

# ESTRATOS

MÁS DE 25 AÑOS DIVULGANDO CIENCIA

Nueva  
edición  
del Atlas  
internacional  
de las nubes

Descubiertos  
exoplanetas que podrían  
albergar vida

María José Alonso,  
experta en  
nanotecnología  
farmacéutica: "Soy  
optimista con la vacuna  
contra el SIDA"

Fragilización por hidrógeno de vainas de combustible nuclear:  
los hidruros radiales

# Suscríbese a **ESTRATOS**



Nombre y apellidos: .....

Domicilio: .....

Población: .....

Cp: ..... Provincia: .....

E-mail: .....

De conformidad con lo dispuesto por la Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de carácter personal, consiento que mis datos sean incorporados a un fichero responsabilidad de Enresa y que sean tratados con la finalidad de gestionar la suscripción a la publicación Estratos. Puede ejercitar los derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición mediante escrito, acompañado de copia de documento oficial que le identifique dirigido a Enresa en calle Emilio Vargas nº7, 28043 Madrid; o bien remitiendo un mensaje a la dirección de correo electrónico registro@enresa.es

# ZORITA, FOCO DE INTERÉS INTERNACIONAL

Una vez superado uno de los hitos técnicos más importantes del proceso de desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera (Almonacid de Zorita, Guadalajara), el corte de los componentes internos y la vasija del reactor, este proyecto de Enresa continúa siendo objeto de especial atención por parte de la comunidad técnica nacional e internacional. La labor llevada a cabo en la central nuclear alcarreña y las actividades que se ejecutan en la actualidad, centradas en la descontaminación de hormigones, atraen a numerosos grupos de técnicos que ven en este atractivo proyecto un referente para futuras actuaciones en el panorama internacional.

Así, en los últimos meses se han interesado más de 150 expertos del sector procedentes de países como Australia, Eslovenia, Corea del Sur, EE.UU., Suecia, Francia, Alemania, Suiza, Japón o Canadá. Cabe destacar también, la reciente participación de los responsables del proyecto en el grupo internacional de trabajo patrocinado por la OECD/NEA y el OIEA para tratar aspectos

relativos a la Protección Radiológica en Instalaciones Nucleares, que también tuvo como escenario, durante dos jornadas, la central nuclear de Zorita. Y un año más, la central recibió la visita de los expertos del Electric Power Research Institute (EPRI), con la celebración de un *workshop* en el que se abordaron temas relacionados con las estrategias de caracterización y demolición del Edificio de Contención o la restauración de los terrenos en los que se ubica la instalación, entre otras cuestiones.

El grado de avance del desmantelamiento se sitúa en torno al 81% con el Circuito Primario segmentado, el 99% del inventario radiológico retirado y Contención y Auxiliar en proceso de descontaminación de hormigones. Tras la retirada del Circuito Primario, el riesgo radiológico ha disminuido sustancialmente, así como la complejidad tecnológica. Los trabajos en curso consisten en la descontaminación de hormigones para, posteriormente, proceder a la demolición de edificios y, por último, a la restauración del emplazamiento.

Es de especial interés el hecho de que apenas se han desmantelado una decena de reactores nucleares en todo el mundo de características similares al que operó durante 38 años en la central nuclear José Cabrera. Si en su momento, durante la segmentación bajo agua de los internos del reactor y de la vasija, las técnicas y metodologías de corte y acondicionamiento de residuos radiactivos aplicadas por Enresa constituyeron una novedad, no menos interesantes para la comunidad técnica y científica del sector son los retos presentes y futuros de este apasionante proyecto.

El diseño, montaje y puesta en marcha de la nueva planta de lavado de tierras, el desarrollo de los trabajos de caracterización de paramentos de gran altura mediante el uso de drones o la utilización de cámaras gamma para detectar, a través de imágenes en tres dimensiones, puntos activados radiológicamente en superficies y grandes piezas procedentes de los trabajos de desmantelamiento son, sin duda, hitos de gran atractivo e interés dentro de un proyecto de referencia. ■

## REVISTA ESTRATOS

**Edita:** Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A., S.M.E., M.P.  
**Redacción:** Emilio Vargas, 7.  
28043 Madrid  
Tel. 91 566 81 00

