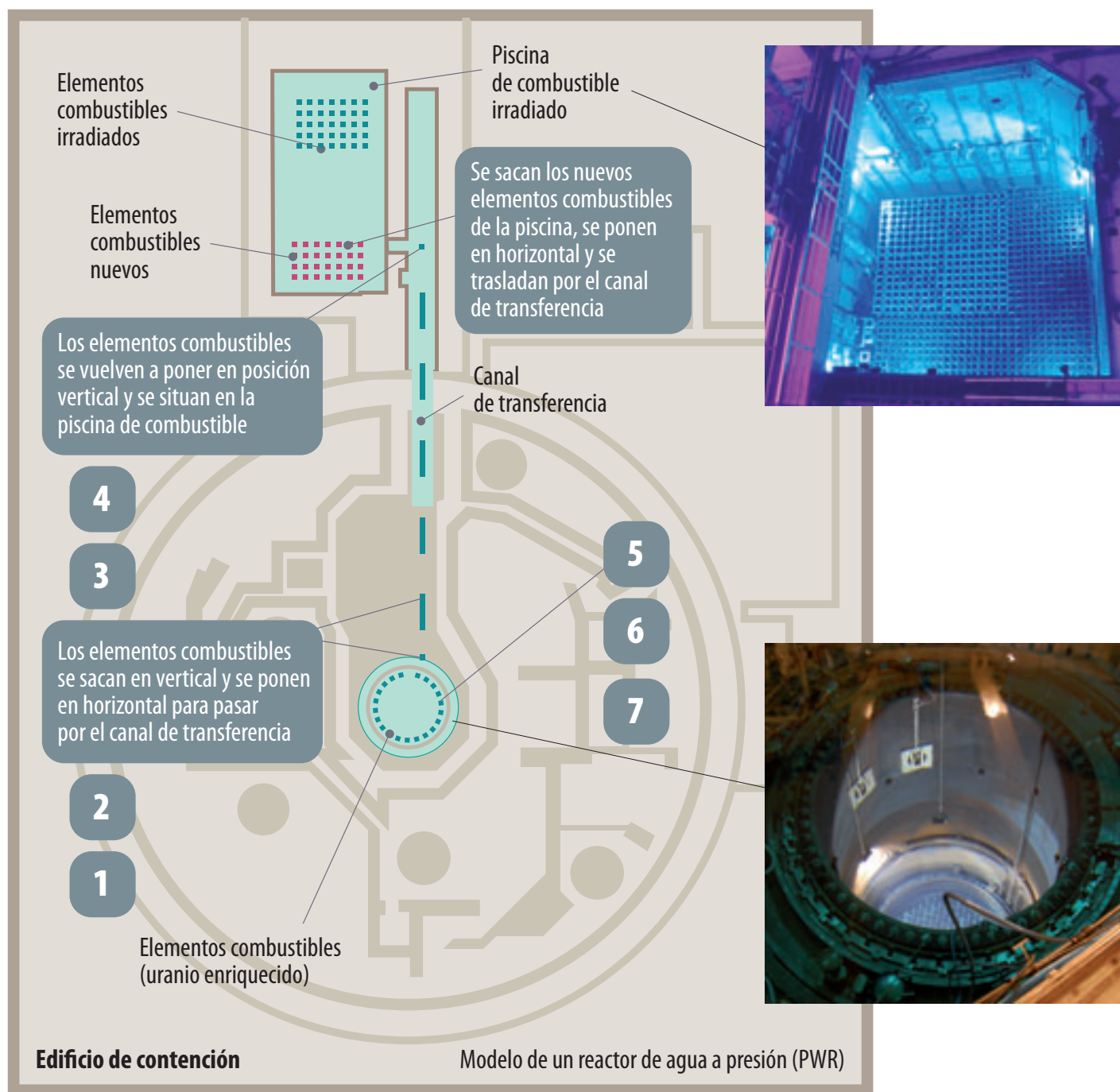
Cuatro meses antes del inicio de la recarga, es requisito obligatorio emitir un informe al Consejo de Seguridad Nuclear en el que se incluyen los detalles de la planificación. Dicho informe debe ser actualizado un mes antes, y de nuevo el día previo al inicio.

Cómo se lleva a cabo

A grandes rasgos, las etapas en las que se divide una parada son:

- 1 Parada de la planta / Pruebas periódicas.
- 2 Apertura de la vasija del reactor y desmontaje internos.
- 3 Traslado del combustible de la vasija a la piscina.
- 4 En paralelo al movimiento del combustible, se lleva a cabo la realización tanto de los trabajos de mantenimiento en las distintas redundancias como la implantación de las modificaciones de diseño.
- 5 Carga del combustible en vasija.
- 6 Montaje de internos superiores y cierre de la vasija del reactor.
- 7 Arranque de la planta / Pruebas periódicas.

La ejecución de los trabajos se debe realizar de manera coordinada, de forma que se garanticen los niveles de seguridad previstos por las FCSP de la planificación.



Funciones del CSN

Durante el desarrollo de la recarga, la inspección residente del CSN realiza un seguimiento diario de los trabajos que se desarrollan durante cada una de las distintas etapas de la parada. Esta vigilancia incluye, entre otras cosas, reunio-

nes diarias con el titular, visitas a campo para verificar el desarrollo de los trabajos y el estado de los equipos, inspección de pruebas posteriores para comprobar el buen funcionamiento y seguimiento de actividades con riesgo de alta dosis de radiación.

Asimismo, el CSN realiza un conjunto de inspecciones adicionales en el que representantes de diferentes áreas especializadas se desplazan desde la sede central para comprobar en detalle el desarrollo de trabajos específicos.

Javier Cacho Gómez (Madrid, 1952) es un físico español cuya trayectoria profesional se ha desarrollado en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), donde ha trabajado sobre todo en la capa de ozono de la atmósfera, tema del que fue pionero y principal experto español. La aparición del famoso agujero de ozono en la Antártida, un territorio que le fascinó, le llevó a realizar varias campañas de investigación en ese continente, en 1986, 1987, 1988, 1995-96, 1996-97 y 2005-06, las tres últimas como jefe de la base española Juan Carlos I. Su pasión por el con-

tinente helado le ha llevado además a escribir media docena de libros de éxito donde narra, con una prosa de novelista profesional, las aventuras de los grandes exploradores polares. En reconocimiento a su labor investigadora, de gestión y de divulgación en las tierras australes, el año pasado el Comité Científico de Investigaciones Antárticas (SCAR, el organismo internacional que gestiona la actividad investigadora allí y que obtuvo el Premio Príncipe de Asturias 2002 de Cooperación Internacional) puso su nombre a una isla de las Shetland del Sur, la Isla Cacho.

Entrevista a Javier Cacho, físico atmosférico y escritor

“El Protocolo de Montreal sobre el ozono fue la primera gran victoria medioambiental de la humanidad”

■ Texto: **Ignacio Fernández Bayo** ■

PREGUNTA: *¿Por qué le propusieron para nombrar una isla?*

RESPUESTA: En la Antártida se puede poner un nombre a todo elemento geográfico que no esté ya dado, aunque hay que pasar unos filtros muy severos. Lo tiene que proponer algún país con programa antártico y lo concede el SCAR. La propuesta tiene que estar bien justificada, identificar geo-

gráficamente con precisión el lugar y explicar las razones de la propuesta. En mi caso lo propuso el Programa Antártico de Bulgaria y lo justificaron por mis trabajos de investigación y por los de divulgación.

P: *¿Hay otros nombres españoles en la toponimia antártica?*

R: Sí, sí los hay. No de isla, que en eso soy el único español, pero nombres

de picos, bahías, playas... Creo que hay 25 o 30, entre ellos pioneros como Pepita (Castellví) y (Antonio) Ballester. Pero resulta triste que casi todas las toponimias españolas que hay las hayan propuesto otros programas, principalmente el búlgaro. No se entiende por qué los españoles no nos proponemos a nosotros mismos.

P: *¿Cómo es su isla?*

R: Es un islote rocoso de 750 metros



de largo y 350 metros de ancho, separado por un estrecho pasaje de la península de Hall, uno de los accidentes geográficos de la costa este de Snow Island. Entre ambas, existe una ensenada protegida de los fuertes vientos y corrientes marinas de la zona que, por este motivo, fue muy frecuentada por los cazadores de focas desde principios del siglo XIX.

P: ¿Cuándo piensa ir a verla?

R: Pues quiero ir, claro, pero aún no tengo ningún plan concreto.

P: Su principal tema de investigación ha sido el ozono ¿Cómo se interesó por él?

R: Mientras hacía la carrera un profesor nos habló del ozono y me sentí fascinado. Hice un trabajo amplio sobre el tema y más tarde me contactaron desde el INTA porque habían comprado un espectrómetro Dobson para medir ozono

y no sabían muy bien cómo manejarlo. Empecé a trabajar con ellos y más tarde me ofrecieron un contrato fijo. Mi trabajo era realizar mediciones del perfil de ozono en la columna atmosférica en diferentes puntos de la península, que se completaban con mediciones mediante globos sonda. Era la primera vez que se hacía de forma sistemática.

P: ¿Qué datos salían?

R: Las medidas eran normales dentro de lo que se sabía entonces. No teníamos una secuencia de muchos años. Veías oscilaciones, porque la capa de ozono no es una zona definida, y está a diferente altura según la latitud. Hacíamos dos mediciones al día y veíamos cómo evolucionaba durante el año.

P: *¿Cómo se planteó ir a la Antártida?*

R: Pues fue por casualidad. Cuando apareció el agujero de ozono allí dio la casualidad de que España estaba intentando montar su primera expedición allí. En 1986 el Instituto Español de Oceanografía mandó dos barcos, el Pescapuerta y el Nuevo Alcocer, con la idea de evaluar las posibilidades pesqueras de las aguas antárticas. Resulta que había una plaza libre y en el INTA consiguieron que la ocupase yo para hacer mediciones de ozono.

P: *Por entonces el agujero de ozono acababa de darse a conocer.*

R: Sí. En 1984 un japonés presentó en un congreso en Grecia donde un póster diciendo que en la Antártida desaparecía el ozono, pero nadie le hizo mucho caso. Al año siguiente, unos ingleses lo publicaron en Nature y empezó a interesar, pero tomó una nueva dimensión cuando la NASA reevaluó los datos que tenía del satélite Nimbus 7 y descubrió que mostraban el agujero desde hacía tiempo, pero como era un fenómeno que no esperaban lo interpretaron como un error de la medición. Ellos tenían un Dobson en el mismo Polo Sur, pero el responsable les echaba la bronca a los técnicos que lo manejaban diciéndoles que lo estaban haciendo mal y que calibrasen el equipo.

P: *Usted debió ser de los primeros en ir allí a comprobarlo ¿no?*

R: Sí, al año siguiente, pero fue todo muy precipitado. Me dijeron que me iba un viernes para salir el lunes y pude ir porque tenía los equipos embalados, ya que acabábamos de volver de Suiza para calibrarlos. Y así aparecí en la Antártida.

P: *¿Y qué resultados obtuvo?*

R: La verdad es que no pude hacer gran cosa. No medí el agujero porque ni siquiera fuimos en la época en que se produce, que es a finales del invierno austral y principios de la primavera; y además no llegamos a las latitudes donde aparece, aunque entonces aún no se sabía muy bien ni dónde ni cuándo se generaba. Luego entré en contacto con el programa antártico argentino y fui dos años a dos de sus bases en la época adecuada, de agosto a noviembre y en latitudes más altas.

P: *Y ahí sí vio el agujero.*

“Quiero reivindicar el papel de las mujeres en la exploración polar, empezando por Pepita Castellví, la primera jefa de una base antártica”

R: Sí, lo vimos. Pero nos dimos cuenta de que ya no tenía sentido llevar todo el equipo. Era 1988 y había muchos grupos midiendo el ozono y los satélites conseguían mejores mediciones. Lo que hicimos fue empezar a medir la concentración de dióxido de nitrógeno (NO₂) y eso sí era novedoso e importante, porque el NO₂ reacciona con el cloro de los CFC (los gases causantes del agujero), e impide así la destrucción de ozono. Eso explicaba las diferencias de distribución del agujero entre unas zonas y otras.

P: *¿Fue una sorpresa que se produjera en la Antártida y no en zonas más cercanas a las de emisión de los CFC?*

R: Lo que (Frank) Rowland y (Mario) Molina (premiados con el Nobel de Química por predecir el efecto de los CFC

sobre el ozono) pensaban era que se destruiría en todo el planeta, pero en otras zonas no se observaba. Creo que el agujero de ozono nos hizo ecologistas, porque nos permitió tener la primera visión de impacto global. La contaminación de un río o del aire, o el deterioro de un paisaje puedes verlo, pero era complicado pensar en algo como un spray que usabas en casa, cuyo gas parecía que se quedaría en las cercanías, se extendía por toda la atmósfera y llegaba a la Antártida y destruía el ozono.

P: *El mundo reaccionó muy rápido al problema.*

R: Sí, rapidísimo. En 1989 ya estaba el Protocolo de Montreal. Fue la primera gran victoria medioambiental de la humanidad. Teníamos un problema grave, se investigó, se pusieron los medios y creamos un protocolo, se dejó de emitir y hemos conseguido revertir el proceso.

P: *¿Como se consiguió?*

R: Nunca he sabido cómo lograron convencer a gobiernos y empresas. Está claro que los intereses económicos no eran tan fuertes como en el caso de los gases de efecto invernadero por el uso de combustibles fósiles, pero también los había. Es cierto que los CFC ya eran un compuesto obsoleto, había muchos otros de la misma familia como posibles sustitutos y además la patente de los CFC ya había expirado. Por eso China e India no querían firmar el tratado, porque con los nuevos compuestos tenían que pagar derechos. Entonces hubo un acuerdo para que se transfirieran esas nuevas tecnologías a los países en desarrollo.

P: *La eliminación de los CFC de la atmósfera es muy lenta. ¿Cómo va el proceso?*

R: Va muy bien, salvo algunos sustos puntuales como la pasada primavera antártica. En 1989 la previsión era que empezarían a disminuir a partir del 2000. Y así ha sido. Hace tres o cuatro años se publicó una reevaluación y se veía que

la tendencia de destrucción desde entonces se había reducido y estimaban que para 2040 o 2050 la recuperación sería completa.

P: ¿Echa de menos la Antártida?

R: Sí. Mucho, mucho. De hecho, he estado el año pasado, en 2019-2020, con los búlgaros, que me invitaron como escritor. El programa español solo admite que vayan científicos, pero hay otros países,

de ozono. Luego, en 2010 me pidieron impartir una conferencia sobre la conquista del Polo Sur, dado que al año siguiente era el centenario, y decidí escribir un libro sobre la aventura de Amundsen y Scott. El libro gustó, ya lleva cinco ediciones, y luego escribí otro sobre Shackleton, sobre Nansen, sobre el Fram y sobre los anteriores héroes de la Antártida.

P: Nunca se habla de mujeres exploradoras, ¿hubo muchas?

R: Quiero reivindicar el papel de las mujeres en la exploración polar, que es un mundo muy masculinizado, pero ha habido muchas mujeres, empezando por Pepita Castellví, o terminando con ella, porque Pepita fue la primera mujer jefa de una base antártica. Costó mucho que llegase la primera mujer científica, con motivo del



Javier Cacho con un pingüino barbijo durante una de sus estancias en la Antártida.

como Francia, EE. UU., Inglaterra y Australia, que llevan gente muy variada: músicos, escritores, artistas. Yo creo que se trata de propiciar la difusión de lo que es la Antártida de una manera amplia. Yo les prometí un libro que aún no he escrito.

P: ¿Cómo nació su vocación de escritor?

R: Creo que siempre he tenido esa vocación. Ya en 1989 publiqué, con mi mujer, el libro *La Antártida. El agujero*

P: ¿Está escribiendo algo ahora?

R: Sí, estoy escribiendo tres cosas: un libro para niños, que se llamará algo así como “Mis exploradores favoritos polares”, dentro de una colección de varios autores de exploradores en diferentes ambientes; otro sobre cocina antártica; con el director del programa búlgaro, y una periodista, a partir de entrevistas con 15 cocineros de otras bases; y uno sobre mujeres exploradoras polares.

Año Polar Internacional; costó mucho que las primeras dos mujeres se quedasen en McMurdo a pasar un invierno entero; y más aún para que la primera mujer pasase el invierno en el Polo Sur. Hay muchas mujeres que han representado un papel muy interesante y con una mentalidad muy distinta. Las primeras fueron acompañando a sus maridos, como Marilyn Peary, la mujer del conquistador del Polo Norte, que le acompañó en varias expediciones. ©



Simulación virtual de una explosión de materia oscura en el espacio.

En busca de la materia oscura, desconocida a pesar de suponer el 85% de la masa total del Universo

Los hilos transparentes del cosmos

Las estrellas binarias, los remanentes de supernovas, los cúmulos de galaxias o la materia que se acelera al acercarse a un agujero negro son algunos ejemplos de eventos que podemos observar si utilizamos un telescopio que estudie fuentes de rayos gamma. Al otro lado del espectro electromagnético se encuentra el fondo cósmico de microondas, la primera “fotografía” de un jovencísimo universo. En todos estos casos se emite radiación en alguna frecuencia

del espectro electromagnético; incluso la materia que permea los espacios interestelares es detectada con relativa facilidad. Sin embargo, existe un tipo de materia que ha esquivado sistemáticamente todos nuestros intentos por conocer su naturaleza más profunda: la materia oscura. Sabemos que existe pero desconocemos su naturaleza y composición. La ciencia intenta ahora ponerle cara.

■ Texto: **Lucía Casas** | Periodista de ciencia ■

En 1930 el físico teórico Wolfgang Pauli propuso la existencia de una partícula llamada neutrino para dar respuesta a la aparente pérdida de energía y momento lineal en la desintegración beta de los neutrones. Tras 26 años de búsqueda

frenética, Cowan y Reines consiguieron al fin demostrar experimentalmente la existencia de la partícula fantasmal de Pauli. Ocho años después, en 1964, Peter Higgs teorizó junto a otros investigadores sobre lo que hoy conocemos como

mecanismo de Higgs, pero hubo que esperar casi medio siglo para poder encontrar una partícula compatible con las propiedades del bosón de Higgs en el CERN. La ciencia no conoce un solo ritmo; avanza a golpe de suerte, de

ingenio y de trabajo, aunque no siempre es suficiente para dar con el paso adecuado.

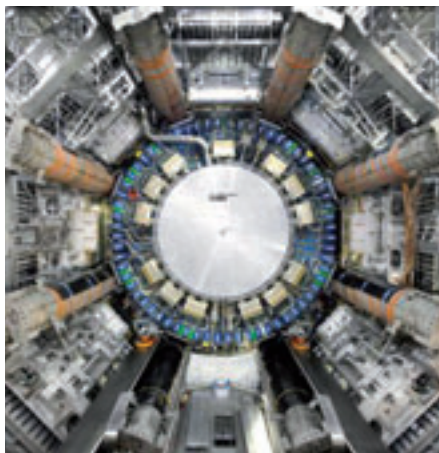
En la década de los 30 del siglo XX, los astrónomos Jan Oort y Fritz Zwicky llegaron mediante planteamientos diferentes a la misma conclusión; para explicar el comportamiento del universo a través de las observaciones debía existir otro tipo de materia que no podemos ver, ya que, al no interactuar electromagnéticamente, no puede apreciarse ni estudiarse a través de los distintos espectros de la radiación electromagnética. Casi un siglo después todavía ignoramos de qué está formada y apenas comprendemos nada de ella, salvo que está ahí y que, de alguna manera, actúa como un hilo que conecta y engulle a las galaxias, atravesando cada árbol, cada calle y cada objeto de nuestras vidas cotidianas.

Las huellas de un gigante

Fritz Zwicky fue, junto con Oort, uno de los primeros astrónomos que se planteó la existencia de materia desconocida y no luminosa. En 1933 publicó su investigación sobre la velocidad de las galaxias en el cúmulo de Coma, una agrupación de unas 1.000 galaxias unidas gravitatoriamente a una distancia media de 321 millones de años luz de la Tierra. Zwicky estimó que la velocidad a la que se movían las galaxias en el cúmulo era unas diez veces mayor que la debida teniendo en cuenta la masa del cúmulo. Solo con la masa aportada por la materia ordinaria no podía explicarse que las galaxias pudieran permanecer unidas mientras se movían a tan altas velocidades, de modo que sugirió la existencia de una enorme proporción de materia oscura para eliminar la discrepancia entre las pruebas observacionales y las estimaciones. Por supuesto y, para desagrado de Zwicky, su teoría no tuvo ningún respaldo por

parte de la comunidad científica. Fue Vera Rubin quien sacó del anonimato a la materia oscura en 1975 con su estudio sobre la curva de rotación de las galaxias. Rubin descubrió, junto a Kent Ford, que las estrellas que se encontraban en las zonas externas de una galaxia se movían prácticamente a la misma velocidad que la zona central de la misma.

Sobre este descubrimiento, Alberto Casas, investigador del Instituto de Física Teórica de Madrid, dice: “A partir de las



Detector Atlas 2 del acelerador LHC, en Ginebra.

observaciones de la velocidad de las estrellas periféricas en una galaxia podemos deducir la cantidad de masa que debe tener esta y cómo está distribuida simplemente aplicando la Ley de Newton. Sin embargo, la masa que se obtiene es mucho mayor de la que se puede observar, es decir, la materia ordinaria (estrellas, planetas, gas y polvo interestelar). En Andrómeda, por ejemplo, si toda la materia fuera materia ordinaria, la velocidad de rotación de las estrellas periféricas debería ser mucho más lenta a medida que te alejas del centro; sin embargo, es prácticamente la misma a todas las distancias. Esto supone una evidencia muy fuerte de que en todas las galaxias hay mucha más materia que la que se observa, algo corroborado por otros tipos de observaciones”.

Aunque la curva de rotación de las galaxias fue la primera prueba contundente sobre la existencia de materia oscura, no es la única ni la más robusta. Tal como indicó en su día Zwicky, la mera existencia de los cúmulos de galaxias nos deja entrever



Galaxia espiral barrada: el estudio de la curva de rotación de las galaxias de Vera Rubin se considera la primera prueba de la existencia de materia oscura.