**Suscripciones:** registro@enresa.es

**Correo electrónico:** prensa@enresa.es

**Página web:** www.enresa.es

**Realización:**  
Wolters Kluwer España S.A.  
C/ Collado Mediano, 9  
28231 Las Rozas (Madrid)  
916020008

**Consejero delegado Wolters Kluwer:**  
Vicente Sánchez

**Jefe de Publicaciones Wolters Kluwer:** Fernando Cameo

**Publicidad Wolters Kluwer:**  
Juan Manuel Castro (jmcastro@wke.es)

**Coordinadores Wolters Kluwer:** Salomé González y Sergio Gavilán

**Redactores y colaboradores:**  
Pablo Almera, Pura C. Roy, Bruno Díaz, César de Echagüe, Elena García, Bárbara Gordo, Germán Hesles, Rosa M. Tristán, Javier Martín-Chivelet, Miguel Ángel Martín Rengel, Rosa Martín y Ricardo Tapia.

**Crédito de portada:**

Phoebe Dill

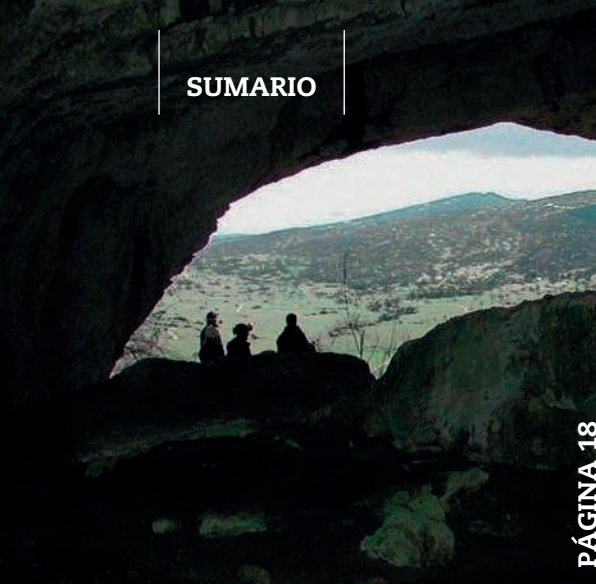
**Diseño, maquetación, producción e impresión:**

Wolters Kluwer España

Depósito legal: M-7 411- 1986

Esta publicación no comparte necesariamente la opinión de sus colaboradores y se limita a ofrecer sus páginas con respeto a la libertad de expresión.





PÁGINA 18



PÁGINA 24



PÁGINA 44



PÁGINA 54

# SUMARIO

## EDITORIAL

Zorita, foco de interés internacional . . . . . 3

## ACTUALIDAD ESTRATOS

El Cabril inicia los trabajos de cierre de la Celda 19 . . . . . 5

La comunidad técnica internacional sigue teniendo en Zorita una de sus referencias . . . 6 y 7

Enresa explica los avances en Zorita al Comité de Información de la central . . . . . 8

Técnicos japoneses y coreanos conocen cómo se desmantela un reactor nuclear . . . . . 9

El OIEA evaluará en otoño de 2018 el sistema de gestión de residuos español . . . . . 10

Clausura del XXVI Curso de Gestión de Residuos Radiactivos . . . . . 11

## I+D

Fragilización por hidrógeno de vainas de combustible nuclear . . . . . 12

## PALEOCLIMATOLOGÍA

Los espeleotemas y el cambio climático . . . . . 18

## ENTREVISTA

María José Alonso, experta en nanotecnología farmacéutica: “Soy optimista con la vacuna contra el SIDA, se están invirtiendo muchos esfuerzos” . . . . . 24