Ni antimateria ni energía oscura

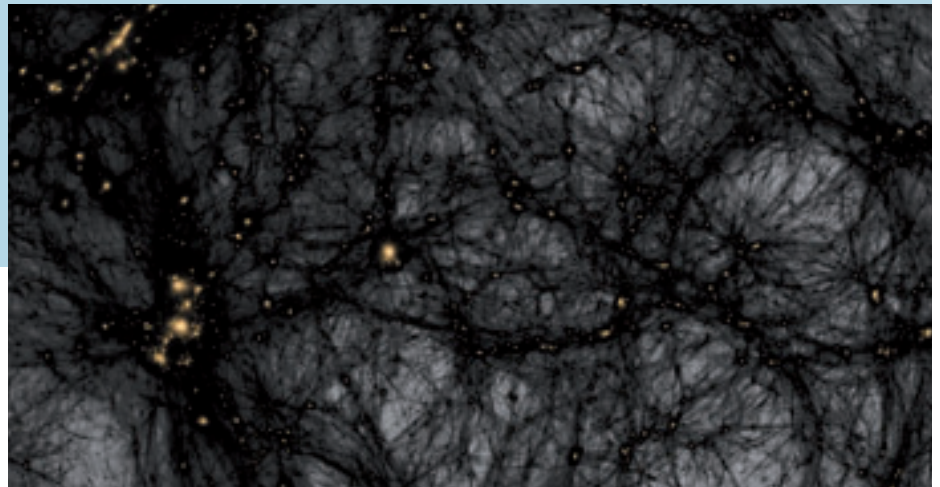
A menudo se confunden tres términos que para nada guardan relación, aunque sus nombres puedan llevar a pensar lo contrario. Energía oscura, antimateria y materia oscura son completamente diferentes. La antimateria nos resulta completamente conocida. Sabemos que está formada por antipartículas con características físicas iguales a las de la materia ordinaria salvo la carga eléctrica, que siempre es contraria a la de su análogo ordinario. Por lo demás, interaccionan de la misma forma que la materia bariónica. En contraposición al electrón, por ejemplo, existe el positrón, que tiene una carga positiva. Cuando una partícula y su antipartícula se encuentran se produce la aniquilación de ambas, generando un evento altamente energético o bien la producción de otras partículas. El universo que conocemos existe gracias a una mayor presencia de materia que de antimateria, ya que de otro modo no podrían llegar a formarse estructuras complejas y estables de materia y, como consecuencia, tampoco vida de ningún tipo.

Por otra parte, está la energía oscura, que supone el 73 % de la

energía total del universo. Todavía desconocemos su naturaleza, pero su existencia se infiere a partir de la expansión acelerada del universo, que comenzaría según las estimaciones hace unos 6.000 millones de años. La energía oscura actúa como una fuerza gravitacional repulsiva que aumenta la distancia existente entre los cuerpos y la masa del universo, de modo que, debido a esta expansión del propio espacio-tiempo, la distancia que nos separa de otras galaxias se incrementa a cada momento. La energía oscura se encuentra de manera uniforme en el universo, justo lo contrario a la materia oscura, que tiende a agruparse debido a su interacción gravitacional. Además, la materia oscura mitiga el efecto expansivo de la energía oscura, debido precisamente a su tendencia a formar halos y filamentos ligados gravitacionalmente

la necesidad de la presencia de más materia. Gracias a la tecnología actual podemos observar con mucha más precisión estos objetos y, aun teniendo en cuenta la cantidad de galaxias que alojan los cúmulos como el de Coma y el gas intergaláctico que permea el mismo, no podemos explicar que estas se mantengan ligadas gravitatoriamente; mucho menos la proporción de otros efectos que se producen dentro del cúmulo, como las lentes gravitacionales.

Las lentes gravitacionales son fenómenos que se producen cuando un objeto muy masivo curva la luz de otros cuerpos situados detrás de este, generando un efecto *lupa* que nos permite ver cuerpos que, en realidad, se encuentran en un lugar inaccesible para nuestras observaciones. Este efecto, que además deforma y amplifica los cuerpos que proyecta, tiene en los halos de materia oscura que rodean



Interpretación de la distribución de halos de materia oscura en una región del universo.

los cúmulos y las galaxias a su aliado perfecto: los halos de materia oscura son altamente masivos y su pozo gravitacional es enormemente poderoso. A su vez, las lentes gravitacionales nos revelan información sobre la naturaleza de estos halos y su distribución, ya que hemos detectado este tipo de fenómenos en zonas del universo donde aparentemente no hay materia visible que pueda producir estas proyecciones.

Otra de las pruebas fundamentales para defender la existencia de materia oscura es el Fondo Cósmico de Microondas. Esta radiación electromagnética, que

fue descubierta en 1965, ocupa el universo por completo; recibimos su señal desde cualquier rincón, pues el fondo cósmico no es otra cosa que la fotografía más antigua que tenemos y que nos muestra cómo era el universo en su infancia, tan solo 380.000 años después del Big Bang. El universo primigenio estaba compuesto por un plasma a altísimas temperaturas; una sopa cuyos ingredientes eran principalmente electrones, fotones y materia bariónica, protones y neutrones. Debido a la elevada temperatura, la materia se encontraba totalmente acoplada e interactuando en todo momento,

impidiendo que los fotones pudieran moverse. A medida que el universo se fue expandiendo el plasma pudo enfriarse, permitiendo que las partículas comenzasen a formar átomos de elementos como el hidrógeno y que los fotones viajaran al fin a través del espacio. El fondo cósmico es la imagen más antigua que tenemos del universo porque representa el instante en que los fotones se desacoplaron de la materia. Por si esto no fuese lo suficientemente increíble, el fondo cósmico también nos aporta información sobre la temperatura del universo y, cómo no, sobre la existencia de materia oscura.

Según resume Julia Ferrer, física teórica e investigadora del Instituto de Astrofísica de Andalucía, “se piensa que las partículas de materia oscura se desacoplaron antes de la emisión del fondo cósmico de microondas. Cuando la materia oscura se desacopló empezó a atraerse entre ella, y fue formando pozos de potencial gravitatorio, de modo que cuando los fotones y la materia bariónica dejaron de interactuar, esta materia comenzó a caer en esas zonas que

previamente se habían formado gracias a la materia oscura. Si no hubiera existido la materia oscura no se podría explicar cómo hemos tenido tiempo para que se formen las estructuras a gran escala que existen hoy día en el universo”.

Además, la materia oscura es la única explicación que podemos dar para las anisotropías o inhomogeneidades que se observan en el fondo cósmico de microondas, las cuales hacen referencia a la temperatura y densidad del universo y se observan como cambios locales de color. Francisco Prada, Doctor en Astrofísica y miembro del programa MultiDark para la detección de la materia oscura, apunta que “si no hubiera materia oscura, estas variaciones deberían producirse en una parte en mil y no en cien mil. El universo a gran escala es muy homogéneo, pero presenta diferencias. Las galaxias no son completamente iguales, por ejemplo”. Sin una materia precursora que formase pozos gravitacionales, el universo tendría un aspecto mucho más homogéneo, ya que la materia se habría expandido de manera uniforme dificultando la formación de

galaxias y cúmulos de galaxias o al menos retrasando el desarrollo de estas estructuras. Además, las anisotropías del fondo cósmico serían mucho menores.

Como una silueta en la noche

Al igual que la búsqueda de vida fuera de la Tierra se basa en los marcadores que explican la biología de nuestro planeta, los científicos necesitan tener un retrato de la materia oscura que limite y reduzca sus posibles candidatos. Así, tenemos cierta información no trivial sobre las características de este tipo de materia: la materia oscura tiene un nombre atractivo pero que puede inducir a error: más que oscura es, literalmente, transparente. No interactúa con las ondas electromagnéticas, ni las emite ni las absorbe, de ahí su invisibilidad. Además, sabemos que la materia oscura es estable, ya que de no serlo habría sido relativamente sencillo observar su semidesintegración en otros elementos menores. Según los modelos más aceptados, se espera que la materia oscura tenga una temperatura media

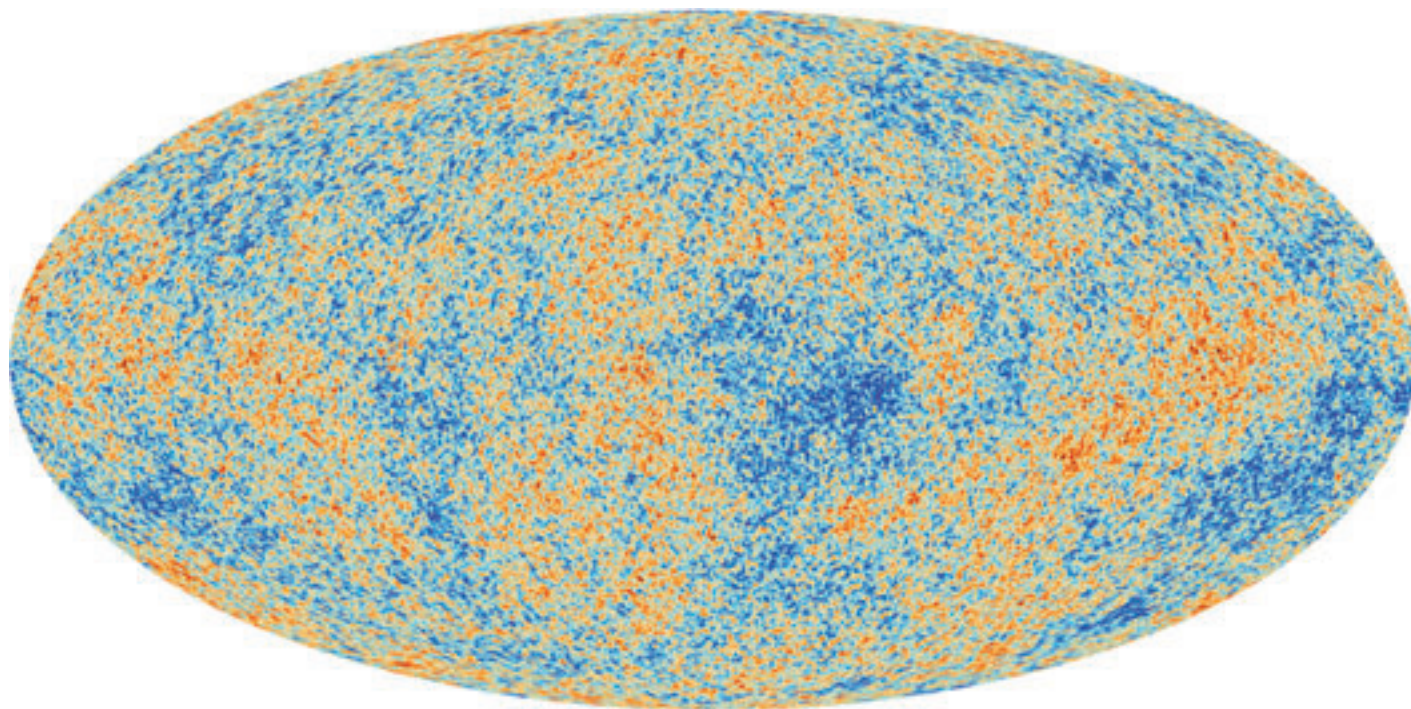
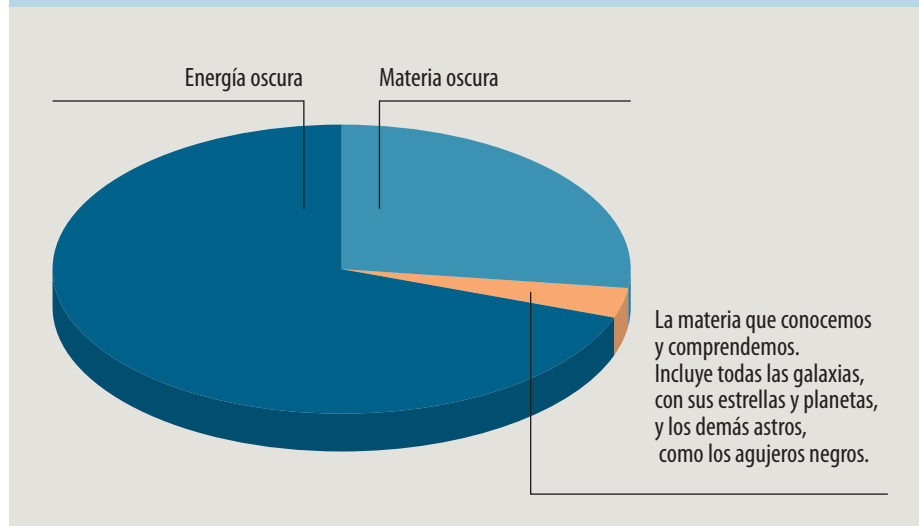


Imagen de la radiación de fondo de microondas, tomada por la sonda espacial WMAP.

NASA

¡Hay un poco de 'luz' en mi materia oscura!

Hoy sabemos que la materia oscura supone el 85 % de la materia del universo. Todo aquello que podemos observar, galaxias, gas intergaláctico, estrellas de neutrones, exoplanetas, agujeros negros... pertenece al 15 % restante. Si además de tener en cuenta la masa del universo hablamos de la distribución de la energía total de este, el resultado es aún más desconcertante: tan solo un 4 % es materia ordinaria, mientras que la materia oscura representa el 23 % del total. Casi tres cuartos de la energía del universo (un 73 %) corresponden a la extraña energía oscura, de la que apenas conocemos nada. Resulta imposible imaginar qué aspecto tendría el espacio si su ladrillo principal emitiese algún tipo de luz. Por suerte, aunque no podamos verla, sí podemos detectar cómo se comporta y cómo afecta a la materia ordinaria. Su huella se encuentra constantemente en los eventos que estudiamos, ya que no interactúa con la luz, pero sí con la gravedad. El concepto observar tiene, en astronomía, muchas implicaciones diferentes. Podemos observar la luz que nos llega de una estrella, o el movimiento de los planetas alrededor del Sol, pero no siempre tenemos la misma suerte. Descubrimos que en el sistema solar había un octavo planeta gracias a las desviaciones en la órbita de Urano, causadas por la influencia gravitatoria del hasta entonces desconocido Neptuno. Con la materia oscura ocurre algo similar: sabemos que tiene que estar ahí por cómo se comporta aquello que sí vemos. ▶



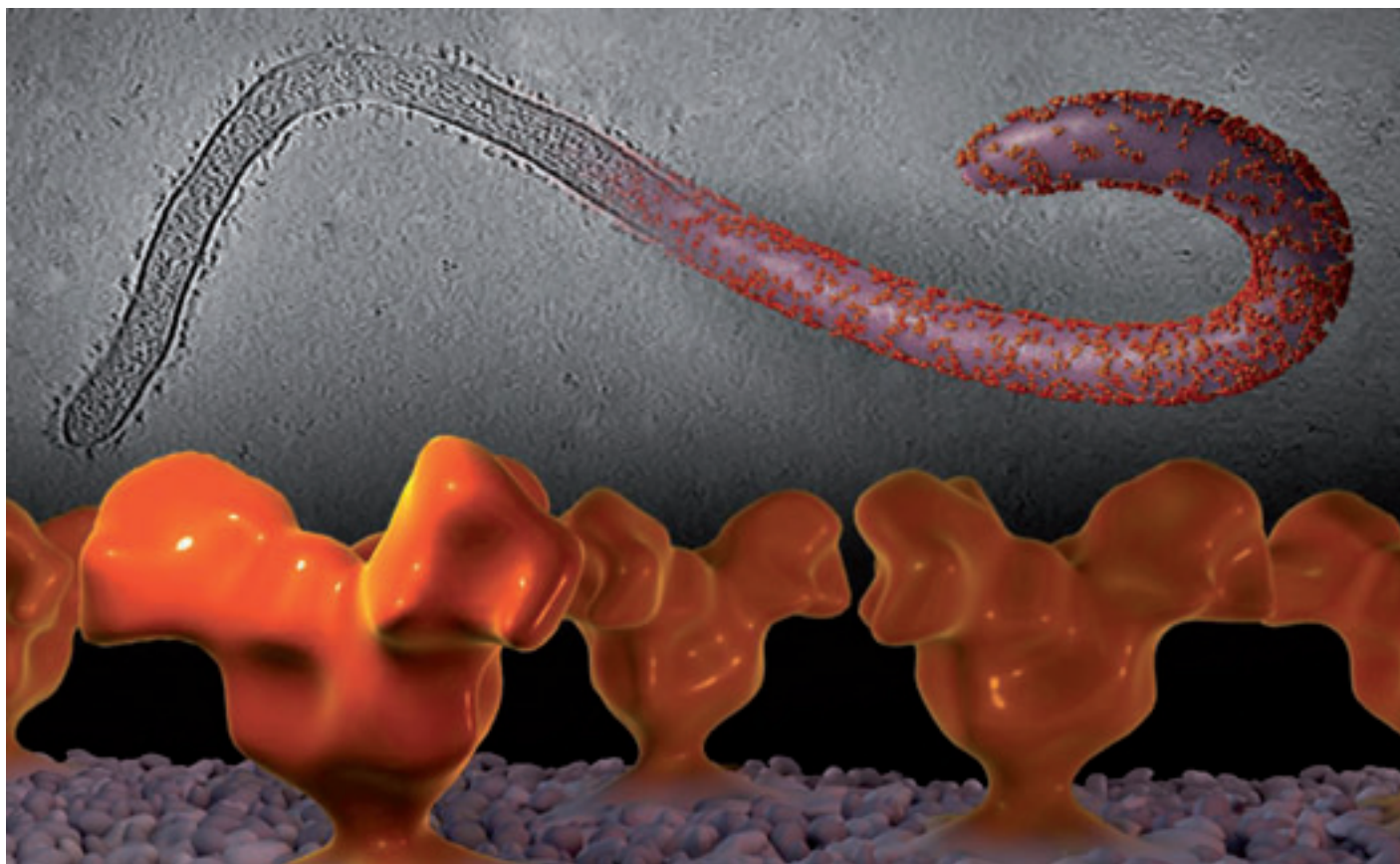
fría y, por tanto, se mueva a velocidades no relativistas, es decir, muy por debajo de la velocidad de la luz, ya que de no ser fría habría tenido más dificultades a la hora de aglomerarse y formar grandes estructuras como los halos que envuelven a las galaxias. Teniendo esto en cuenta, se han planteado diferentes posibilidades sobre la composición de la materia oscura.

Las WIMP (partículas masivas con una interacción débil, por sus siglas en inglés) han sido históricamente una de las propuestas más firmes. Estas partículas, aún solo hipotéticas, tendrían características muy similares a las mencionadas anteriormente. Las WIMP interactuarían tan solo con la gravedad y serían en la mayoría de los casos una extensión del actual modelo estándar de

partículas. Dentro de esta nueva clase de partículas existen diferentes candidatos, entre ellos el neutralino, la partícula supersimétrica del conocido neutrino. También en la teoría de supersimetría, que sugiere la existencia de partículas más allá del modelo estándar, se ha teorizado sobre la existencia del gravitino, una partícula supersimétrica compañera del también hipotético gravitón. Axiones, WIMPzillas estériles, partículas de Kaluza-Klein en la teoría de cuerdas... a la materia oscura no le faltan candidatos y, sin embargo, su composición se sigue resistiendo a la búsqueda que realizan misiones, proyectos, telescopios y aceleradores de partículas empeñados en descubrir al fin de qué se compone esta materia.

“Hay indicios fuertes de que tiene que haber una nueva física”, señala Casas, “pero construir instrumentos que nos permitan detectarla puede requerir mucho tiempo y financiación. Todavía no entendemos por qué la naturaleza es como es. A medida que profundizas todo se vuelve más difícil, pero a la vez obtienes la fascinación de que estás investigando cuáles son las motivaciones íntimas de la naturaleza. Perseverar en esta empresa es fundamental si queremos comprender por qué es como es el universo y cuál es nuestro lugar en él. Y este camino pasa por entender de qué está compuesta la materia oscura”.

El filósofo Séneca dijo una vez que ningún descubrimiento se habría hecho si nos contentásemos con lo que ya sabemos. El deseo del ser humano por comprender la naturaleza del universo nos sitúa en una frontera cada vez más fina entre lo comprensible y lo extravagante. Quizá lo extravagante algún día nos resulte conocido, o quizá lo que ahora resulta inteligible en el futuro llegue a ser falso. El hilo invisible que conecta y permea el universo permanece en la frontera, inamovible, pero la ciencia, que no entiende de ritmos, tampoco atiende al desaliento. ©



Criotomografía electrónica del virus del Ébola y estructura 3D de sus espículas.

La nueva era de la criomicroscopía electrónica

De la célula al átomo

Con los avances en microscopía electrónica a muy bajas temperaturas (criomicroscopía) se han alcanzado resoluciones atómicas. Esto facilita el estudio de la estructura de las proteínas hasta el punto de entender sus interacciones con otras moléculas. Las aplicaciones van desde el diseño de fármacos hasta el desarrollo de vacunas, como se prueba contra las espículas de la corona del SARS-CoV-2. En España, el Centro Nacional de Biotecnología ha adquirido el criomicroscopio electrónico más potente del mercado, lo que permitirá a nuestros investigadores realizar importantes contribuciones a la biología estructural.

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

La lente más antigua que se conoce fue tallada en cristal de roca hace 3.000 años. La encontró en 1850 el arqueólogo británico Austen Henry Layard, en el palacio de Nimrud junto al río Tigris, una de las capitales del imperio

asirio, cerca de la actual Mosul (Irak). Su función es incierta. Pudo servir como artillugio de aumento, como parte de un telescopio o haberse utilizado como una mera joya, pues sus cualidades ópticas son escasas. Algo mejor es la lente hallada

en el Monte Ida, en Creta, que data del siglo quinto antes de Cristo y permite observar objetos siete veces más grandes con perfecta claridad.

En la actualidad, con el desarrollo de la microscopía y otras ciencias, somos capaces de ver preparaciones a una resolución de 0,39 ángstroms (1 ángstrom, o Å, es el tamaño aproximado de un átomo). Ahora no solo usamos la energía lumínica, sino haces de electrones y otras fuentes, pasando de la microscopía óptica a la electrónica. En estos momentos, el ojo humano ya no se centra en las células que constituyen las distintas formas de vida, sino en los mismos átomos que componen la materia. Para ello se ha reducido al máximo la temperatura, evitando parte del daño que ejerce la radiación electrónica sobre la muestra. Penetramos en la era de la criomicroscopía, cuya mejora sustituye en ocasiones incluso a la propia difracción de rayos X.