## GEOLOGÍA

Antropoceno, el tiempo geológico de los humanos . . . . . 28

## GENÉTICA

La paleogenética y sus tres letras para conocer el árbol evolutivo . . . . . 32

## SIERRA ALBARRANA

Actividades para conservar y disfrutar el Alto Guadiato . . . . . 38

Hornachuelos, desde la prehistoria hasta la edad contemporánea . . . . . 40

Actualidad de Sierra Albarrana . . . . . 42

## METEOROLOGÍA

‘Cazadas’ nuevas nubes . . . . . 44

## ARQUEOLOGÍA

Peldaño a peldaño hacia el misterio de los tartesios . . . . . 50

## TECNOLOGÍA

Biomímesis o cómo recrear la naturaleza’ . . . . . 54

## HIDROGEOLOGÍA

El uso necesario y sostenible de las aguas subterráneas . . . . . 58

## ASTROFÍSICA

¡Otras tierras a la vista! . . . . . 62

## NOTICIAS CIENCIA . . . . . 66

# actualidadestratos

## El Cabril inicia los trabajos de cierre de la Celda 19

El pasado 1 de junio se iniciaron en El Cabril los trabajos de cierre de la Celda 19, trabajos que continuarán durante seis meses y en los que llegarán a participar treinta personas entre personal propio y de empresas colaboradoras. Con el cierre de la Celda 19 serán veintiuna las estructuras de almacenamiento de residuos de baja y media actividad completadas.

El cierre oficial comienza, una vez realizadas las actividades preparatorias, con el vertido de unos 80m<sup>3</sup> de grava en la ranura en forma de cruz que se crea en el centro de la celda una vez que está llena de contenedores.

El objetivo de este relleno es dar estabilidad al conjunto del almacenamiento ante posibles movimientos sísmicos.

El punto final de los trabajos llegará a finales de noviembre con la impermeabilización provisional de la losa y los paramentos verticales de la estructura, y el traslado del techado móvil a la celda siguiente para dejarla operativa de cara a la explotación.

Entre medias, a destacar como actividades más significativas, el tratamiento superficial con chorro de arena de las 1.200 barras de espera de los muros y los 90 metros lineales del hormigón de

coronación de dichos muros; la colocación de lámina de polietileno de 90 micras de espesor mínimo, para protección de la superficie exterior de los contenedores almacenados (criterio de recuperación); el transporte y bombeo de 290 m<sup>3</sup> de hormigón de limpieza y estructural; nivelaciones topográficas; la elaboración y colocación de 58 toneladas de acero corrugado de diámetros 25, 16, 12 y 8 mm para montaje de las armaduras inferior, auxiliar y superior, así como la realización de 455 uniones de barras descentradas mediante cordones de soldadura de 125 mm de longitud y 12 mm de espesor de garganta. ■



Plataformas de Almacenamiento de El Cabril.

© Entesa

PROFESIONALES DE DIFERENTES GRUPOS DE TRABAJO SE HAN REUNIDO EN LA CENTRAL JOSÉ CABRERA EN LOS ÚLTIMOS MESES

## LA COMUNIDAD TÉCNICA INTERNACIONAL SIGUE TENIENDO EN ZORITA UNA DE SUS REFERENCIAS



Foto de grupo de los profesionales del International System Operational Exposure (ISOE) en su visita técnica a la central José Cabrera.

Durante los meses de abril y mayo, los trabajos de desmantelamiento que Enresa desarrolla en la central nuclear José Cabrera (Almonacid de Zorita, Guadalajara) han servido como escenario para el desarrollo de diferentes encuentros internacionales de profesionales del sector. Así, el grupo internacional de trabajo patrocinado por la OECD / NEA y el OIEA para tratar aspectos relativos a la Protección Radiológica en instalaciones nucleares se reunía en abril en Madrid y Zorita para celebrar su *meeting* semestral. El *Working Group on Radiation Protection Aspects in Decommissioning* (WGDECOM) forma parte del International System Operational Exposure (ISOE), creado con el objetivo de generar una base de datos que refleje las dosis colectivas recibidas en trabajos de des-



Momento de las reuniones del Working Group on Radiation Protection Aspects in Decommissioning (WGDECOM).



Los representantes del EPRI comprobaron in situ los diferentes avances del proyecto.



Miembros del EPRI en Zorita, junto con personal de Enresa.



Expertos del EPRI intercambiando conocimientos y experiencias operativas en materia de desmantelamiento con los técnicos de Enresa.

mantelamiento de instalaciones nucleares. Durante su encuentro, expertos en protección radiológica así como profesionales de diferentes organismos reguladores, pusieron en común sus estudios. La base de datos del ISOE incluye información de cerca de 400 unidades operativas y 80 paradas o en proceso de desmantelamiento de 29 países.