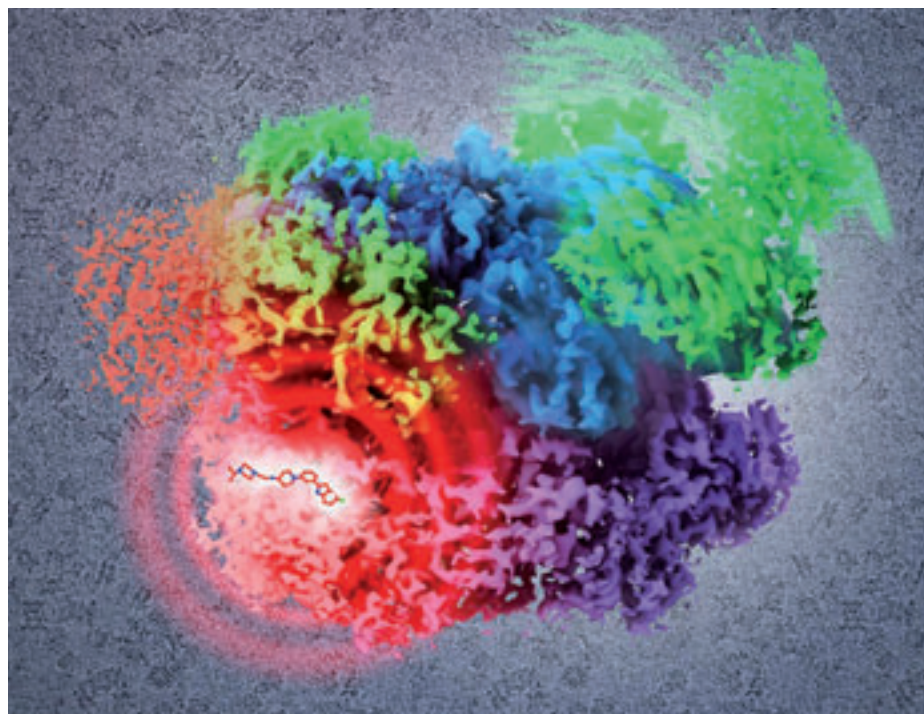


Imagen de criomicroscopía electrónica y reconstrucción 3D atómica de la proteína p97 unida a un inhibidor rojo como terapia contra el cáncer.

El hito más reciente en criomicroscopía electrónica se publicó en octubre de 2020 en dos artículos simultáneos de la revista *Nature*. En ambos se estableció, mediante criomicroscopía electrónica a resolución atómica, la estructura molecular de una proteína. Por un lado, el grupo de Holger Stark, director del Departamento de Dinámica Estructural Instituto Max Planck de Química Biofísica y catedrático de la Universidad de Göttingen (Alemania), determinó la estructura de la apoferritina humana (a resolución de 1,25 Å). Esta proteína capta el hierro de los alimentos en la mucosa intestinal. Por otro, el equipo de Sjors Scheres, del Laboratorio de Biología Molecular (MRC) de la Universidad de Cambridge, obtuvo por criomicroscopía electrónica de una sola partícula la estructura atómica de la proteína humana de membrana 3 GABA_A (a 1,7 Å).

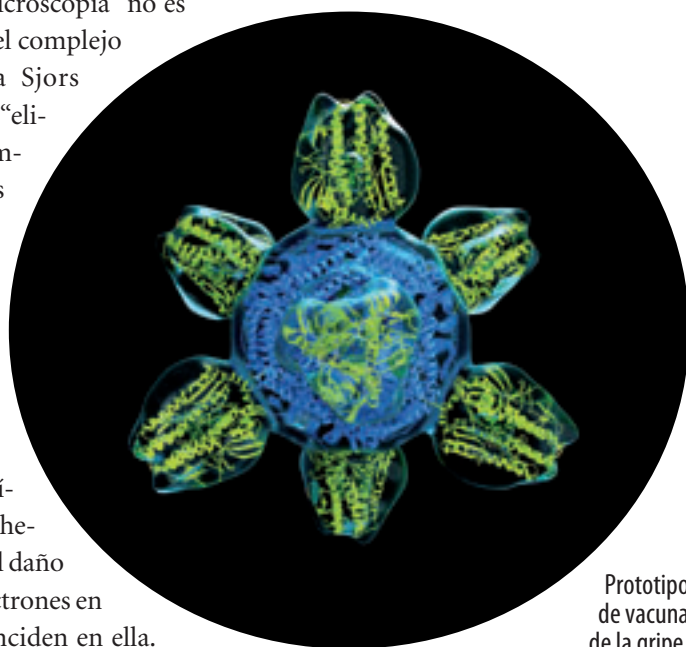
Dados los resultados de la criomicroscopía electrónica, cabe preguntarse sobre las ventajas de esta técnica frente a su gran rival, la cristalografía de rayos

X, el método basado en su difracción para visualizar estructuras moleculares tridimensionales y obtener modelos atómicos. Para la criomicroscopía “no es necesario cristalizar el complejo en estudio”, explica Sjors Scheres, por lo que se “elimina un obstáculo importante para muchas muestras. También se necesita mucha menos muestra”, destaca. La criomicroscopía es, en principio, más rápida, flexible y fácil.

En cuanto a los límites de la técnica, Scheres hace hincapié en el daño que producen los electrones en la muestra cuando inciden en ella. “Esto no se puede resolver”, asegura. “Requiere obtener imágenes con dosis bajas, lo que genera una gran cantidad de ruido”. Un ejemplo del efecto de la radiación es el que se produce al adquirir las imá-

genes de la proteína beta-galactosidasa, cuyas cadenas laterales ácidas (glutamato) se descomponen antes que las cadenas laterales básicas (histidina) a una resolución de 3,2 Å.

En relación con las dificultades de la criomicroscopía electrónica, según Scheres, los complejos más difíciles de investigar serían los de menor tamaño (por debajo de 100 kDa), ya que en ellos “la relación señal/ruido en las imágenes es incluso menor”, indica. “Otra dificultad radica en las muestras, que son muy flexibles, ya que promediar diferentes conformaciones juntas en una reconstrucción conduce a la pérdida de información”. En este sentido, es fundamental el avance en el procesamiento de las imágenes. “Las técnicas modernas de aprendizaje automático están comenzando a ser poderosas para manejar proteínas flexibles”, avanza. Para Scheres, otro de los retos de la criomicroscopía electrónica sería fabricar microscopios más baratos, de menor voltaje y a la vez más potentes en cuanto a la in-



Prototipo de vacuna de la gripe.

formación que proporcionan con una determinada dosis de radiación, como están desarrollando en el MRC Christopher Russo y el premio nobel de química

Richard Henderson. Por su parte, Scheres es el autor de un potente programa informático llamado RELION, que transforma datos de criomicroscopía electrónica de escasa nitidez en imágenes detalladas de alto valor, lo que permite a los investigadores analizar en profundidad estructuras moleculares de interés.

Los modelos 3D son clave para diseñar fármacos

Conocer la estructura atómica y tridimensional de las proteínas y de otras moléculas es una cuestión importante en biomedicina. Según cómo se dispongan sus átomos, estos complejos adquieren formas distintas, lo que condiciona su funcionamiento y su interacción con otros compuestos. Esto puede ser crucial para establecer estrategias que anulen o potencien su función, lo que ayuda a entender el mecanismo de acción de determinadas sustancias en una célula.

Una vez determinada la composición, a partir de la forma se pueden diseñar fármacos y planear distintas terapias. Por criomicroscopía electrónica se ha estudiado la secuencia de cambios estructurales la proteína p97, implicada en una enfermedad neurodegenerativa y en el cáncer. Para bloquearla, se ha analizado su estructura a nivel atómico y se han elaborado modelos 3D que se unen a ella en distintos puntos y la inactivan.

En este sentido, está encaminado el estudio de Scheres sobre el modelo atómico de las proteínas tau, asociadas a distintas patologías del sistema nervioso como el alzheimer o el parkinson. En la primera juegan un papel importante dos proteínas: la beta-amiloide, que forma placas, y las tau, que cambian de forma y originan ovillos neurofibrilares. Tanto las placas como los ovillos desencadenan un efecto neurotóxico que destruye neuronas. Además, los defectos de tau (que en su configuración normal juega un papel importante en el transporte de nutrientes y



Jose María Valpuesta, director científico del Servicio de Criomicroscopía del CNB.

de otras sustancias en la célula nerviosa) impiden el correcto funcionamiento de los microtúbulos neuronales, por lo que el transporte de nutrientes se interrumpe. El trabajo de Scheres apunta a estructuras amiloides diferentes para enfermedades neurodegenerativas distintas, y de igual tipo en pacientes con la misma dolencia.

Para la elaboración de vacunas también se recurre a estas técnicas, como se ha visto con el coronavirus SARS-CoV-2. Su proteína S, la que forma las espículas de la corona, ha sido ampliamente estudiada para tal fin. Lo mismo ocurre con el VIH, el Zika, el Ébola o la gripe. Una de las aproximaciones que intentan construir una vacuna universal para la gripe está basada en la estructura tridimensional de una proteína central rodeada de 8 proteínas virales. Los modelos 3D que se han creado para su diseño se han obtenido por criomicroscopía electrónica de alta resolución.

Otro ejemplo de estructura 3D para la que se recurre a la criomicroscopía electrónica es el origami de ADN. Este complejo está formado por distintas hebras de la cadena de material genético unidas entre sí formando láminas o blo-

ques de distintas formas. Se suele usar el ADN del virus M13, que una vez agrupado y replegado funciona como una nanoestructura a modo de andamio. Su utilidad está en la nanorrobótica y en la administración de fármacos. La criomicroscopía electrónica permite el diseño correcto y eficaz de este origami para que funcione de forma adecuada.

El mayor criomicroscopio de España

El 26 de mayo de 2021 se inauguró una de las instalaciones científicas más prometedoras de España. El entonces ministro de Ciencia e Innovación, Pedro Duque, acudió a la puesta en marcha en el Centro Nacional de Biotecnología (CNB), perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), del criomicroscopio electrónico de mayor resolución que operará en nuestro país. Se trata de un JEOL CRYO ARM 300, el modelo JEM-Z300FSC de la compañía japonesa. Trabaja a la temperatura del nitrógeno líquido, de forma totalmente automática, para adquirir datos de alta resolución (incluso a nivel atómico) y reconstruir partículas indi-

viduales de macromoléculas biológicas o partículas virales. Se pueden cargar hasta 12 muestras a la vez y obtener datos de forma ininterrumpida.

Con un presupuesto de unos 4,4 millones de euros por aparato, este es el primero que ya funciona en España, al que le seguirá el del Centro Vasco de Biofísica de Bizkaia (Biofisika), en el parque científico de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). En Madrid, el responsable del Servicio de Criomicroscopía del CNB, José María Valpuesta (quien también preside la Sociedad Europea de Microscopía), coordina los distintos proyectos que usarán estas instalaciones y a la vez dirige su propio laboratorio de investigación, enfocado en el modelado atómico por criomicroscopía electrónica de alta resolución para un importante tipo de proteínas, las chaperonas.

Primera parada: el virus SARS-CoV-2

Debido a la pandemia de coronavirus, el arranque del JEOL CRYO ARM 300 “ha tardado algo más de lo previsto porque los ingenieros que deben hacer la parte más fina de la instalación no podían venir a España”, comenta Valpuesta. “Todavía no funciona al cien por cien”, aclara, “pero va bastante bien. Ya lo utilizan investigadores españoles. Pronto los habrá europeos también”. En este contexto de pandemia, la comunidad científica internacional se ha volcado en el estudio de las particularidades del nuevo virus SARS-CoV-2 para poner fin a la covid-19. No es de extrañar que nada más adquirir este criomicroscopio electrónico, los científicos españoles se vuelquen en aplicar esta tecnología para erradicarlo.

“Ahora mismo lo que se ha hecho fundamentalmente son investigaciones sobre las espículas del coronavirus, que son las que reconocen las células que van



Criomicroscopio Jeol 300 instalado en el Centro Nacional de Biotecnología.

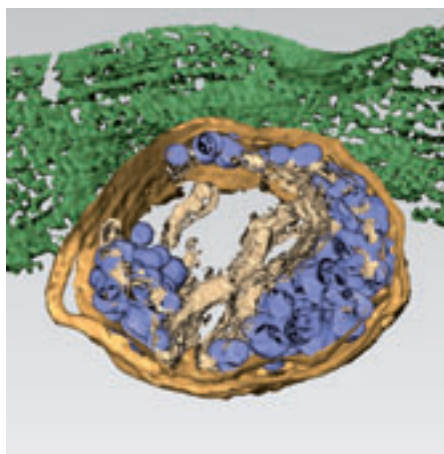
a infectar”, señala Valpuesta. Para el uso del nuevo aparato, “el CSIC ha dado prioridad a las investigaciones sobre el coronavirus”, afirma. Investigadores españoles de esta institución y de otros centros de nuestra geografía estudian la estructura de las proteínas que forman la corona del virus “para conocer el procedimiento de la infección”. En algunos casos, comenta Valpuesta, utilizan anticuerpos de

distintos tipos para paralizar el papel de las espículas del mismo.

Para obtener la forma de una estructura biológica (órgano, célula, molécula...) se pueden emplear distintos métodos y microscopios. Las altas resoluciones de los criomicroscopios no han sustituido al resto de técnicas o aparatos. Los microscopios ópticos convencionales, confocales o electrónicos aún son perfecta-



Sala de adquisición de imágenes del servicio de criomicroscopía del CNB. A la izquierda, tomografía electrónica 3D de un lisosoma humano (amarillo) cargado de reovirus (azul).



mente válidos. Cada uno permite abordar, con distintos objetivos y presupuestos, un tipo distinto de estudio.

En la criomicroscopía electrónica el método es muy sofisticado. La muestra se prepara a temperaturas de nitrógeno líquido (de entre -180 y -190 °C) que funciona a gran velocidad para que el agua que rodea o contiene la muestra no cristalice. Este proceso se llama vitrificación y se aplica en pequeñas alí-

cuotas de muestras en suspensión, en rejillas perforadas, donde se incrustan en hielo vítreo (no cristalino). Este es el paso crítico de la criomicroscopía y el “cuello de botella”, especifica Valpuesta, de su avance. A continuación, se pueden obtener imágenes de las muestras en condiciones criogénicas para análisis 2D o 3D. Esto se hace “con muy poca radiación electrónica, para evitar que esos electrones con los que se obtiene la información al pasar por la muestra no la dañen”, explica.

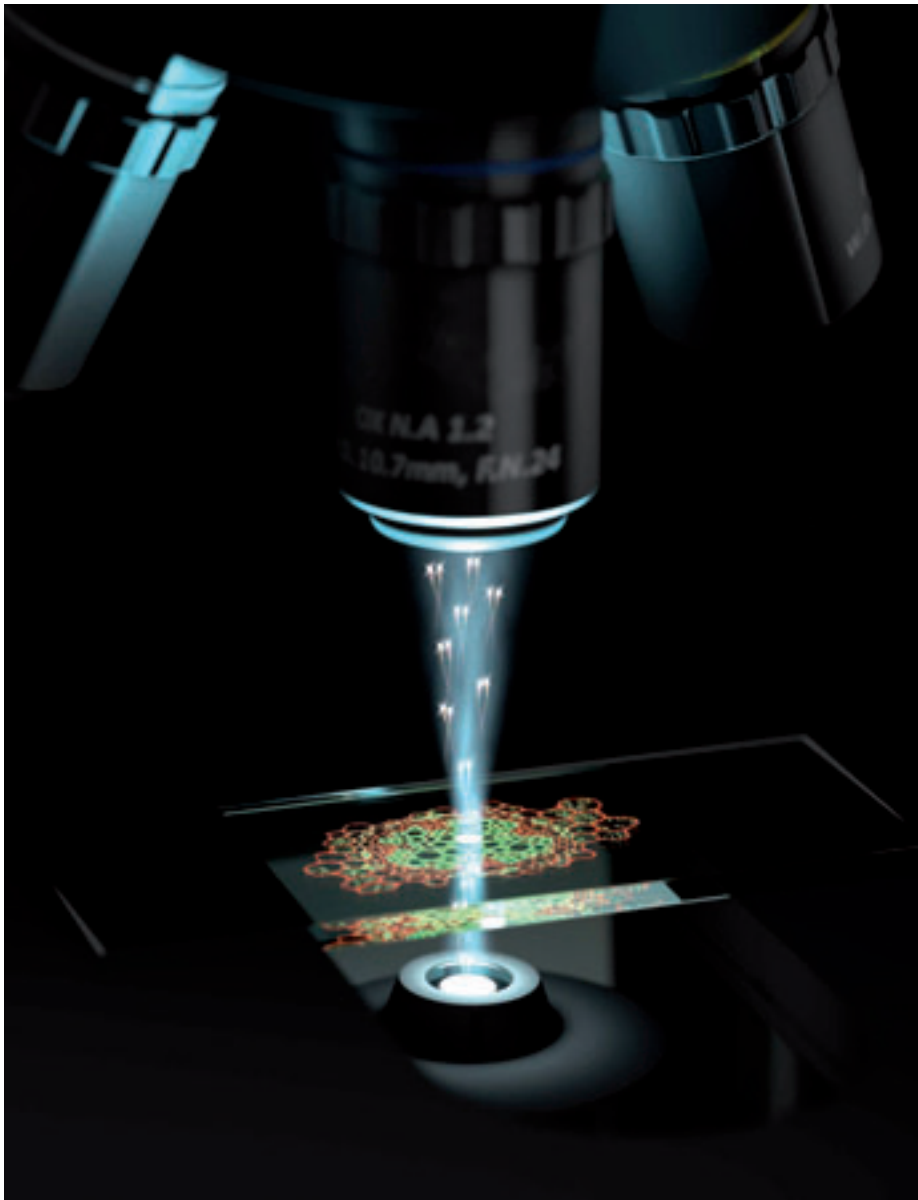
Con el criomicroscopio electrónico se obtienen miles de imágenes de la suspensión que contienen, por ejemplo, distintas partículas de una proteína. Estas caen en la rejilla con infinitas posiciones. Lo que se hace entonces es adquirir los datos suficientes de todas ellas para que después, durante el procesamiento informático de las imágenes, el programa

calcule el promedio de millones de ellas, hasta lograr la estructura más nítida de la muestra, incluso a resoluciones atómicas o cercanas a ellas.

Con los proyectos que en el CNB estudian el SARS-CoV-2 lo que se pretende es conocer la estructura atómica y tridimensional de las espículas del virus, para entender cómo funcionan. Para ello, es imprescindible esta técnica de tan alta resolución. “La criomicroscopía electrónica se está convirtiendo en el arma estructural más poderosa que hay ahora mismo”, destaca Valpuesta.

Criotomografía electrónica

Pero no todo es obtener formas de proteínas. En el estudio de las células, como cada una es distinta, no se pueden reconstruir con el promedio de las otras. La microscopía electrónica de transmisión de cortes seriados resolvería este



Microscopio cuántico no lineal.

problema, pero es un método largo y tedioso que no siempre es adecuado. Así es como entran en juego otras formas de abordar la investigación celular, como la criomicroscopía tomográfica, que es muy parecida a la Tomografía Axial Computerizada, el TAC que usan los hospitales.

En estos aparatos clínicos al paciente le rodea una fuente de rayos X y de detectores de radiación con movimientos de rotación alrededor del cuerpo para reconstruir una parte de su anatomía. En la criotomografía electrónica, los elec-

trones inciden en una portamuestras que rota para obtener la morfología de las células, sus orgánulos y otras estructuras celulares a muy alta resolución.

Además, existe otra técnica que imita a la potente difracción de rayos X. Utiliza un haz de electrones que difractan sobre la muestra y luego se enfocan con un sistema de lentes para formar una imagen. Este método emplea el criomicroscopio como difractor y tiene la ventaja de que se pueden utilizar microcristales, “cristales de ridículo tamaño, diez mil veces más pequeños que los que se usan en

rayos X (de 1 milímetro cúbico)”, sostiene Valpuesta, “lo que permite determinar estructuras de drogas muy pequeñas, que no pueden obtenerse de otra forma”.

El avance de la microscopía se da en todas sus variedades. La universidad australiana de Queensland sorprendió recientemente con la publicación en la revista *Nature* de un “microscopio cuántico no lineal mejorado”, una modificación que permite a los investigadores examinar células vivas con gran detalle sin destruirlas. “Hemos demostrado que es posible obtener imágenes biológicas más allá de los límites de la técnica convencional. Los desafíos para la microscopía cuántica estriban en usar la técnica para aprender cosas nuevas sobre la estructura y el comportamiento de los sistemas biológicos, como impulsar el rendimiento hasta mejorar aún más el contraste y la velocidad de la imagen”, explica Warwick Bowen, catedrático responsable del estudio y director de la Iniciativa Precision Sensing de la Universidad de Queensland.

Pero si hay una técnica que resulta prometedora, por la cantidad de información simultánea que ofrece, es la que combina lo mejor de la microscopía óptica con la electrónica. Se trata de la criomicroscopía correlativa y resuelve el problema que muchos investigadores tienen ante la necesidad de aplicar distintos métodos a una misma célula o estructura.

La criomicroscopía correlativa relaciona ambas técnicas (criomicroscopía óptica y electrónica). Permite estudiar una muestra a nivel celular (con microscopía óptica) y a la vez (literalmente la misma célula y no la de al lado) con el microscopio electrónico. Así se relaciona la biología celular con la biología estructural, lo que se logra mediante técnicas de microscopía de barrido FIB-SEM (Focused Ion Beam Scanning Electron Microscopy), también disponibles en el CNB. ©

Verificaciones de la Unión Europea sobre la vigilancia de la radiactividad en el medio ambiente

El artículo 35 del Tratado de Euratom requiere que cada Estado miembro de la Unión Europea disponga de las instalaciones necesarias para controlar de modo permanente el nivel de radiactividad en su atmósfera, aguas y suelos, así como la observancia de las normas básicas de protección radiológica establecidas en la normativa comunitaria. Este artículo, además, otorga a la Comisión el derecho a acceder a estas instalaciones con el objetivo de verificar su buen funcionamiento y eficacia, que consiste en una comprobación, tanto documental como in situ, del cumplimiento de los compromisos adquiridos por los Estados miembros en re-

lación con la vigilancia radiológica ambiental y el control de los vertidos de las instalaciones nucleares y radiactivas. Desde el accidente de Chernóbil hasta nuestros días, estas verificaciones se han ejercido de manera cada vez más frecuente y sistematizada, demostrando la experiencia obtenida que suponen un importante valor añadido para proteger a la población de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.

■ Texto: **Sofía Luque Heredia, Pablo Martínez Vivas, José Antonio Trinidad Ruiz, Carmen Rey del Castillo** | Técnicos de la Subdirección de Protección Radiológica Ambiental ■

El 25 de marzo de 1957, se firmaron en Roma los tratados de creación de la Comunidad Económica Europea (CEE, posteriormente Unión Europea) y el de la Comunidad Europea de la Energía Atómica (CEEa), conocido como Tratado de Euratom. Este último fue creado con el objetivo inicial de coordinar los programas de investigación de los Estados miembros para una utilización pacífica de la energía nuclear. En la actualidad, tiene como

misión contribuir a crear las condiciones necesarias para el desarrollo de la industria nuclear, estando entre sus objetivos principales el establecimiento de normas de seguridad sólidas y uniformes para la protección de la población y de los trabajadores y velar por su aplicación.

Así, el capítulo 3 del título II de este Tratado, sobre Protección Sanitaria, establece las normas básicas para la protección de la población y los trabajadores

contra los peligros de las radiaciones ionizantes. Como parte de estas normas, sus artículos 35 y 36 establecen los siguientes requisitos:

Artículo 35: «Cada Estado miembro creará las instalaciones necesarias a fin de controlar de modo permanente el índice de radiactividad de la atmósfera, de las aguas y del suelo, así como la observancia de las normas básicas. La Comisión tendrá derecho de acceso a estas instalaciones de control; podrá verificar su funcionamiento y eficacia».

Artículo 36: «La información relativa a los controles mencionados en el artículo 35 será comunicada regularmente por las autoridades competentes a la Comisión, a fin de tenerla al corriente del índice de radiactividad que pudiese afectar a la población».

Las instalaciones y programas específicos de vigilancia requeridos para dar cumplimiento a estos requisitos se consensuaron en reuniones periódicas mantenidas entre representantes de los Estados miembros y de la Dirección General de Energía de la Comisión. Los primeros remiten regularmente a la Comisión información sobre los resultados de la vigilancia radiológica ambiental



Konrad Adenauer, Walter Hallstein y Antonio Segni, durante la firma de la unión aduanera europea y Euratom en Roma, Italia, el 1 de abril de 1957.

en su territorio. Originalmente, esta información incluía tanto los resultados de la vigilancia llevada a cabo por los titulares en el entorno de las instalaciones como la relativa a los programas desarrollados por las autoridades competentes en todo el territorio nacional, no solo en la zona de influencia de las mismas. Posteriormente y hasta la actualidad, la información requerida se refiere exclusivamente a la vigilancia radiológica del territorio nacional; esta reducción no supone una variación en el alcance de la vigilancia que requiere el artículo 35, el cual sigue incluyendo la zona de influencia de las centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible al abarcar todo el territorio nacional.

Para garantizar la necesaria uniformidad de los resultados, los Estados miembros solicitaron a la Comisión la publicación de criterios y orientaciones sobre la aplicación de estos artículos. Estas fueron plasmadas en la Recomendación 2000/473/Euratom de la Comisión, de 8 de junio de 2000, sobre el control de los índices de radiactividad en el medio ambiente [1]. Desde entonces, la aplicación de los artículos 35 y 36 viene regulada por dicha Recomendación.

Con vistas a evaluar la exposición a las radiaciones ionizantes del conjunto de la población, esta Recomendación explica que, además de la atmósfera, las aguas y el suelo, se deben determinar los índices de radiactividad en alimentos y muestras biológicas. Por eso, los programas de vigilancia también incluyen el seguimiento de matrices como alimentos, piensos y vegetación, entre otros.

Además, en relación con las descargas al medio ambiente de las centrales nucleares y plantas de reprocesado de combustible nuclear, la Comisión emitió también una Recomendación sobre su

Tabla 1. Actividades que entran dentro del alcance de una verificación

Instalaciones del ciclo del combustible nuclear (p. ej. minería, fabricación de combustible, centrales nucleares, reactores de investigación, plantas de reelaboración, emplazamientos para el vertido de residuos radiactivos y depósitos)
Instalaciones de producción de isótopos radiactivos
Hospitales que utilicen isótopos radiactivos
Actividades mineras que involucren isótopos radiactivos
Instalaciones industriales que viertan efluentes con un elevado nivel de radionucleidos naturales (NORM), en virtud del artículo 23 de la Directiva 59/2013/Euratom [3]
Instalaciones nucleares o radiactivas de investigación

vigilancia y notificación que fue adoptada el 18 de diciembre de 2003 [2].

Verificaciones. Objetivos, alcance y desarrollo

El objetivo principal de las verificaciones mencionadas en el artículo 35 es proporcionar una evaluación técnica profunda e independiente de la aptitud de las instalaciones de vigilancia de la radiactividad en el medio ambiente en los Estados miembros, que sirva para dar confianza a la población sobre la veracidad de la información ofrecida por las autoridades competentes, así como fomentar la armonización y desarrollo de buenas prácticas en los Estados miembros en relación con los métodos para la medición de la radiactividad ambiental y de los vertidos radiactivos.

Además, las verificaciones suponen una herramienta útil a la Comisión para dar respuesta a la preocupación de distintas partes interesadas (ciudadanía, representantes de los ciudadanos, instituciones públicas y privadas, organizaciones ecologistas, empresas implicadas, tanto del sector nuclear como no nuclear, etc.) respecto de una actividad nuclear o radiológica específica, o en caso de incidente o accidente nuclear.

Para la consecución de estos objetivos, las verificaciones consisten en la comprobación de que existen las instalaciones, programas y equipamiento ne-

cesarios para una adecuada vigilancia y control de la radiactividad ambiental de forma rutinaria, así como aquellos destinados a dar la alarma o a proporcionar datos en caso de accidente, y que estos equipos y programas se encuentran operables, de forma que se pueda verificar su eficiencia y ajuste al marco legislativo comunitario y nacional de aplicación. Estas verificaciones también deben incluir la revisión de los sistemas de control de las emisiones líquidas y gaseosas de las instalaciones y/o aquellos relacionados con actividades con posibilidad de producir vertidos de sustancias radiactivas al medio ambiente. Dichos sistemas pueden estar situados dentro o fuera de los locales de la instalación. En términos generales, las actividades sujetas a posible verificación por parte de la Comisión en el marco del artículo 35 del Tratado de Euratom son las indicadas en la Tabla 1.

El alcance de la verificación de estas actividades incluye la evaluación de todas las instalaciones disponibles para el control de vertidos gaseosos y líquidos de radionucleidos al medio ambiente (control de vertidos), y de las de control de la radiactividad ambiental dentro y en el entorno del lugar donde se llevan a cabo estas actividades (control medioambiental específico del emplazamiento). No se establece ninguna distinción entre los sistemas de control

Criterio 1. Cobertura territorial y experiencia de verificaciones pasadas	■ La Comisión Europea llevará a cabo verificaciones regularmente en cada uno de los EE. MM. de la UE. El objetivo es llevar a cabo una verificación en cada EE.MM. al menos una vez cada 5 años. La Comisión podrá llevar a cabo verificaciones de seguimiento en los años posteriores a una principal en la que se realizaron recomendación/es.
Criterio 2. Interés público	■ La Comisión llevará a cabo verificaciones para responder a preocupaciones planteadas por partes interesadas (noticias, preguntas parlamentarias, quejas, etc.) hacia una actividad nuclear específica, o en caso de incidente o accidente nuclear. Estas verificaciones pueden llevarse a cabo de forma urgente en respuesta a un incidente específico.
Criterio 3. Apoyo a los programas de cooperación de la Comisión	■ Las verificaciones pueden apoyar programas de cooperación entre la Comisión y terceros países en el ámbito nuclear (desmantelamiento, proyectos de nueva construcción, desarrollo de normativa, etc.). El artículo 35 no supone base jurídica en estos, pero contribuye a crear confianza en los programas de seguimiento.

Figura 1. Criterios básicos para la planificación de las verificaciones.

instalados por las autoridades nacionales y los instalados por el titular del emplazamiento, conforme a las exigencias legales: ambas se incluyen en el ámbito de aplicación del ejercicio de verificación. Estas verificaciones deberían permitir emitir un juicio acerca de los siguientes aspectos:

- El funcionamiento de los programas e instalaciones de control ambiental y de los vertidos, su planificación y uso de acuerdo con las características del diseño de los equipos o instrumentos de medición utilizados.
- La adecuación de la toma de muestras y de los métodos de preparación de muestras y de análisis.
- El cumplimiento de cualquier exigencia legal nacional e internacional sobre toma de muestras y análisis (métodos y procedimientos).
- La eficiencia de los equipos utilizados en el seguimiento realizado (sensibilidad, parámetros de detección, etc.).
- La gestión de los registros de las emisiones radiactivas y de los resultados del control ambiental.
- La gestión de las muestras.
- El manejo de los datos y procedimientos de comunicación.

- Las medidas de control de calidad, incluida la participación en ejercicios de intercomparación entre laboratorios.

Las disposiciones de carácter práctico para la realización de las visitas de verificación en los Estados miembros se acordaron a raíz de diferentes reuniones bilaterales con el fin de aclarar el alcance, intención y realización de dichas verificaciones. Las conclusiones se recogieron posteriormente en protocolos bilaterales aprobados por los Estados miembros entre 1990 y 1993. A raíz de la ampliación de la Comunidad en 2006, contando en ese momento con 25 Estados miembros, se consideró necesario establecer una base común por medio de un instrumento legal de la Comisión, que se materializó en la Comunicación 2006/C 155/02 [4], donde se establecen las características básicas que deben cumplirse para el desarrollo de estas verificaciones y se indica que la responsabilidad de planificar y ejecutar dichas verificaciones recae sobre la Dirección General de Energía de la Comisión Europea (DGENER), quien realizará su programación de verificaciones principalmente en base a tres criterios generales que se resumen en la Figura 1.

Además de estos criterios, la Comisión planifica ciclos de verificaciones centradas en temas concretos, seleccionados a raíz de su experiencia. Por ejemplo, entre 2008 y 2012 se llevó a cabo un ciclo de verificaciones a las actividades de la minería de uranio presentes y pasadas en diez Estados miembros; o desde 2015 hasta la fecha está en marcha un ciclo de verificaciones a todas las capitales europeas. De este último ciclo se han realizado ya más de 17 verificaciones, siendo el objetivo de la Comisión completar este programa en 2023 con Budapest y Madrid como últimas capitales a verificar.

La verificación comienza con la comunicación oficial por parte de la Comisión a los Estados miembros, a través de su representación permanente ante la UE, de la intención de llevar a cabo dicha misión sobre una actividad o con un objetivo concreto. Tras esta comunicación, la DGENER solicita al receptor de la misión la cumplimentación de un cuestionario de detalle, que supone una información muy completa acerca de todos los aspectos a verificar. Este cuestionario es la base de un profundo conocimiento para la DGENER de las instalaciones y actividades a visitar, con antelación a la misión, y sirve para planificar la visita, cuya duración es generalmente de cinco días, ya que está basada en un programa de trabajo definido en estrecha colaboración con las autoridades competentes de los Estados miembros, ya sea a nivel nacional, autonómico, provincial o municipal, en su caso, y con los operadores de las instalaciones a verificar. Todos ellos acompañarán en todo momento a los representantes de la Comisión, poniendo a disposición de los mismos la información y medios necesarios, requeridos para llevar a buen fin la misión de verificación.

El objetivo primordial es cerciorarse del buen funcionamiento y eficacia de

estas instalaciones y evaluar su adecuación a fin de garantizar la protección de la población, de conformidad con las normas básicas de seguridad nuclear y protección radiológica. Sin embargo, el alcance de las conclusiones que haya que extraer de las verificaciones no incluye ninguna evaluación de la fuente ni de la magnitud del impacto ambiental de los vertidos ni tampoco de los índices de radiactividad en el medio ambiente, que corresponde a las autoridades competentes de cada Estado miembro.

Una vez finalizada la visita, la Comisión elabora un borrador de informe en el que se incluyen las recomendaciones, posibilidades de mejora y buenas prácticas detectadas. Este informe preliminar es enviado a los receptores de la verificación para comentarios. Finalmente, el borrador es elevado a definitivo y publicado en la página web de la Comisión para información pública.

Verificaciones realizadas en los Estados miembros

Después del accidente de Chernóbil (1986) la Comisión anunció su decisión de ejercer de forma más sistemática su derecho de realizar verificaciones, de acuerdo con lo previsto en el artículo 35. Hasta 1989 se llevaron a cabo de forma esporádica, pero a partir de ese año su número se incrementó, pasando a ser objetivo prioritario de la Comisión. Desde 2004 se realizan de forma sistemática, priorizando la verificación de las instalaciones más sensibles, y a partir de 2006 se llevan a cabo siguiendo las líneas establecidas en la Comunicación de la Comisión publicada el 4 de julio [4].

Entre 1990 y 2020 se han realizado un total de 119 verificaciones, con un promedio muy distinto en las dos etapas descritas (ver Figura 2). Entre 1990 y 2003, donde, salvo escasas excepciones, el programa de verificación tuvo como objetivo ofrecer una visión general de la situación

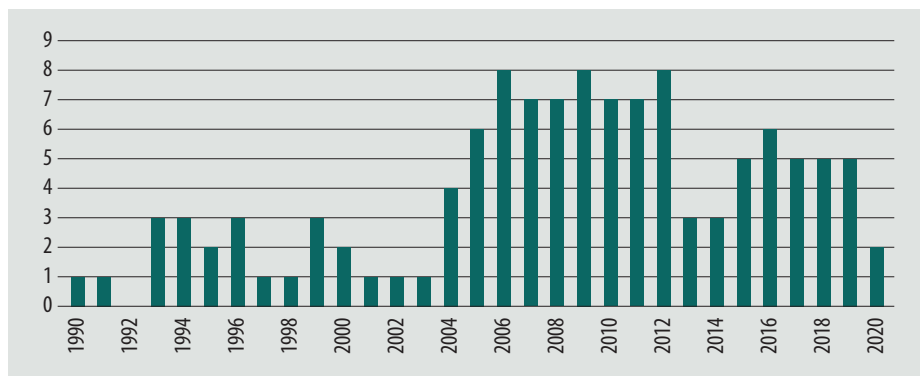


Figura 2. Verificaciones del artículo 35 por año 1990-2020.

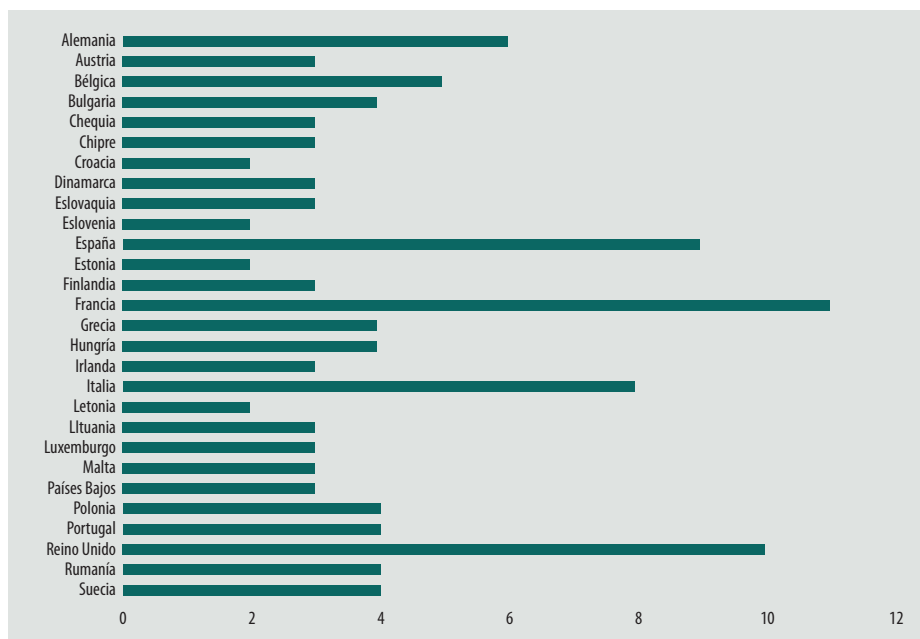


Figura 3. Verificaciones del artículo 35 por país (1990-2020).

para una serie representativa de instalaciones del ciclo del combustible nuclear y de instalaciones de seguimiento de los índices de radiactividad en todos los Estados miembros. Para ello se realizaron entre 1 y 2 verificaciones al año. Entre 2004 y 2020 se realizaron de media entre 5 y 6 verificaciones anuales y con alcance más amplio en cuanto a tipo de instalaciones, criterios de selección y objetivos a cubrir.

El número de visitas de verificación a los distintos países también es variable, más alto en países como Francia o Reino Unido, por su mayor número de instalaciones y también por su pertenencia a la Unión Europea desde sus comienzos, y más pequeño en países con menor nú-

mero de instalaciones o de incorporación más reciente a la UE (ver Figura 3). España figura en el tercer puesto por el número de visitas recibidas, siendo destacable que varias de ellas corresponden al criterio de respuesta a las consultas recibidas en el parlamento europeo.

Verificaciones en España

Hasta 2020, en España se han llevado a cabo un total de nueve misiones de verificación. La primera, en 1994, a la central nuclear Vandellós 2, y las ocho restantes a partir del año 2004 hasta la actualidad. El alcance de estas verificaciones ha incluido distintas centrales nucleares, instalaciones mineras o te-

Tabla 2. Verificaciones del artículo 35 de Euratom realizadas a España

Año	Instalación	Laboratorios	Otros
1994	CN Vandellós 2		
2004	CN Trillo (Guadalajara)	Medidas Ambientales (Burgos) Ciemat URAYVR (Madrid)	SALEM-CSN (Madrid)
2007	CN Cofrentes (Valencia)	Universidad Valencia Universidad Politécnica Valencia	Estaciones REM (Cedex y CSN) Estaciones REA (CSN) Estaciones RAR (Protección Civil)
2008	CN Ascó		
2009	Fosfoyesos (Huelva) CRI-9 (Huelva)	Universidad Huelva Universidad Sevilla Citius (Sevilla) Ciemat URAYVR (Madrid) Geocisa (Madrid)	
2010	Palomares (Almería)	Ciemat (Almería)	
2012	Quercus y Elefante (Salamanca) Mina Valdemascaño (Salamanca) Fábrica Uranio Andujar (Jaén) Mina La Virgen (Jaén)	Universidad Salamanca ENUSA Juzbado (Salamanca) ENUSA Saelices (Salamanca) Universidad Granada Universidad Sevilla	Estaciones REM (CSN) Estaciones REA (CSN) Estaciones RAR (Protección Civil)
2018	CN Almaraz (Cáceres)	Universidad Cáceres	Centro Alerta2 (Extremadura) Estaciones RAE y RARE (Extremadura) Estaciones REM (CSN) Estaciones REA (CSN)
2019	Palomares (Almería)	Ciemat-RARE (Madrid) Ciemat URAYVR (Madrid)	

renos contaminados, en los que se han revisado sus sistemas y programas de control de efluentes y sus Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA), así como diferentes laboratorios en los que se llevan a cabo las medidas radiológicas de baja actividad de muestras ambientales. También han incluido numerosas estaciones de muestreo pertenecientes a las diferentes redes que constituyen el sistema de vigilancia radiológica ambiental nacional (Red de Estaciones de Muestreo, REM; Red de Estaciones Automáticas, REA; y Red de Alerta a la Radiactividad, RAR). En la

tabla 2 se muestran todas las instalaciones, laboratorios y otros emplazamientos que han sido visitados por los expertos a lo largo de los últimos 17 años y se representan en el mapa de la Figura 4.

Cinco de las verificaciones realizadas han sido a centrales nucleares españolas. Las visitas a Vandellós 2, Trillo, Cofrentes y Almaraz se incluyeron dentro del programa de verificaciones a los Estados miembros que la Comisión realiza regularmente. En todas ellas el equipo de expertos comprobó las instalaciones de los titulares para la vigi-

lancia y control de las descargas líquidas y gaseosas de radiactividad al medioambiente, así como el PVRA desarrollado en el entorno de cada una de ellas. Adicionalmente, se visitaron los laboratorios de universidades españolas y centros nacionales de investigación que llevan a cabo las medidas de los diferentes programas de vigilancia desarrollados en el entorno de dichas centrales, así como algunas de las estaciones pertenecientes a las redes nacionales existentes, situadas en las proximidades de cada una de ellas, y la sala de emergencias (SALEM) del CSN. En todos los casos, el equipo verificador concluyó que se disponía de los medios necesarios para llevar a cabo la vigilancia de los niveles de radiación en aire, agua y suelo en el entorno de los emplazamientos y que todos ellos eran adecuados.

En el caso de la central nuclear Ascó, la verificación se produjo como consecuencia del suceso radiológico de liberación de partículas que tuvo lugar en noviembre de 2007, clasificado con nivel 2 en la escala internacional INES. La Comisión Europea organizó una verificación urgente para obtener información completa, tanto por parte del titular de la central como del organismo regulador, de la secuencia del evento, de sus implicaciones, de los sistemas de vigilancia involucrados y de la eficacia de la respuesta por las diferentes partes para minimizar el impacto radiológico. Durante la visita, los responsables detallaron el suceso ocurrido y el grupo de expertos verificó todos los equipos y sistemas de vigilancia existentes que estuvieron involucrados en el evento. La comisión valoró la información proporcionada, así como los resultados presentados, considerando adecuado el sistema de vigilancia y control puesto en marcha.

En 2012, un grupo de cuatro inspectores visitaron los diferentes yaci-

mientos mineros de Saelices el Chico, Valdemascaños y otras pequeñas minas como La Virgen. Actualmente todas es-

tas áreas mineras se encuentran restauradas. Adicionalmente se visitaron las diferentes plantas de concentración de

minerales de uranio, incluyendo la planta Quercus, la Fábrica de Uranio de Andújar y la planta Elefante. Todas ellas cesaron su explotación y se encuentran en diferentes etapas de desmantelamiento o clausura. El equipo verificador comprobó todos los programas de vigilancia que se desarrollan en el entorno de estos emplazamientos, visitando además varios de los laboratorios en los que se llevan a cabo los análisis radiológicos de las muestras, entre ellos los de Enusa en varias localidades de Salamanca y los de las universidades de Salamanca, Granada y Sevilla, concluyendo que se cumplían los requisitos establecidos en el artículo 35 del Tratado de Euratom, si bien la Comisión Europea formuló varias sugerencias con el objeto de mejorar los diferentes programas desarrollados.

Las verificaciones realizadas al Centro de Recuperación de Inertes (zona denominada CRI-9) y a las balsas de fosfoyesos en Huelva en 2009, así como las realizadas a los terrenos contaminados de Palomares en 2010 y 2019, fueron programadas en respuesta a una serie de preguntas realizadas por representantes de distintos partidos políticos en el Parlamento Europeo.

En la primera de estas verificaciones se visitó el CRI-9 de Palos de la Frontera, instalación a la que se remitían las escorias y polvos de acería para su inertizado y que resultó contaminada en 1998 a raíz de la fusión inadvertida de una fuente de Cs-137 en la acería de Acerinox en Los Barrios (Cádiz). En 2001, tras el informe favorable del CSN, la Dirección General de Política Energética y Minas autorizó la permanencia del mencionado material residual en la zona, estabilizando la misma con una capa de arcilla sobre los frentes de vertido contaminado y estableciendo un plan de vigilancia radiológica ambiental, que se viene rea-



Figura 4. Verificaciones a instalaciones españolas.



Sonda para medida de la radiación gamma ambiental de la central nuclear Almaraz.

lizando anualmente desde entonces. A continuación, se visitaron las balsas de fosfoyesos situadas en el sur de la ciudad de Huelva, en las que se almacenan residuos NORM. Se visitaron también los laboratorios de las universidades de Sevilla y Huelva. El equipo de verificación sugirió algunas recomendaciones respecto a la contaminación con Cesio-137 en el CRI-9, como completar el cercado para evitar el paso de personas no autorizadas o realizar una verificación de la efectividad de la cobertura de arcilla. Con todo ello, se consideró que los estudios radiológicos y los programas de vigilancia establecidos son adecuados y eficaces.

En Palomares (Almería), desde junio de 1966 se realiza un PVRA en los alrededores de los terrenos que fueron contaminados con plutonio como consecuencia del accidente que tuvo lugar entre dos aviones de la fuerza aérea de los Estados Unidos. En 1986, el Ciemat adquirió la responsabilidad de la ejecución técnica del PVRA, con la obligación de informar periódicamente al CSN de los resultados obtenidos. Se han llevado a cabo 2 verificaciones en los últimos años con el objetivo de que la Comisión Europea obtuviera información actualizada de la situación y de los programas de vigilancia radiológica desarrollados en el entorno de los terrenos contaminados, así como de las medidas establecidas para evitar el acceso en aquellas áreas con una mayor contaminación. En ambas verificaciones se visitaron los terrenos contaminados y los laboratorios implicados en las medidas radiológicas, además de mantener reuniones con autoridades locales para conocer la situación de primera mano. En 2019, durante la segunda verificación, se realizó el seguimiento de las recomendaciones realizadas en la verificación de 2010, pudiéndose comprobar que la mayoría de ellas, relacionadas

con el PVRA y el control de accesos, habían sido ya implementadas.

En todas las verificaciones realizadas en nuestro territorio, el equipo de la Comisión concluyó el pleno cumplimiento de España de los diferentes requisitos establecidos en el artículo 35 del Tratado de Euratom.

En el último trimestre de 2021 la Comisión ha llevado a cabo una nueva misión de verificación en España cuyo alcance incluye la central nuclear Santa María de Garoña y la vigilancia nacional realizada en las costas de Galicia, cuyos resultados previsiblemente se podrán conocer a lo largo de 2022.

Informes publicados por la Comisión europea

Los informes técnicos de todas las verificaciones realizadas a partir de 1999, así como un documento resumen con las principales conclusiones y cualquier observación oficial formuladas por el Estado miembro visitado, pueden consultarse en la página web de la UE en la siguiente dirección: https://ec.europa.eu/energy/topics/nuclear-energy/radiation-protection/radioactivity-environment/verificationns-radiation-monitoring-eu-countries_en

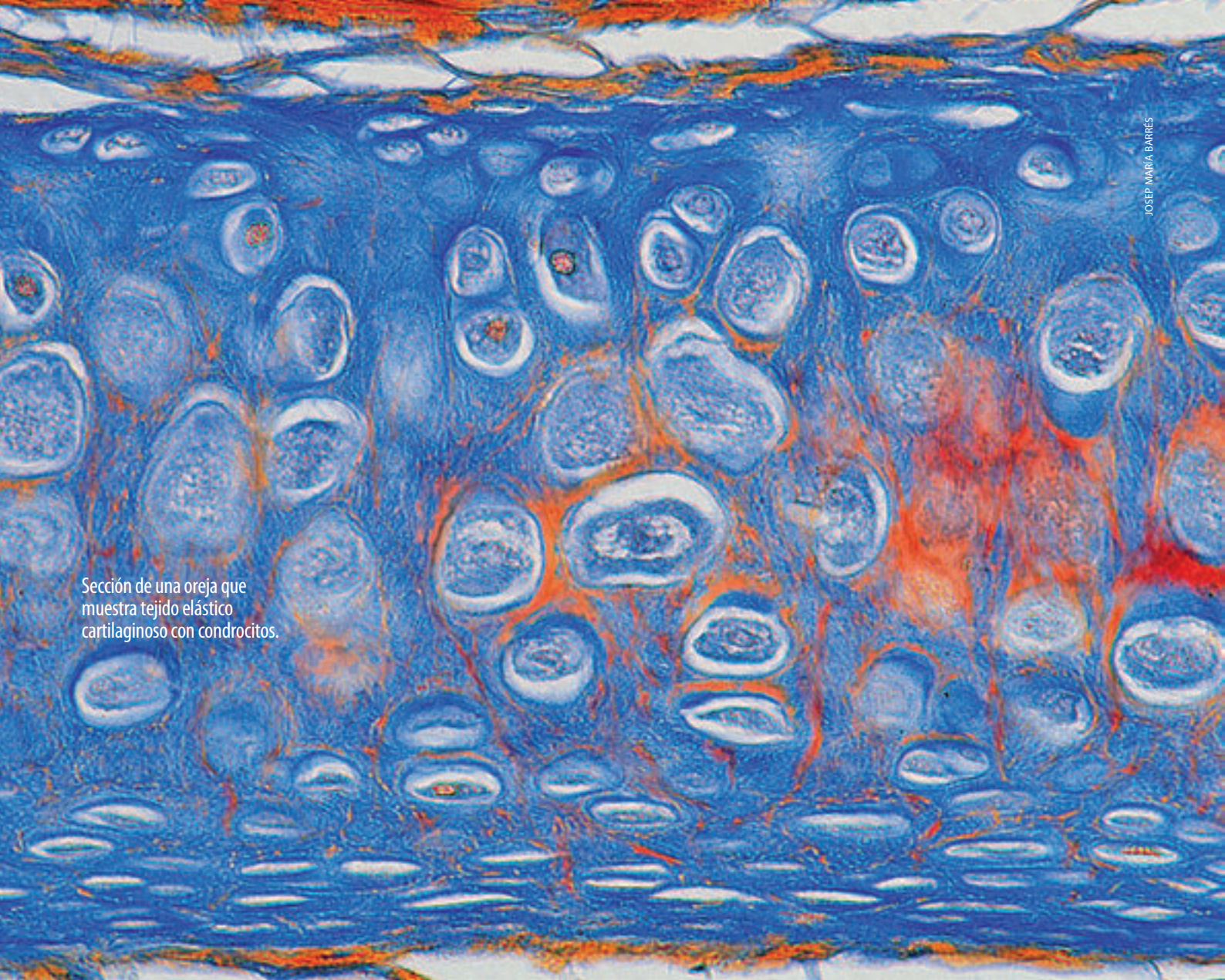
Además, la Comisión ha publicado dos informes sobre la aplicación del artículo 35 de Euratom a partir de los resultados de las verificaciones realizadas en los periodos 1990-2007 y 2008-2012, y ha anunciado la preparación del informe correspondiente al periodo 2013-2019. Ambos informes ponen de relieve los importantes logros alcanzados por las actividades de verificación realizadas, que han permitido a la Comisión obtener una buena visión general de la situación en los Estados miembros. Con ello se concluye que la Comisión cumple plenamente con sus responsabilidades derivadas del artículo 35 del Tratado de Euratom y de esa forma garantiza que los índices de radiactividad de la

atmósfera, de las aguas y del suelo son vigilados y controlados permanentemente de forma adecuada.

La experiencia adquirida ha demostrado que estas verificaciones han supuesto un importante valor añadido, tanto para la Comisión como para los Estados miembros, permitiendo a la primera realizar una evaluación independiente de la aptitud de las instalaciones creadas en los Estados miembros para vigilar la radiactividad en el medioambiente y a estos autoevaluar sus capacidades. 

Referencias

- [1] Recomendación 2000/473/Euratom de la Comisión, de 8 de junio de 2000 relativa a la aplicación del artículo 36 del Tratado Euratom sobre el control de los índices de radiactividad en el medio ambiente con vistas a evaluar la exposición del conjunto de la población (Diario Oficial de la Unión Europea de 27 de julio de 2000. Comunicación 2000/1299).
- [2] Recomendación de la Comisión de 18 de diciembre de 2003 relativa a la información normalizada sobre los efluentes radiactivos gaseosos y líquidos vertidos al medio ambiente por las centrales nucleares y las plantas de reelaboración en condiciones de funcionamiento normal [notificada con el número C(2003) 4832] (2004/2/Euratom).
- [3] Directiva 59/2013/Euratom, del Consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. (Diario oficial de la Unión Europea de 17 de enero de 2014).
- [4] Verificación de las instalaciones de control de la radiactividad medioambiental conforme a lo dispuesto en el artículo 35 del Tratado Euratom. Disposiciones de carácter práctico para la realización de las visitas de verificación en los Estados miembros (Diario Oficial de la Unión Europea de 4 de julio de 2006. Comunicación 2006/C 155/02).



Sección de una oreja que muestra tejido elástico cartilaginoso con condrocitos.

El proyecto internacional HCA pretende catalogar los miles de tipos de células del organismo

El mapa íntimo de los humanos

El proyecto HCA (Human Cell Atlas) tiene el objetivo de mapear todos los tipos de células del cuerpo humano para hacer un catálogo que pueda ser utilizado en la investigación biomédica. Se trata de un esfuerzo internacional de colaboración para definir todos los tipos de células humanas según sus genes activos. Esta empresa de exploración es posible gracias al desarrollo desde hace pocos años de las llamadas técnicas de secuenciación de célula única, que son capaces de observar el contenido molecular de las células de forma individual y masiva: en cada

experimento pueden analizarse desde varios miles a cientos de miles de células individuales, lo que ha abierto la puerta a que, por primera vez, puedan secuenciarse órganos y organismos completos. Cuando se complete, el HCA será una base para la investigación biológica y la medicina, un mapa de referencia de los tipos y propiedades de todas las células humanas, además de una base para comprender y monitorizar la salud y para diagnosticar y tratar enfermedades.

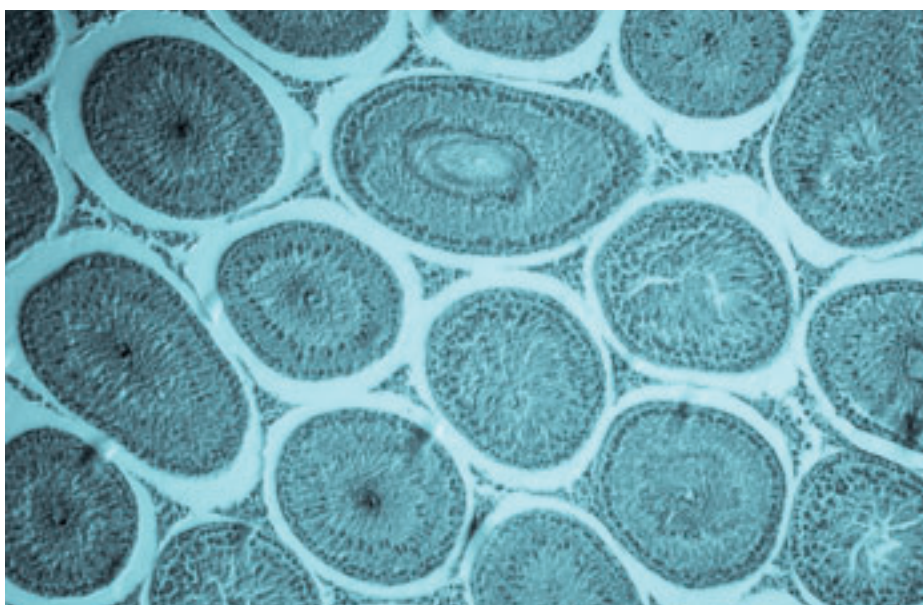
■ Texto: **Eugenia Angulo** | Periodista de ciencia ■

Los investigadores del Atlas Celular Humano suelen recurrir a la analogía con Google Maps para explicar su proyecto: una mirada detallada que, en lugar de mostrar continentes, países, ciudades, calles y edificios, puertas y ventanas, hace un gran zoom sobre nuestros órganos y tejidos, con resoluciones cada vez más y más finas, hasta llegar a ver las células a nivel individual. El silencioso funcionamiento de nuestro cuerpo en su nivel más profundo. El corazón, el páncreas, los riñones, el hígado o la piel, explorados célula a célula para que, en conjunto, como un collage, compongan el mapa detallado de todas las células del cuerpo humano. Es, por tanto, un proyecto de exploración que recuerda a los primeros cartógrafos que surcaban los mares para comprender la estructura de la Tierra.

Porque el cuerpo humano es todavía un territorio a medio descubrir poblado en su unidad más simple por 37 billones de células de las que aún desconocemos cuántos tipos hay y cómo se relacionan entre sí: se pensaba que había unos 3.000 tipos celulares distintos; ahora se cree que hay diez veces más. También ahora se sabe que existe una gran heterogeneidad entre aquellas que forman parte de un mismo órgano, es decir, no todas las células del pulmón son iguales por habitar en él y, además, cambian con el tiempo. Se trata, en definitiva, y en palabras de sus responsables, “de una búsqueda loca y ridículamente ambiciosa”; un atlas a ese nivel de detalle y sofisticación será, cuando se complete, una herramienta única para comprender la salud, y para diagnosticar y tratar las enfermedades.

El proyecto se constituyó formalmente en 2016 e involucra a más de mil grupos de investigación de 58 países, agrupados bajo un consorcio internacional que se encarga de coordinarlos y de gestionar una base de datos donde los investigadores vuelcan sus mapas en abierto. Cada grupo

trabaja en el atlas de uno de los principales órganos y sistemas del cuerpo: un grupo mapea el sistema nervioso, otro el riñón, o el pulmón, el hígado, el páncreas, el intestino delgado y colon, el corazón, o la piel. El primer borrador del atlas describirá entre 30 y 100 millones de células de estos órganos vitales e incluirá un atlas pediátrico. Pero también hay otros equipos que ya están trabajando en mapear órganos no vitales, como el útero o los ovarios. Las muestras que mapean todos estos equipos proceden de individuos de ambos



Muestra microscópica de la sección de tejido de los testículos.

sexos y la idea es conseguir primero un atlas de referencia de un cuerpo sano sobre el que se irán añadiendo perfiles específicos de enfermedades. Un atlas vivo, en movimiento, como nuestro cuerpo. Se espera que la primera versión se publique en uno o dos años.

Esta capacidad de ver a un nivel tan fino y sofisticado viene dada por un avance tecnológico que en 2018 fue elegido por la revista Science como el más importante del año: las llamadas técnicas de secuenciación de célula única o *single-cell genomics*. Estas técnicas miran y analizan el contenido molecular de millones de células individuales de for-

ma simultánea, rápida y cada vez más barata. Su objetivo es buscar los genes activos en cada una de ellas. Para ello existen varios métodos, pero el más utilizado actualmente analiza moléculas de ARN, la llamada RNAseq o secuenciación de ARN de células individuales, que comenzó a utilizarse en 2012 y que desde entonces se ha extendido por todo el mundo.

En algunos aspectos, el Proyecto Atlas Celular Humano, cuya unidad fundamental es una célula, es análogo al Pro-

yecto del Genoma Humano, cuya unidad fundamental es un gen; de hecho, el HCA podría considerarse descendiente de este. Ambos son ambiciosos intentos de crear tablas periódicas para la biología y la medicina, que describan en profundidad las dos unidades clave de la vida: las células y los genes. Son proyectos internacionales formados por investigadores de todo el mundo y sus resultados son públicos y pueden accederse de forma abierta. Ambos sobrecogen por su ambición, su complejidad y por la enormidad de datos que deben manejar. También, especialmente en esta época pandémica, son proyectos que dan esperanza.

Las celdas de los monjes

La célula es la unidad fundamental de los organismos vivos, la unidad básica de la vida. En 1665, el inglés Robert Hooke descubrió mientras observaba láminas de corcho a través del microscopio unas cavidades que le recordaron a las celdas de los monjes en los monasterios. Las llamó células. Durante más de 150 años, los histólogos pioneros trataron de caracterizar y clasificar las células basándose en descripciones cada vez más detalladas de sus propiedades: su forma, ubicación, abundancia, función biológica...

Pero el camino hacia una comprensión más profunda de la célula ha estado en cada paso limitado por el desarrollo tecnológico del momento, de lo que permitía ver. La primera tecnología disponible fue el microscopio, y después los tintes —como los que utilizó Ramón y Cajal cuando descubrió las neuronas—. A partir de la década de 1930, la microscopía electrónica proporcionó una resolución hasta 5.000 veces mayor, lo que permitió descubrir y distinguir las células basándose en características estructurales más finas. La inmunohistoquímica, iniciada en 1940 y acelerada por la llegada de los anticuerpos monoclonales, y la clasificación celular activada por

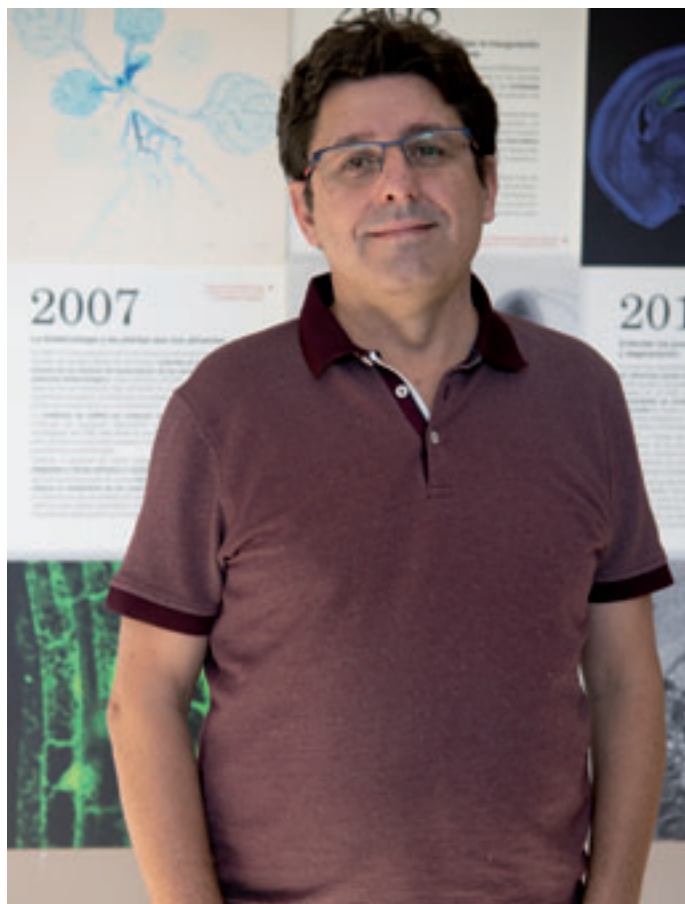
fluorescencia de los 70 permitieron detectar la presencia y los niveles de proteínas específicas en el misterioso mundo molecular que esconden las células en su interior.

Así, los biólogos han logrado una comprensión muy detallada de algunos sistemas, como el hematopoyético e inmunitario, o las neuronas de la retina, pero el conocimiento de los tipos de células en el conjunto del cuerpo humano sigue estando incompleto. Menos se sabe aún sobre la evolución de las células durante el desarrollo, el camino que va desde el cigoto unicelular hasta el organismo adulto.

Sólo se conoce para el nematodo *C. elegans*, un organismo transparente de aparien-

cia simple, de aproximadamente un milímetro de longitud y que apenas tiene un millar de células.

Ahora, estas técnicas de secuenciación genética de célula única añaden una dimensión más para identificar y describir los tipos celulares: la variable molecular mediante el análisis de su contenido genético, el conjunto de letras que determinan la individualidad de cada organismo. Aunque todas las células de un mismo ser tienen el mismo ADN, cada célula cuenta con su propio programa de expresión génica dependiendo de a qué se dedique, de su función: es decir, los genes se expresan de forma distinta en cada tipo celular. Es lo que se llama expresión génica. Las neuronas, por ejemplo, expresan un cierto número de genes similares que son diferentes de los que expresan las células musculares o las del riñón. Esta capacidad de ver a nivel



José Manuel Franco.



Robert Hooke, descubridor de las células; su microscopio y las celdillas de corcho que vio y describió.

La cartografía del útero

Carlos Simón, catedrático de Obstetricia y Ginecología de la Universidad de Valencia y profesor en las universidades de Stanford y Yale, dirige el proyecto HUTER (Human Uterus Cell Atlas), un programa de la Unión Europea para conseguir un atlas detallado del útero. El proyecto cuenta con un presupuesto de algo más de cuatro millones de euros y forma parte del Human Cell Atlas. Simón y su equipo pre-



Carlos Simón al recibir el premio Rei Jaume I de Investigación Médica, en 2011.

paran muestras de las distintas partes de útero, el endometrio y el miometrio, para secuenciarlas mediante la tecnología de RNA-seq: unas 20.000-30.000 células por cada muestra. “Se trata de tejidos en principio sanos, pero si la

donante tuviera una enfermedad la detectaríamos y podríamos analizar la patología”, explica Simón. Estas muestras las envían a Dubai para secuenciar, lo que tarda alrededor de una semana.

“Nos llegan miles y miles de datos sin sesgar y ahí es donde comienza la gracia. En el endometrio han aparecido seis tipos celulares y en el miometrio hemos descubierto qué es lo que se produce antes de que se vayan a producir los miomas, una tumoración frecuentísima en la mujer. Es un conocimiento superior, primero la fisiología y luego la patología, y el atlas fisiológico del endometrio, más o menos, ya está. Ahora estamos trabajando en el del miometrio y analizando patologías”, resume el investigador, que en 2011 recibió el premio Rey Jaime I de Investigación Médica y este año el otorgado por la Fundación Lilly.

Otra de las patologías que estudian es la preclamsia, una alteración que ocurre en el tercer trimestre del embarazo. “Sabemos que el problema recae en la implantación en el primer trimestre y la hipótesis es que hay una alteración del endometrio. En HUTER estamos comparando los endometrios de mujeres que han sufrido este problema y vemos que tienen un perfil distinto, lo que pudiera explicar por qué la placenta no implanta bien”. También la endometriosis, una enfermedad de la que aún se desconoce por qué se produce pero que empleando la tecnología de célula única quizás puedan encontrar una razón.

Una pregunta nueva y urgente era saber qué ocurre en caso infección por SARs-CoV-2 durante el embarazo, que depende de los llamados *entry factors* en el endometrio, las llaves que utiliza el virus para entrar en las células, en concreto el receptor AEC2. Simón y su equipo publicaron un estudio con muestras de 27 donantes para un total de 60.000 células a secuenciar. “Encontramos muy poca presencia de estos factores con lo que la posibilidad de infección es muy baja. La infección endometrial es muy importante porque podría contagiar al bebé cuando la mujer está embarazada. En este caso se trata de un órgano de bajo riesgo. Este es un claro ejemplo de lo que podemos hacer con la tecnología de single cell”, añade. ▶

molecular abre la puerta a un conocimiento mucho más profundo del cuerpo humano.

“En cada momento sabemos lo que la tecnología es capaz de ofrecernos”, explica por teléfono José Manuel Franco,

investigador en genética del Centro Nacional de Biotecnología-CSIC. “El avance que supone este tipo de técnicas de secuenciación masiva es que, en efecto, antes se pensaba en esa visión más cerrada de estructura-función y de que todas las

células que forman parte de un órgano eran homogéneas siguiendo ese patrón de formar parte del mismo órgano. Sin embargo, ahora con estas técnicas se puede ver que dentro de las células de un mismo órgano hay una heterogeneidad

muy grande, y esto es lo que lleva a identificar nuevos tipos celulares en base a un patrón de expresión único que caracteriza a cada tipo. Esto es interesante porque se ve como, en efecto, las células que forman parte de un tejido no son permanentes, sino que van variando con el tiempo, hay células intermedias... y de esa forma se pueden diferenciar todos los tipos celulares. Además, ahora ya podemos saber que hay algunas enfermedades que se asocian a tipos celulares concretos”, añade.

La secuenciación genética masiva lleva años utilizándose, pero lo hace, digamos, a granel, en muestras de un mismo tejido compuestas por muchas células y proporcionando medidas genómicas promedio, enmascarando las diferencias entre ellas. Algo así como intentar comprender la abrumadora, rica y vibrante ciudad de Nueva York a partir de las características medias de sus habitantes, independientemente de que vivan en Manhattan, Harlem o el Bronx. Además, en estos experimentos solo pueden secuenciarse, como mucho, cientos de células a la vez.

Desde el punto de vista metodológico, en los experimentos de *single-cell* lo primero que se hace es aislar cada célula de forma individual y encapsularla en pequeñas gotitas. Después se identifican con un código de barras único y posteriormente, se secuencian decenas y cientos de miles de ellas simultáneamente en ensayos paralelos con una precisión y sensibilidad muy alta. Este conjunto de pasos está permitiendo que, por primera vez, puedan caracterizarse órganos y organismos completos. “Esto ya no es solo una cuestión de genómica sino también de desarrollo de equipos que permiten hacer esas pequeñas gotitas y de obtener esos patrones de expresión de células individuales”. En general y al tratarse de equipos muy caros, los investigadores subcontratan estos procesos y envían las muestras a empresas especia-

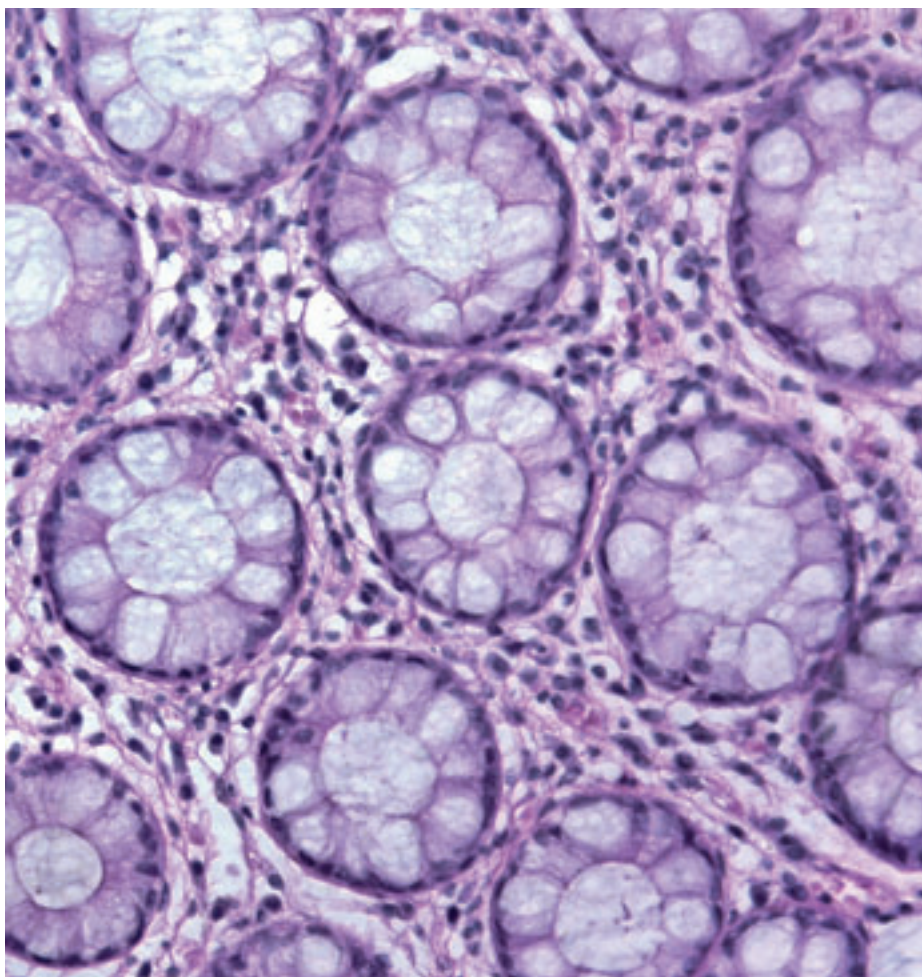


Imagen microscópica de un tejido glandular humano.

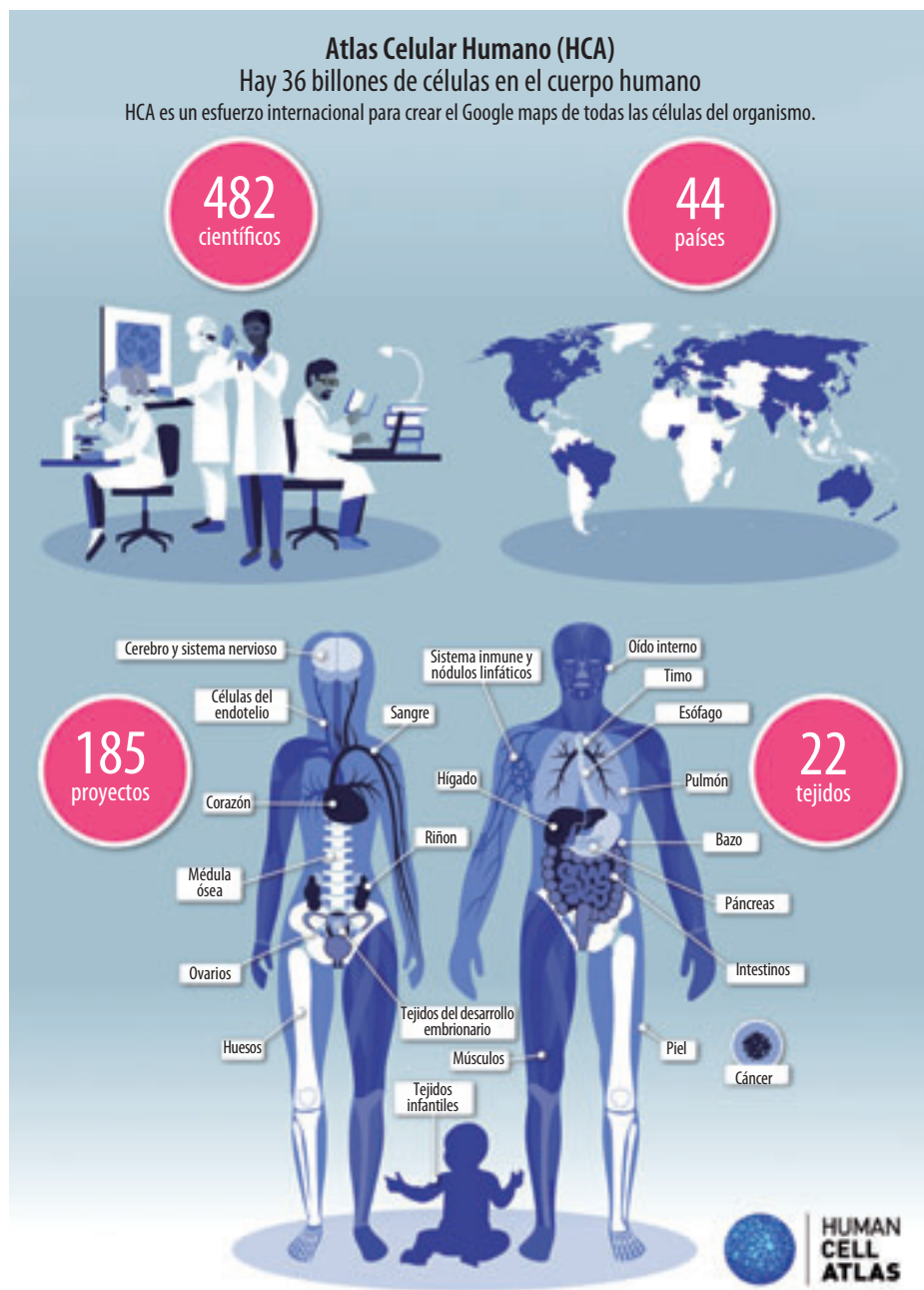
lizadas en secuenciación.

El objetivo de un experimento de *single-cell* es identificar qué genes, de los aproximadamente 20.000 que tenemos que codifican proteínas, están activos en cada célula. Una especie de rastreo de genes activos. Cada célula se representaría como un punto en un espacio de unas 20.000 dimensiones. Este espacio de datos es abrumador y gigantesco: si en un órgano hay cientos de miles de células y cada una tiene unos 2.000 o 3.000 genes encendidos, el resultado es una matriz de datos de cientos de miles multiplicados por miles de puntos. Una cantidad que se acerca a lo astronómico.

“Son números brutales. Todo lo que tiene que ver con secuenciación masiva ha revolucionado completamente la biología y la biomedicina. Y estos desarrollos

tan concretos y tan sofisticados ya nos permiten conocer los genomas a un nivel que, hace veinte años se podía imaginar, pero no alcanzar”, explica Franco. “Por supuesto, hace falta un desarrollo computacional en paralelo bastante importante. En análisis informático, en principio no se requieren técnicas de *machine learning*, pero si queremos llegar a predecir o a estudiar las correlaciones entre estos patrones de expresión de célula única con determinadas enfermedades, habrá que aplicarlas, lo que es otro reto”, añade.

Hasta ahora se han analizado varios millones de células que abarcan órganos específicos como el cerebro, la piel o los pulmones, y se han encontrado nuevos tipos celulares en el sistema respiratorio –los denominados ionocitos, muy relacionados con la fibrosis quística–, en la



Infografía explicativa del proyecto "Human Cell Atlas".

frontera entre el útero y la placenta, que intervienen en la respuesta del sistema inmune de la madre para que no ataque al feto, o en el cerebro. Pero para hacer un atlas celular completo que cubra todos los tejidos, órganos y sistemas del cuerpo humano, hay que analizar miles de millones de células más.

El atlas y la enfermedad

En su nivel más básico, el HCA es un ca-

tálogo de referencia exhaustivo de todas las células humanas basado en sus perfiles de expresión génica, el conjunto de genes activos, así como en su localización y abundancia. Sin embargo, un atlas es más que un simple catálogo, es un instrumento que pretende mostrar las relaciones entre sus elementos. Esta búsqueda de relaciones a veces puede revelar procesos fundamentales. Así, por ejemplo, del atlas de la Tierra surgió la teoría

de la deriva continental según la cual los continentes se habrían desplazado entre sí, y esto pudo verse por la correspondencia entre sus líneas costeras. En el caso del atlas del cuerpo humano, resultaría fundamental asociar tipos celulares concretos a los miles de enfermedades de origen genético o donde los genes cumplen un papel esencial.

En este sentido, los atlas de cada órgano deberán contar con coordenadas o anotaciones adicionales para representar la información histológica y anatómica (por ejemplo, la ubicación de una célula, su morfología o el contexto del tejido), la información temporal (como la edad del individuo o el tiempo transcurrido desde una exposición) y el estado de la enfermedad.

“Ahí viene lo interesante, asociar funciones y enfermedades en humanos a estos patrones, porque eso permite actuar de una forma mucho más precisa al aplicar determinados medicamentos, tratamientos, drogas o edición génica en su caso. Es decir, si sabemos sobre qué tipos celulares actuar, probablemente las terapias frente al cáncer serán menos agresivas, por ejemplo”, explica el investigador. “Además, podemos conocer las mutaciones que ocurren en células tumorales, por ejemplo, y determinar unos patrones de mutación de cada una de las células que forman parte del tumor”.

Hace poco se publicó cómo se ha logrado mediante edición génica recuperar la vista de una persona ciega modificando algunas células de la córnea. Son ejemplos del modo en que, conociendo a nivel muy preciso, a nivel individual, todas las células del organismo, podremos actuar de una forma más inteligente para poder paliar determinadas enfermedades. “Las técnicas de *single-cell genomics* están abriendo unas expectativas increíbles. Y no es futuro, ya es presente: lo que antes veíamos como algo increíble en películas de ciencia ficción, como en Gatacca, aho-



Harriet Brooks,

la pionera nuclear que dejó su impronta en la tabla periódica y la radiactividad

Entusiasta de la ciencia, aventurera, apasionada, brillante. Mujer, hija, esposa, madre. La vida de Harriet Brooks durante su juventud fue vivida intensamente: apostó por su vocación, triunfó, hizo notables descubrimientos y trabajó con los grandes científicos del momento. Uno de sus principales trabajos fue su participación en el descubrimiento y estudio del radón, el gas radiactivo que es una de las principales fuentes de radiación natural. Pero la presión de la sociedad de la época la llevaron a abandonar su pasión y limitarse a la vida familiar.

■ Texto: **Patricia Ruiz Guevara** | Periodista científica ■

Esta es la historia de una apasionada de la ciencia que trabajó con tres científicos que posteriormente serían ganadores de sendos premios Nobel. La historia de una pionera de Canadá que ayudó a la comprensión de la naturaleza de la radiactividad y el comportamiento de los elementos químicos. Es la historia de una mujer a la que quisieron echar de la universidad cuando anunció su compromiso matrimonial y que escribió: «Creo que es un deber que le debo a mi profesión y a mi sexo: demostrar que una mujer tiene derecho a ejercer su profesión y a no ser obligada a abandonarla por el mero hecho de casarse».

La suya es una historia fascinante, potente, inspiradora, digna de ser contada. Y, sin embargo, es una historia que no aparece en los libros de ciencia y que no ha trascendido. Es una historia truncada por los convencionalismos sociales contra la mujer de la época. Por eso, es preciso sacarla a la luz y recordar su papel.

Su sobrina-bisnieta Ellen Denny también pensó que esta era una historia que tenía que contarse. Actriz y autora de teatro, lleva unos años preparando una obra teatral sobre la hermana de su bisabuela. «Sentí que esto era lo que tenía que empezar a escribir y llevarlo al escenario». También lo hicieron Marelene y Geoffrey Rayner-Canham, autores de los libros *Harriet Brooks: Pioneer Nuclear Scientist* y *A devotion to their science: pioneer women of radioactivity*, ambos de la editorial McGill-Queen's University Press. Esta es la historia de Harriet Brooks.

Talento y coraje desde la juventud

En 1876, en Exeter, Ontario (Canadá), la mayoría de los canadienses aún pensaban que a las mujeres no se les debería permitir participar en la educación superior. Harriet Brooks nació el 2 de julio de ese año dispuesta a romper con ciertos estereotipos.

Fue la tercera de nueve hijos y, junto con otra hermana, Elizabeth (la bisabuela de Denny), fue la única que continuó sus estudios más allá del instituto. Algo que debió suponer un gran esfuerzo económico para su familia (su padre era un viajante comercial, así que Brooks no venía de una familia acomodada como solían las pocas mujeres académicas de esa época). En 1894 se matriculó en la Universidad McGill en estudios centrados en física, para al final graduarse con honores en Filosofía Natural y Matemáticas. Había sido solo unos años antes, en 1888, cuando una mujer se había graduado por primera

vez en McGill. Hombres y mujeres aún atendían clases separadas.

Era brillante: ganó cada año durante sus estudios una beca o un premio, y en 1901 fue la primera mujer de esa universidad en recibir un título de máster en Ciencias, un hito que sin embargo «no llamó mucho la atención», indican los Rayner-Canham.

En un país tan grande y variopinto como Canadá, cada universidad se regía a su manera, pero sí que coincidía una realidad en todo el país: «Había prácticamente cero oportunidades laborales. Las mujeres que se graduaban iban a Alemania, Suiza o Estados Unidos», explican

los Rayner-Canham. Brooks se movió entre Canadá y Europa, en un momento de esplendor de la ciencia.

Años radiactivos y apasionantes

La palabra radiactividad rebullía en los círculos científicos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En 1896, Antoine Henri Becquerel la había descubierto casi por casualidad. Y Pierre y Marie Curie realizarían las investigaciones más importantes, descubriendo el polonio y el radio en 1898. Ernest Rutherford crearía la identificación de los tres componentes que emiten las sustancias radiactivas. En 1934, Irene Curie (hija de



Grupo de investigación de Ernest Rutherford (primero por la izquierda) en Montreal en el año 1899, con Harriet Brooks en el centro.



Fachada del edificio de la universidad McGill.



Edificio de la facultad de Físicas de la Universidad McGill en un grabado de 1896.

los Curie) y Frédéric Joliot pondrían nombre a la radiactividad artificial.

Harriet Brooks comenzó su andadura científica en ese periodo de intensa actividad. «La radiactividad se acababa de descubrir y todos estaban intentando entender qué era. Es casi mejor ver a estos científicos como químicos y no

como físicos, que buscaban comprender en qué consisten esas radiaciones extrañas de las sustancias químicas», explica Jaume Navarro, Ikerbasque Research Professor en la Universidad del País Vasco y experto en historia de la ciencia.

Curie y Rutherford investigaban con distintos enfoques: «¿Eran radiaciones electromagnéticas? ¿Estaba ese fenómeno relacionado con las partículas de la materia? En ese momento aún no se sabía cómo era el átomo por dentro. La radiactividad es precisamente lo que fue ayudando a comprender cómo es la estructura de la materia para que emita ese tipo de radiaciones», indica Navarro.

Brooks empezó a trabajar en un laboratorio bajo la dirección de Rutherford, centrándose al principio en trabajos relacionados con la electricidad, para después pasar a focalizarse en la física nuclear. En este contexto, la científica realizó algunas de las aportaciones más importantes durante el nacimiento de la radiactividad.

Pilares para la física nuclear

En la radiactividad, los núcleos de algunos elementos químicos son inestables y liberan energía. Lo que no se sabía todavía era qué pasaba con esa energía emitida por los elementos radiactivos, esa «emanación», como la bautizó Rutherford. ¿Era el mismo elemento químico, una especie de vapor o de gas?

Brooks se centró en estudiar el torio, un metal radiactivo sólido. Se dio cuenta de que las emanaciones que liberaba eran átomos radiactivos, pero, sorpresa, no de torio: la radiactividad provocaba también una desintegración de los elementos. Esto chocaba con el principio de indestructibilidad de la materia, entonces aceptado.

La conclusión a la que llegó Brooks fue que esa emanación era otro gas, ya que tenía un peso molecular distinto al del torio: así caracterizó el gas radón, que se encuentra en la tabla periódica

con el número 86 y el símbolo Rn, y cuyas propiedades estudió.

Brooks también descubrió que la radiactividad podía transferirse de una superficie a otra, de lo que derivó después el fenómeno del retroceso del núcleo del átomo (si se expulsa una partícula de un núcleo, este retrocede en la dirección opuesta). También estudió que hay una especie de liberaciones secuenciales de radiación cuando el uranio y el torio se desintegran. Su contribución y comprensión sobre los fundamentos de la desintegración atómica y la radiación fueron esenciales para la teoría de la radiactividad y la de la desintegración nuclear de Rutherford, que le harían ganar el Nobel.

Científica y mujer, méritos sin atribuir

«El descubrimiento del radón y la desintegración radiactiva secuencial fueron notables para el desarrollo de la radiactividad, aunque en su momento no se comprendió su verdadera importancia. Sin embargo, el químico Otto Hahn afirmó, tiempo después, haber descubierto el retroceso nuclear. Rutherford le envió una carta afirmando que Brooks lo había descubierto primero. Hahn estuvo de acuerdo, pero en la literatura se le sigue atribuyendo a él y no a Brooks», relatan los Rayner-Canham.

Lo curioso es que, como anotan los autores en su libro sobre Brooks, el propio Hahn escribe en su autobiografía *Otto Hahn: a scientific Biography* una nota sobre ella: «Puede que haya sido la primera científica en haber observado el fenómeno del retroceso radiactivo». Puede.

Brooks acompañó a Rutherford en su carrera científica durante diez años, y fue una figura importante para él. «No había ninguna obligación de que eligiera a una mujer, y menos en ese contexto histórico. Que lo hiciera reafirma que ella era de verdad muy buena y sobresaliente», indica su sobrina-bisnieta Denny. De hecho, Er-

DYLAN HEWLETT



nest Rutherford dijo de Brooks que era «la física más preeminente en el campo de la radiactividad, junto a Marie Curie».

El experto en Historia de la Ciencia, Jaume Navarro, hace un apunte sobre el contexto sociológico y científico. «Tenemos que pensar en el equipo de Rutherford como un laboratorio de química, no un despacho de física teórica. Es un lugar donde se trabaja, se mueven materiales, se hace un trabajo más práctico. Por eso, aunque sorprendente, es menos raro que pueda haber allí una mujer como Brooks», enfatiza. Marie Curie y Lise Meitner vienen también de esa tradición más empírica en el mundo de la física.

Si se mira a otros ejemplos, están las computadoras de Harvard, un grupo de mujeres astrónomas contratadas en el Observatorio de la Universidad de Harvard por Edward Pickering, entre las que estuvo Henrietta Swan Leavitt, y las calculadoras de la NASA, ingenieras clave

Ellen Denny actúa como 'Mary Bennet' en 'Miss Bennet: Navidad en Pemberley' en el Centro de Teatro de Manitoba (Canadá) en 2019. A la derecha, Jaume Navarro en su college de la Universidad de Cambridge (Reino Unido), con uno de los libros escritos por él.



para que el hombre pudiera llegar a la Luna, como Katherine Johnson.

Una plenitud científica frenética

La actividad científica que realizó Brooks tuvo lugar en distintos lugares. De Canadá con Rutherford al Bryn Mawr College de Pensilvania en 1901. Y dos años después, a Inglaterra, donde investigó sobre el radio y el torio, y trabajó con el físico J. J. Thompson en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge. Después volvió a Canadá, a la Universidad McGill.

En 1904 la deja y empieza a trabajar en la institución de educación para mujeres Barnard College. Dos años después, con los 30 recién cumplidos, anuncia su compromiso matrimonial y la decana de la institución pide su dimisión: ¿cómo va una mujer a cumplir con sus obligaciones matrimoniales y sus tareas académicas a la vez? Brooks contestó con la misiva que abre este reportaje y añadió:

«No concibo que las universidades femeninas, que invitan y motivan a las mujeres a tener carreras profesionales, puedan ser mantenidas negando este principio».

Continúa su aventura, rompe su compromiso matrimonial y también deja el Barnard College y se traslada a un retiro en las montañas Adirondack (Estados Unidos) con socialistas fabianos, donde también se encuentra el escritor, político y activista del movimiento revolucionario ruso Máximo Gorki. «Brooks se hizo su amiga y hay una anécdota curiosa que refleja de nuevo cómo estaba considerada la mujer en esa época», cuenta Denny. Encontraron unos textos de Gorki en los que se mencionaba a varias personas, «y estaba escrito 'physicist, Harriet Brooks, servant' [física/o, Harriet Brooks, sirvienta/a]. Todo el mundo dio por hecho que ella era la sirvienta», detalla.

Brooks viajó con el grupo de Gorki desde Nueva York a Italia. Tras este pa-

réntesis, se mudó a París (Francia). Allí trabajó sobre el periodo de semidesintegración del plomo con Marie Curie, referente ya de la radiactividad, en el Instituto Curie. En 1907, Rutherford se trasladó a la Universidad Victoria de Manchester y le ofreció de nuevo un puesto a Brooks. Sin embargo, esta vez, la científica declinó. Estaba prometida de nuevo y ahora pesaban más otros condicionantes.

Una investigadora brillante que abandona

Entre Rutherford (química), Thompson (física) y Curie (química y física) suman cuatro premios Nobel. Brooks trabajó con todos ellos, pero, a juzgar por comentarios recogidos en algunas de sus cartas, Brooks parecía tener una autoestima muy baja. ¿Cómo pudo sucederle esto a una científica tan brillante? ¿Por qué dejó su carrera?

Esto también recuerda a la actitud de Marie Curie que, pese a su fuerte carácter, dudaba de sí misma y buscaba con ahínco una y otra vez confirmación de sus ideas; como si por ser mujer tuviera que demostrarlo el doble. «Este es un fenómeno conocido como el síndrome del impostor. Ha sido un gran problema para las mujeres, que incluso han abandonado carreras prometedoras. Lamentablemente, sigue siendo frecuente entre las mujeres de hoy en día», afirma Marelene Rayner-Canham.

La Harriet Brooks que escribió aquella carta a la decana que quiso echarla por casarse contrasta con la que abandonó su carrera científica. «Es sorprendente porque hay poca distancia de tiempo entre ambos eventos, son solo unos años. Pero en ese espacio de tiempo, ella estaba alcanzando esa edad en la que era ahora o nunca. Tenía 31 años, quizá pensó que era su última oportunidad para formar una familia y tener un hogar», indica Denny.

Era una mujer soltera, lejos de Canadá y de su familia, presionada por la sociedad para que sentara cabeza con un matrimonio, con un sueldo modesto y pocas opciones laborales mejores a las que aspirar. Sus posibilidades profesionales eran continuar como asistente de investigación o buscar una posición como académica y profesora en alguna institución académica para mujeres en Canadá o en los Estados Unidos. Sin embargo, no tenía PhD, así que seguramente solo habría optado a puestos más bajos, como tutora o profesora numeraria, como recuerdan los Rayner-Canham en su libro.

«Me la imagino preguntándose si todo ese esfuerzo merecía la pena. El periodo de su vida entre los 20 y los 30 años había sido apasionante, viajando y trabajando con los mejores científicos, pero debía preguntarse, ¿y ahora qué? ¿Cuál va a ser mi siguiente lucha?», reflexiona Denny.

Casarse, sin embargo, implicaba volver a casa con sus hermanas y encontrar esa estabilidad práctica que estaba vetada para una mujer científica en la época. «Quizá su familia le dijo: oye, la aventura ha estado bien, pero es hora de que vuelvas a casa», sugiere Denny. Seguramente su bisabuela, Elizabeth, la otra hermana que llegó hasta el instituto, también lo hiciera.

Su sobrina-bisnieta recuerda otra anécdota que ilustra bien el tipo de comentarios a los que las mujeres tenían que enfrentarse: «Mi bisabuela se casó con un físico famoso en Montreal y en mi familia hay una frase que ha trascendido. Se decía que él se casó con la señorita Brooks guapa, Elizabeth, y no con la inteligente, que era Harriet».

Una llama radiactiva apagada

En abril de 1933, la luz de la primera científica nuclear canadiense se apagó. Todo parece indicar que fue algún tipo de enfermedad en la sangre relacionada con la intoxicación debida a su exposición a la radiactividad, como le sucedió a Curie; así lo creyó su único hijo superviviente (tuvo tres).

Cuando se enteró de su muerte, Rutherford escribió: «Era una mujer con un gran encanto personal, así como de marcados intereses intelectuales. Me temo que su vida doméstica no estuvo exenta



Marie Curie, pionera del estudio de la radiactividad, en su laboratorio.

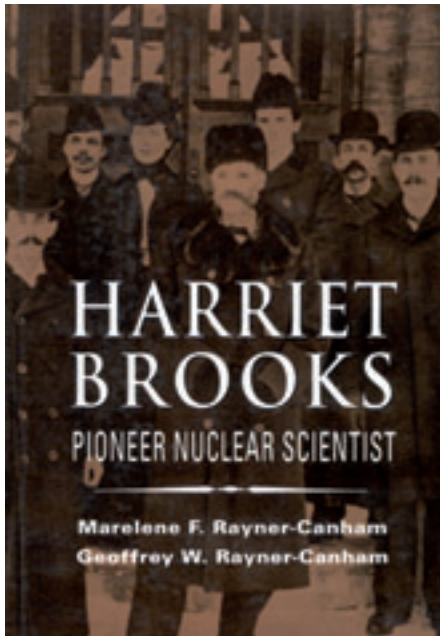
de serias pruebas que soportó con asombrosa entereza».

La misma entereza con la que se había entregado a la ciencia. «En nuestra opinión, muchos descubrimientos se retrasaron (o quizá nunca se produjeron) como consecuencia de la pérdida de tantas mujeres científicas inteligentes», afirman Marelene y Geoffrey Rayner-Canham.

Para este reportaje se ha consultado a varios expertos en historia de la ciencia. Ninguno sabía quién era Harriet Brooks. «Es un fenómeno muy común en la ciencia. Si un científico varón poco conocido es eliminado de la historia, se denomina efecto Mateo. Pero esto es muchísimo más frecuente en el caso de las científicas noveles: es el llamado efecto Matilda. A veces es algo deliberado por parte del científico más veterano; otras se trata de una simplificación de la narración para centrarse solo en los grandes nombres»,



Marelene y Geoffrey Rayner-Canham. Abajo, portada de su biografía de Harriet Brooks.



afirman los Rayner-Canham. Esas grandes figuras suelen ser hombres.

Es curioso comprobar, por ejemplo, que en la entrada en Wikipedia en español sobre Ernest Rutherford el nombre de Harriet Brooks no aparece, ni siquiera en el listado de sus estudiantes doctorales; ni el suyo ni el de ninguna mujer. En la entrada de Wikipedia en inglés, aparece en la categoría «otros estudiantes notables»; es la única mujer. Sin embargo, el nombre de Harriet Brooks aparece re-

petidamente en los artículos de investigación de Rutherford.

La disciplina de historia de la ciencia comenzó en la década de 1920 y 1930, pero no fue hasta 1970 cuando la historia de la mujer en la ciencia se volvió un campo popular de estudio en Estados Unidos y Europa, recuerdan los Rayner-Canham en su libro. Sí se han hecho algunas iniciativas: uno de los Laboratorios Nucleares de Chalk River, en Ontario, lleva su nombre; en 2002 fue incluida en el Salón de la Fama de la Ciencia y la Ingeniería de Canadá; en 2016 el Banco de Canadá la incluyó en la lista de candidatas a convertirse en la primera mujer canadiense que apareciera individualmente en una moneda.

Las Harriet Brooks del siglo XXI

Brooks tuvo que enfrentarse a una dura decisión: ¿su carrera científica o crear una familia? Han pasado 100 años, y según Marelene Rayner-Canham, la situación no ha cambiado tanto. «En mi opinión, en algunos aspectos, incluso se ha agravado. Los organismos que conceden becas y los comités de promoción y titularidad exigen niveles de productividad elevados y continuos. Se dice que se tiene

en cuenta el tiempo libre para los bebés y la crianza de los hijos, pero no es así», afirma la experta.

Además, el coronavirus ha ampliado la brecha de género y las mujeres siguen notando el peso de la conciliación familiar. «La pandemia ha vuelto a poner de relieve los problemas de las mujeres, no es una historia que haya pasado», añade Denny.

La historia de Harriet Brooks, además de la de una científica pionera que trabajó con tres premios Nobel y realizó importantes contribuciones a la ciencia y, en especial, a la radiactividad, es la historia de una lucha. Primero, una lucha por seguir su vocación y clamar que tenía derecho a ello, por lograr una carrera científica inspiradora, aunque muy corta, y conseguir tanto en tan poco tiempo. Después, una lucha por encontrar su sitio de nuevo en la sociedad tradicional, formar una familia, superar la pérdida de dos de sus hijos, acallar su ambición anterior.

Como concluye su sobrina-bisnieta, «no podemos cambiar lo que pasó, nunca sabremos qué impacto podría haber tenido en la ciencia, pero podemos recordarla y no silenciar su historia». ©

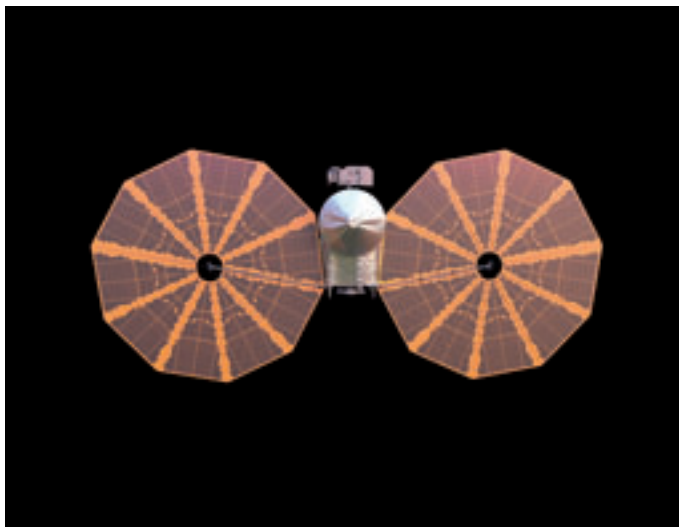
Reacción en cadena

■ Texto: **Pedro Mateos** |

NOTICIAS

En busca de asteroides lejanos

La NASA ha lanzado una sonda espacial, llamada Lucy, que volará sobre el cinturón de asteroides y sobre siete asteroides troyanos que comparten órbita con Júpiter, con el objetivo de analizar de cerca los materiales que los constituyen. Existe evidencia científica que indica que en estos cuerpos celestes rocosos hay restos del material original con el que se formó nuestro sistema planetario. “Es una auténtica misión de descubrimiento. Lucy está llena de



oportunidades para aprender más con respecto a estos misteriosos asteroides y comprender mejor la formación y evolución de nuestro siste-

ma solar”, dice Thomas Zurbuchen, administrador asociado de la Dirección de Misiones Científicas de la sede de la agencia en Washington.

Planteado por primera vez en 2014, este proyecto permitirá estudiar de un modo detallado la composición de unos asteroides que se encuentran tan lejos de Júpiter como lo están del Sol y muy distantes también entre sí. Para estudiarlos todos, Lucy deberá regresar hacia la Tierra en 2024 con el fin de recibir una asistencia gravitatoria que le permita impulsarse hacia el interior del principal cinturón de asteroides de nuestro sistema solar.

Lucy, que comparte nombre con el esqueleto fosilizado de uno de los ancestros homínidos más antiguos conocidos, es la primera misión de la NASA destinada a explorar tantos asteroides diferentes. “Tardaremos varios años en alcanzar el primer asteroide troyano, pero estos objetos merecen la espera y el esfuerzo por su inmenso valor científico. Son como diamantes en el cielo”, señala Harold F. Levinson, investigador principal del programa. En 2031, la sonda se desplazará de regreso a nuestro planeta para obtener un último impulso gravitatorio, que la catapultará hacia el enjambre de troyanos, a donde llegará dos años después, culminando un viaje galáctico considerado un hito en la historia de la agencia estadounidense.

La sílice, clave en el origen de la vida

En 1952, Stanley Miller confirmó la teoría del caldo primigenio de Oparin con un experimento donde demostró que se pueden formar compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas bajo las condiciones ambientales de la atmósfera primitiva. Su ensayo, que combinó agua, metano, amoníaco, hidrógeno y electricidad, fructificó en gran parte gracias al material del contenedor, hecho de vidrio borosilicato, según ha descubierto recientemente un equipo de investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científica español y la Universidad de Tuscia (Italia).

“Miller simuló el océano y la atmósfera de la Tierra primitiva, pero se olvidó de las rocas. Su papel crucial estaba oculto en las paredes de vidrio del reactor que utilizó”, dice Juan Manuel García Ruiz, del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. El estudio señala que Miller habría sintetizado muy pocas de las moléculas orgánicas relevantes para el surgimiento de la vida de no haber sido por el empleo de vidrio, catalizador necesario en el proceso gracias a la sílice (óxido de silicio) que lo compone.

“Este resultado tiene importantes implicaciones geoquímicas porque muestra que una gran parte de los compuestos orgánicos que se encuentran en las rocas más antiguas de planetas como la Tierra o Marte son probablemente de origen abiótico”, detalla el investigador. Es probable que las rocas puedan ser asimismo la justificación de la existencia de una atmósfera reductora, sin cantidades significativas de oxígeno libre y otros gases oxidantes, en los primeros tiempos de nuestro planeta. ▶

EFEMÉRIDES ►

HACE 75 AÑOS...

Se construye el primer ordenador electrónico

En 1946, los ingenieros John William Mauchly (1907-1980) y John Presper Eckert, Jr. (1919-1995) presentaron al mundo un aparato revolucionario: una computadora que carecía de pieza mecánica alguna en su estructura. Se trataba del ENIAC (acrónimo de *Electronic Numerical Integrator And Computer*), el primer ordenador de propósito general y completamente digital de la historia. Pesaba 27 toneladas y ocupaba 167 m² de superficie, y requirió de continuas programaciones manuales que llevó a cabo un grupo de seis mujeres cuya labor esencial fue desconocida hasta finales del siglo XX. Se dice que la enorme máquina, catalogada como “Einstein mecánico” por parte de la prensa del momento, precisaba de tal cantidad de energía (160 KW) que causaba apagones en la ciudad de Filadelfia, cercana a su ubicación.

El ENIAC se empleó durante varios años como instrumento de investigación para el ejército de Estados Unidos,



interviniendo en operaciones como cálculos de trayectoria de proyectiles, datos de balística o sistemas de alta precisión de bombardeos. También fue utilizado en diversas investigaciones científicas, donde su suficiencia para ejecutar cálculos matemáticos otorgaba una ventaja significativa. Sus constantes averías, la escasa capacidad de memoria que soportaba y la aparición de modelos más pequeños, baratos y eficientes condujeron a su retirada en 1955.

Fertilizantes a partir de plástico

Los bioplásticos, aquellos originados a partir de materia orgánica mediante un proceso biológico, pueden ser químicamente reciclados en fertilizantes, de acuerdo con un estudio llevado a cabo por científicos del Instituto Tecnológico de Tokio. Se trata de un tipo de policarbonato biológico, denominado PIC, que ha surgido recientemente como alternativa a algunos que se producen a partir del petróleo. Su producción genera urea, una molécula rica en nitrógeno ampliamente utilizada como fertilizante. La investigación, que será publicada en la revista *Green Chemistry*, demuestra que la degradación completa del PIC puede lograrse en solo



seis horas y sin la intervención de ningún catalizador que acelere el proceso; ha sido gracias a la aplicación de amoníaco acuoso a una temperatura de 90 °C. “Este pro-

cedimiento es funcionalmente simple y ecológico desde el punto de vista del reciclaje químico”, expresa Daisuke Aoki, uno de los líderes del equipo de investigación.

El aumento del uso de polímeros sintéticos ha provocado serios y abundantes problemas medioambientales desde su aparición, y es que solo se recicla el 14 % de todos los residuos plásticos generados en el planeta. Los hallazgos del experimento prueban la viabilidad de desarrollar sistemas de fertilización fundamentados en plástico, no solo con el propósito de reducir la polución sino también para contribuir a paliar las crecientes necesidades de alimento que experimenta el mundo. “Estamos convencidos de que nuestro trabajo representa un gran avance hacia el desarrollo de polímeros sostenibles y reciclables. ¡La era del ‘pan a base de plástico’ está a la vuelta de la esquina!”, concluye Aoki.

AGENDA

El Museo en la Antártida Exposición abierta hasta agosto de 2022 Museo Nacional de Ciencias Naturales (Madrid)

<https://www.mncn.csic.es/es/visita-el-mncn/exposiciones/el-museo-en-la-antartida>

La Antártida se ha convertido en el ecosistema del Museo Nacional de Ciencias Naturales, que lleva más de tres décadas estudiando el funcionamiento de este continente y los efectos que la acción humana origina en ella, a través de expediciones que se llevan a cabo en bases científicas o buques oceanográficos.

La exposición nos presenta a los protagonistas de este territorio inhóspito: pingüinos, líquenes y volcanes, que salpican el continente más frío y seco de nuestro planeta, con la finalidad de concienciar acerca de las consecuencias que sufren debido al cambio climático. La muestra ofrece fascinantes imágenes y vídeos que sobrevuelan la historia, la fauna y el clima antártico, así como un documental que invita a la reflexión sobre la incesante desaparición de los glaciares de la Tierra, fruto del calentamiento global. La Antártida almacena el 90 % del agua dulce del planeta y alberga el 5 % de la biodiversidad marina mundial, factores que la convierten en un lugar clave para la ciencia y el futuro. Han colaborado en la puesta en marcha de la exposición, además del propio Museo y sus investigadores, el Ejército de Tierra, la Armada Española y la Unidad de Tecnología Marina del CSIC.



LIBROS

Azar y probabilidad en matemáticas

Santiago Fernández Fernández

Catarata, 2021, 126 páginas, 14 euros

El concepto de probabilidad, asociado al cálculo matemático que evalúa las posibilidades de que un suceso ocurra cuando interviene el azar, tiene una importancia capital en muchos de los contextos en que la vida toma forma. Santiago Fernández, quien ha dedicado la suya al estudio y la divulgación del mundo de las matemáticas, repasa en esta obra un conjunto de situaciones en cuya naturaleza intervienen métodos y argumentos probabilísticos. Lo hace a partir de diversas paradojas y teoremas vinculados

a nombres como los de Galileo, Fermat, Gauss o Laplace. ¿Subirá el precio del petróleo? ¿Lloverá la semana que viene?

Lo que a primera vista parece responder al azar, está en realidad regido por leyes estadísticas, que pueden ser estudiadas con el fin de realizar ciertas predicciones sobre el futuro. El autor propone, además, un nuevo modelo didáctico que mejore la enseñanza de la probabilidad en el sistema educativo.



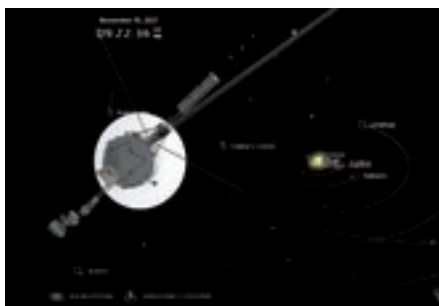
EN RED

Un viaje a nuestro interior

Friedrich Miescher observó por primera vez el ADN en 1869, aunque fue a lo largo del siglo XX cuando se logró ampliar el conocimiento con respecto a él, gracias a las aportaciones en torno a sus bases nitrogenadas, su función biológica y hereditaria y su estructura de doble hélice. Hoy, la cantidad de información que atesoramos acerca del ácido desoxirribonucleico es formidable, tal y como muestra la web interactiva <http://www.dnai.org/index.htm>, que nos da el lujo de hacer



una visita guiada al interior del núcleo de nuestras células. Los cromosomas se convierten en los actores protagonistas de una página que incorpora la cronología de los descubrimientos referentes al ADN, así como imágenes, vídeos y animaciones 3D que muestran con detalle la estructura y codificación del genoma humano. A través de sus contenidos, que incluyen entrevistas a expertos y narraciones históricas, podemos conocer diferentes técnicas de manipulación del código genético, además de algunas aplicaciones médicas de la genética que se están desarrollando en la actualidad. “DNA Interactive” facilita, por otro lado, diversas actividades orientadas a los profesionales de la docencia en torno al ADN, que pueden ser descargadas y utilizadas para aprender cómo actúan los organismos sobre los que se asienta la vida.



El destino de las sondas Voyager

La Voyager 1 fue el primer objeto hecho por el hombre en alcanzar el espacio interestelar. Se trata de la nave espacial más alejada de la Tierra; hoy se encuentra a unos 23.000 millones de kilómetros de su punto de lanzamiento, en un viaje sin precedentes más allá del horizonte de nuestro sistema solar. El sitio web (https://eyes.nasa.gov/apps/orrery/#/sc_voyager_1) permite conocer en tiempo real la situación de la nave, además de aportar información sobre su pasado, sus exploraciones y su ubicación actual con respecto a diferentes planetas, cometas y estrellas. La página muestra una asombrosa variedad de materiales visuales y sonoros de los cuerpos celestes divisados a través de los ojos de la Voyager 1. El objetivo inicial del proyecto consistía en visitar Júpiter y Saturno, pero sus logros fueron muchos más. Entre otras cosas, reveló la existencia de plasma más allá de la heliopausa, zona que marca el límite de influencia del Sol. Su gemela Voyager 2, cuya actividad puede seguirse en el enlace (https://eyes.nasa.gov/apps/orrery/#/sc_voyager_2), proporcionó información inédita sobre Urano y Neptuno, aunque posteriormente también abandonó nuestro sistema planetario y se ha dedicado a estudiar el ambiente externo a la heliosfera. Ambas sondas, que portan discos de oro con música y diversos sonidos procedentes de la Tierra, agotarán su energía disponible en 2025, lo que se traducirá en el final de su transmisión de datos.

REDES



@aberron. Cuenta personal de Antonio Martínez Ron, periodista científico y escritor, donde comparte descubrimientos y reflexiones relacionados con el ámbito de la ciencia.



El robot de Platón. Creado por el comunicador Aldo Bartra, es un canal centrado en la difusión de conocimiento científico con algunas nociones de filosofía.



NASA Earth. Página oficial de la NASA dedicada a la divulgación de noticias científicas vinculadas a la astronomía, la geología y el medio ambiente.



@astrorural. Cuenta que ofrece contenidos diarios relacionados con el mundo de la astronomía, como información sobre eventos, imágenes y curiosidades.



El método. En este espacio, el periodista y divulgador científico Luis Quevedo comenta noticias de interés, incorpora entrevistas a expertos y narra historias apasionantes, todo ello desde la fascinación por la ciencia.



@terepaneque. Cuenta de la astrónoma Teresa Paneque, cuyos vídeos divulgativos sobre ciencia tratan de resolver inquietudes acerca del universo.

Panorama

Memorando de Entendimiento entre España y Portugal

El 28 de septiembre se reunieron en Lisboa representantes del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la Agencia Portuguesa de Medio Ambiente (APA) y la Inspección General de Agricultura, Mar, Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (IGAMAOT) de Portugal, para firmar un Memorando de Entendimiento (MoU, por sus siglas en inglés) con el fin de reforzar la cooperación entre estos dos países en materia de protección radiológica y seguridad nuclear. En el acto participaron el presidente del CSN, Josep Maria Serena i Sender, quien destacó la histórica colaboración que ambos países han mantenido en materia de protección radiológica, y la consejera Pilar Lucio. El acuerdo tiene una duración inicial de cinco años y contempla el compromiso bilateral de acometer acciones diversas en los campos formativo, de intercambio de experiencia



operativa y reguladora y de promoción de la I+D, en pos de prevenir los riesgos derivados del uso de las radiaciones ionizantes. El proyecto se aplicará en aspectos como la autorización de instalaciones; el

reconocimiento mutuo de especialistas y empresas en materia de protección radiológica; la inspección, vigilancia y control de instalaciones y ambiental; y la preparación y respuesta ante emergencias. ▶

El Pleno del CSN visita la central nuclear Cofrentes

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear, formada por los cinco miembros del Pleno, el secretario general y el director técnico de seguridad nuclear acudió el 28 de octubre pasado a la central nuclear Cofrentes, en Valencia. En el interior de la zona controlada visitaron el edificio del reactor, donde se desarrollan los preparativos previos a las actividades de recarga, las piscinas de combustible gastado, el simulador de la sala de control uti-

lizado para la formación y reentrenamiento del personal con licencia y las instalaciones del Almacén Temporal Individualizado, una estructura destinada para el almacenamiento en seco de combustible gastado cuya

modificación de diseño fue informada favorablemente por el CSN el pasado mes de mayo. Además, durante el recorrido por el emplazamiento de la central, tuvieron ocasión de apreciar el área sísmica de almacenamiento

seguro donde se localizan los equipos portátiles de emergencia, el nuevo edificio que alberga el Centro Alternativo de Gestión de Emergencia (CAGE) y el sistema de Protección Contra Incendios Sísmico (PCI). ▶





Jornada divulgativa sobre el accidente nuclear de Fukushima

El pasado 14 de octubre, el Consejo de Seguridad Nuclear abrió sus puertas al público para celebrar una jornada divulgativa sobre las “Lecciones aprendidas de Fukushima”, con el fin de poner de relieve la importancia de la cooperación internacional para la mejora continua de la seguridad nuclear tras el accidente ocurrido el 11 de marzo de 2011 en la central nuclear japonesa Fukushima Daiichi. En la inauguración el presidente del CSN, Josep Maria Serena i Sender, insistió en que, en este tipo de accidentes, “la seguridad siempre debe ser la prioridad de las prioridades”. La exposición continuó de la mano de Juan Carlos Lentijo, asesor de Presidencia del organismo regulador, que recordó las causas que originaron el suceso, sus consecuencias radiológicas y la respuesta internacional que canalizó el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), para asistir a Japón en los días y meses posteriores. También hizo referencia, entre otras cosas, al Plan de Acción de Seguridad Nuclear aprobado por los Estados Miembros del OIEA en septiembre de 2011, que estableció un programa de trabajo para fortalecer el marco de seguridad nuclear mundial.

Reunión con las nueve comunidades con encomienda de funciones

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebró el mes de octubre, a través de medios telemáticos, la reunión anual con los inspectores de las nueve comunidades autónomas con las que el organismo mantiene acuerdos de encomienda de funciones, los cuales se refieren, entre otras cosas, a las funciones de inspección y control de instalaciones radiactivas de segunda y tercera categoría y a programas de vigilancia radiológica ambiental. La reunión, inaugurada por el consejero Francisco Castejón y el secretario general Manuel Rodríguez, comenzó con las presentaciones sobre temas generales de instalaciones radiactivas; a continuación, las diferentes comunidades autónomas expusieron las principales actividades que cada una de ellas llevó a cabo y presentaron los resultados del programa anual de inspecciones a instalaciones radiactivas y radiodiagnóstico de 2020. Del mismo modo, se repasaron los aspectos operativos de la inspección del transporte de material radiactivo y se anunció el proyecto de la nueva base de datos de instalaciones radiactivas.

Misión de verificación de la Comisión Europea

Una representación de la Dirección General de Energía de la Comisión Europea (CE), formada por dos expertos, llevó a cabo a finales de octubre una misión de verificación en España, compuesta por dos objetivos. Por una parte, comprobar los mecanismos de control de la radiactividad del medio marino en la costa de Galicia y, por otra, monitorizar las instalaciones de control de la radiactividad medioambiental y de la de las descargas en la central nuclear Santa María de Garroña (Burgos). La respuesta fue coordinada por el Consejo de Seguridad Nuclear,

que tuvo la misión de recoger la información proporcionada por todos los organismos implicados. La operación se llevó a cabo dentro del marco del artículo 35 de Euratom que establece que cada Estado miembro de la Unión Europea debe crear las instalaciones necesarias para controlar de modo permanente el índice de radiactividad de la atmósfera, de las aguas y del suelo, y que la Comisión tiene derecho al acceso a estas instalaciones de control para verificar su funcionamiento y eficacia. Al concluir la misión, los expertos comunitarios avanzaron como conclusión preliminar de su informe el cumplimiento de los requisitos previstos.



Conferencia General del OIEA sobre seguridad nuclear y protección radiológica

El Consejo de Seguridad Nacional, representado por su presidente, Josep Maria Serena i Sender, y los consejeros Javier Dies, Francisco Castejón, Elvira Romera y Pilar Lucio, asistió el 21 de septiembre por vía telemática a la 65ª Conferencia General del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la reunión anual y principal evento de gobierno de la entidad. La cumbre, cuyo formato combinó actividades presenciales y en línea a causa del protocolo sanitario, fue puesta en marcha por el director general del OIEA, Rafael Grossi, quien destacó que el Organismo ayudó el año pasado a 146 países a través del programa de cooperación técnica, ade-



más de la respuesta ante la covid-19, en áreas de trabajo como salud y nutrición, alimentación, agricultura y seguridad y protección. La declaración de España fue efectuada por el ministro de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, José Manuel Albares, quien resaltó el sistema de seguridad

nuclear y radiológica de nuestro país a través de la sólida estructura nacional de la que forma parte el Consejo de Seguridad Nuclear. Además, subrayó el apoyo de España a la labor del OIEA a través del desarrollo de estándares internacionales de seguridad y la cooperación con sus Estados miembros. ▸

Reunión del comité de gestión entre el CSN y la AMAC

La Asociación de Municipios en Áreas de Centrales Nucleares y de Centros de Almacenamiento de Residuos Radiactivos (AMAC) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) celebraron el 5 de octubre en la sede del organismo regulador la novena reunión del comité de gestión entre ambas instituciones. El encuentro, coordinado por la consejera Pilar Lucio, contó el apoyo de los consejeros Elvira Romera y Javier Díez y con la presencia del resto de miembros del Pleno. En su transcurso se revisaron los acuerdos entre los dos organismos; también se identificaron actividades que permitan al CSN acercarse a

la población de las zonas en las que se ubican instalaciones con riesgos nucleares y radiactivos, con el fin de mejorar la percepción de la seguridad en estos territorios, y se acordó la elaboración de un programa de jornadas de acercamiento al territorio. Por otra parte, se comentaron las novedades implantadas en materia de comunicación, así como la necesidad de establecer actividades de interés común con las que poder conformar un proyecto de convenio específico entre los dos organismos. Como complemento del encuentro, se celebró una jornada informativa y sendas visitas al Centro de Información del CSN y la Sala de emergencias (SALEM), abierta a los 61 representantes territoriales de los municipios de AMAC. ▸

Visita de la Coordinadora Estatal de Comités de Empresa de Centrales Nucleares (CECECN)

Una delegación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), encabezada por su secretario general, Manuel Rodríguez Martí, y la directora técnica de Protección Radiológica, María Fernanda Sánchez Ojanguren, recibió el 29 de octubre en la sede del Consejo a los representantes de la Coordinadora Estatal de Comités de Empresa de Centrales Nucleares (CECECN). Durante el encuentro se analizaron, entre otras cuestiones, aspectos relacionados con el relevo generacional, la gestión del conocimiento, la seguridad laboral y la participación de los trabajadores y sus representantes en las medidas de seguridad, como consecuencia de la implantación de la ISO 45001. También se abordaron asuntos como los requisitos de plantilla, turnos, retenes, etc. derivados del accidente nuclear de Fukushima, la afectación y utilización del personal de los retenes del Plan de Emergencia Interior y la revisión de los procedimientos ante pandemias y situaciones climatológicas adversas. ▸

Principales acuerdos del Pleno

Autorización de explotación de la central nuclear Trillo

En su reunión del 12 de noviembre, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear acordó, por cuatro votos a favor y la abstención del consejero Francisco Castejón, informar favorablemente la propuesta de modificación de la licencia de explotación de la central nuclear Trillo (Guadalajara), trasladada al CSN por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, por la que se modifica la fecha de presentación de la solicitud de renovación de la autorización de explotación por parte del titular, pero se mantiene el plazo mínimo de tres años para la remisión al CSN de los documentos requeridos para sustentar la posible operación a largo plazo.

Aprobada la estrategia internacional del CSN para el periodo 2020-2025

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), en su reunión del 3 de noviembre, aprobó la propuesta de estrategia de relaciones internacionales del organismo regulador para el periodo 2020-2025, tanto las de carácter técnico como institucional y en el ámbito multilateral y bilateral. En línea con el vigente Plan Estratégico del CSN y los ODS de la ONU, se definen cuatro objetivos estratégicos: la promoción de la actividad y la representación, la representación del CSN en el ámbito internacional, las relaciones con reguladores homólogos y los retornos de actividad.

Convenio entre el CSN y el Gobierno de Navarra sobre respuesta ante emergencias

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear aprobó el 28 de octubre la firma

de un convenio entre el CSN y el Departamento de Presidencia, Igualdad, Función Pública e Interior del Gobierno de Navarra, sobre planificación, preparación y respuesta ante situaciones de emergencia radiológica. El acuerdo, que tendrá una vigencia de cuatro años ampliable a cuatro más, es la actualización del convenio actual, firmado en 2012, para su adaptación a la Ley 40/2015 de Régimen Jurídico del Sector Público.

Apercibimiento al titular de Santa María de Garoña

El 28 de octubre, el Pleno del CSN acordó emitir un apercibimiento al titular de la central nuclear Santa María de Garoña (Burgos), actualmente en cese de explotación, por un incumplimiento de una Especificación Técnica en Parada. El procedimiento empleado por el titular para llevar a cabo las pruebas periódicas de la grúa pórtico del edificio del reactor no incluía la verificación de la velocidad de movimiento de la grúa, incumpliendo el correspondiente requisito de vigilancia. Posteriormente, el titular modificó el procedimiento y realizó la prueba completa, con el fin de garantizar la operabilidad de la grúa. Además, se ha requerido al titular la adopción de las medidas correctoras necesarias para evitar la repetición en el futuro de situaciones como esta. Se trata de una infracción leve, de acuerdo con lo previsto en la Ley de Energía Nuclear.

Guía de Seguridad del CSN GS-05.09

En la misma reunión del 28 de octubre, el Pleno del CSN recibió el borrador final de la revisión de la Guía de Seguridad

del CSN GS-05.09 sobre documentación para solicitar la autorización e inscripción de empresas de venta y asistencia técnica de equipos de rayos X con fines de diagnóstico médico, tras el proceso de información y participación pública correspondiente, por lo que incorpora el resultado del análisis de los comentarios recibidos.

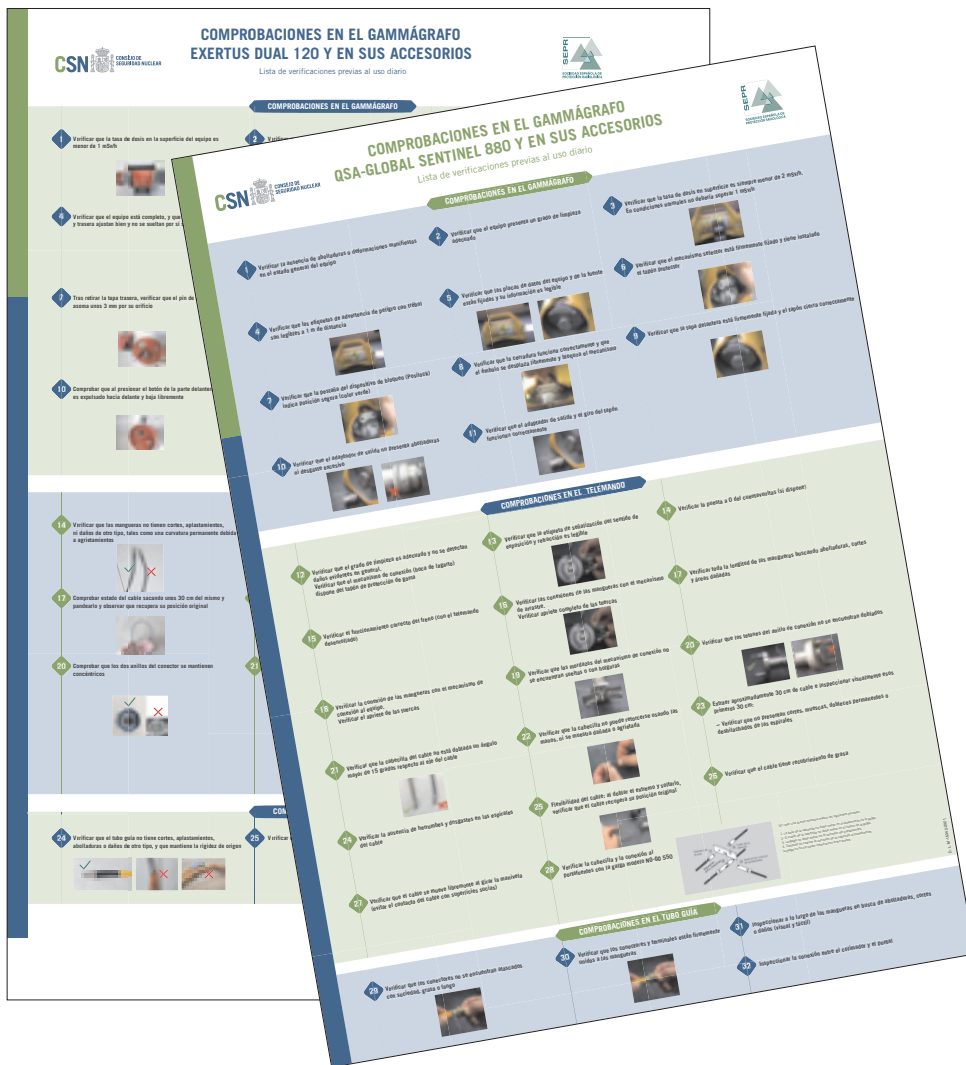
Sustitución del acelerador lineal de radioterapia del Instituto Multidisciplinar de Oncología

El pasado 20 de octubre, en su reunión semanal, el Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear autorizó la sustitución del acelerador lineal de radioterapia del Instituto Multidisciplinar de Oncología de Madrid. Cuando el nuevo acelerador, que estará ubicado en el búnker del antiguo acelerador, esté listo para iniciar su funcionamiento, el titular deberá comunicarlo al CSN para efectuar la inspección previa correspondiente.

Instrucción IS-10 sobre notificación de sucesos en centrales nucleares en operación

El Pleno del Consejo de Seguridad Nuclear, en su reunión del 14 de octubre, recibió el borrador correspondiente a la segunda revisión de la Instrucción del CSN IS-10, por la que se establecen los criterios de notificación de sucesos al Consejo por parte de las centrales nucleares en operación. Esta revisión tiene por objeto facilitar y clarificar estos procedimientos tanto en sus condiciones generales como en los tipos de sucesos a comunicar. El borrador se publicó en la página web del CSN para iniciar el trámite de audiencia pública en la fase de comentarios externos. ©

Publicaciones



Nuclear Safety Council Report to the Parliament 2020 | Summary Report

Comprobaciones en el gammógrafo Exertus Dual 120 y en sus accesorios Lista de verificaciones previas al uso diario

Comprobaciones en el gammógrafo QSA-Global Sentinel 880 y en sus accesorios Lista de verificaciones previas al uso diario

alFa Revista de seguridad nuclear y protección radiológica

Boletín de suscripción

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

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

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

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

Abstracts

REPORTS

6 **The Anthropocene, mankind's geological footprint**

In the Earth's crust it is possible to make out the different rock strata that have been formed throughout its history, each over millions of years. Now a number of scientists are suggesting that the presence of humans and their environmental impact may be considered to constitute a new period in the geological history of our planet.

12 **Nuclear propulsion to travel to Mars and beyond**

So far, chemical propulsion technology has shaped the rockets launched into space. However, NASA is studying the possibility of using nuclear energy, which would widen the horizons of the missions flown and make it possible to travel to the furthest regions of the solar system and undertake explorations unthinkable to date.

32 **The transparent threads of the cosmos**

Everything that we are capable of perceiving in the universe, such as the galaxies and stars, is no more than a tiny fraction of its overall matter, with 80% consisting of what is known as dark matter. We know of the existence of this dark matter because of its gravitational effects, but it has yet to be detected since it does not emit any type of electromagnetic radiation.

37 **From the cell to the atom**

Electron microscopy at very low temperatures, or cryomicroscopy, which took the Nobel Chemistry Prize in 2017, has achieved atomic resolutions and its applications are increasingly outstanding, one of them being the design of drugs and vaccines to combat the spicules of the SARS-CoV-2 virus, the cause of Covid-19.

50 **The intimate map of humans**

An international project, that includes the participation of Spanish scientists, is attempting to complete the catalogue of all the cells in our organism, starting from the genetic expression of each and its properties. The result will allow for new biomedical applications in the diagnosis and treatment of diseases.

56 **Harriet Brooks, the pioneer who left her mark on the periodic table and radioactivity**

In the early part of the 20th century, a Canadian scientist, Harriet Brooks, played a determining role in nuclear physics, contributing to the discovery and characterisation of radon and sequential radioactive decay while struggling against the social conventions of her time, which eventually led to her giving up her scientific work.

RADIOGRAPHY

26 **Nuclear power plant refuelling**

The fuel assemblies of nuclear power plants have to be replaced periodically in order for the facility to operate correctly. The refuelling outages also include the performance of tests and modifications on the installations and equipment to ensure the feasibility of the next operating cycle.

INTERVIEW

18 **Javier Cacho, atmospheric physicist and writer**

"The Montreal Treaty on the ozone layer was mankind's first great environmental victory".

TECHNICAL ARTICLES

19 **Management Oversight Risk Tree (MORT)**

MORT is a methodology for the investigation of incidents and accidents occurring during technological processes. It illustrates the design of an optimum safety programme and also shows how to identify the oversights and risks that may potentially lead to an accident and that an organisation assumes in drawing up and supervising its safety programmes.

43 **European Union checks on environmental radioactivity surveillance**

Article 35 of the Euratom Treaty deals with overseeing the safety of the general public, protecting people against the harmful effects of ionising radiations. With this aim in mind, it obliges the Member States to continuously control the level of radioactivity in soils, air and waters, and allows the European Commission to check for compliance with the commitments made in this area.



El CSN en tu bolsillo

Toda la información del Consejo de Seguridad Nuclear, actualizada en tus dispositivos móviles

El Consejo ha rediseñado su aplicación para teléfonos inteligentes y tabletas, tanto en sistema iOS como Android. Dispone de un menú de navegación que permite el acceso a numerosa información, como el estado operativo de las centrales nucleares, los sucesos notificados, los datos ambientales de la Red de Estaciones Automáticas (REA) y de las estaciones autónomas, publicaciones, noticias... Descárgala ya en App Store o en Google Play.



iOS



Android