El desmantelamiento de instalaciones nucleares es un tema que ha adquirido gran importancia en el ámbito de la NEA, ya que representa uno de los principales retos de futuro dentro del sector. La Agencia Europea, consciente de que existen

muchas cuestiones a estudiar en el campo de la protección radiológica en el desmantelamiento de centrales nucleares, organizó un encuentro en noviembre de 2014 con el objetivo principal de ahondar y mejorar en todos aquellos aspectos de esta materia que sean necesarios. En ese momento se decidió la creación de este grupo de trabajo específico (WGDECOM), que desde entonces se reúne dos veces al año. En Mayo de 2015, Enresa y el ISOE firmaron un acuerdo de colaboración para facilitar el intercambio de información y experiencias en el campo de la protección radiológica en la operación y desmantelamiento de centrales nucleares.

#### VISITA DEL EPRI

Junto con el encuentro desarrollado por el grupo del ISOE, Zorita recibía un año más la visita de expertos del Electric Power Research Institute (EPRI), organismo internacional de investigación y cooperación técnica y científica en el que participa Enresa. En este *workshop*, los asistentes abordaron temas de gran interés para el desarrollo de los próximos trabajos que afrontará el proyecto de la central José Cabrera, tales como la caracterización y demolición del Edificio de Contención o la restauración de los terrenos, entre otras cuestiones.

El Electric Power Research Institute (EPRI), organización independiente sin ánimo de lucro, lleva a cabo actividades de investigación y desarrollo relacionadas con la generación, distribución y uso de la electricidad. El EPRI reúne a científicos e ingenieros, así como a expertos del mundo académico y de la industria, para abordar los desafíos futuros de la electricidad tales como la fiabilidad, la eficiencia, la salud, la seguridad y el medio ambiente. Los miembros del EPRI representan más del 90% por ciento de la electricidad generada y distribuida en los Estados Unidos, y participan en él más de 1.000 organizaciones diferentes pertenecientes a más de 30 países. ■

# ENRESA EXPLICA LOS AVANCES EN ZORITA AL COMITÉ DE INFORMACIÓN DE LA CENTRAL



El director del Desmantelamiento, Manuel Ondaro, explicó a los asistentes los avances del proyecto.

El pasado 11 de mayo, el Casón Cultural “Condes de Saceda” de Almonacid de Zorita (Guadalajara), acogía la celebración del XVIII Comité de Información de la central nuclear José Cabrera. El director del Desmantelamiento, Manuel Ondaro, explicó los avances del proyecto que Enresa desarrolla en la instalación alcarreña.

Ondaro repasó las actuaciones acometidas durante el año 2016, con especial atención a los trabajos de retirada de hormigones de las cavidades del reactor y foso de combustible gastado. Asimismo, el director añadía algunos datos relativos a la ges-

tion de materiales, la protección radiológica y la seguridad, entre otras cuestiones.

En la reunión del Comité, que estuvo presidida por José Manuel Redondo, representante del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, y que estuvo acompañado por el subdelegado del Gobierno en Guadalajara, Juan Pablo Sánchez Sánchez-Seco, también participaron la alcaldesa de Almonacid de Zorita, Elena Gordón, y la jefa de Proyecto del Desmantelamiento por parte del Consejo de Seguridad Nuclear, Susana Solís. Asistieron, además, representantes de la Asociación de Municipios de Áreas Nucleares (AMAC), de Protección Civil, del Servicio de Protección Ciudadana de la Delegación Provincial de la Junta de Castilla-La Mancha, así como alcaldes, empresarios y vecinos del entorno de la central nuclear. Por parte de Enresa, asistieron Juan Luis Santiago, director de Operaciones -quien también acompañó a los miembros del Comité de Información durante la visita a la central-, Lorena Segura, directora de Desarrollo Corporativo, así como Arturo González y Carlos Rodríguez, técnico y jefe del Departamento de Responsabilidad Social Corporativa respectivamente.



Representantes del Comité de Información de la central.



Los participantes pudieron contemplar los trabajos en la visita previa a la reunión.

Antes de la celebración del Comité, los participantes realizaron una visita a los trabajos de desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera.

Los Comités de Información tienen como objetivo transmitir a los vecinos de localidades con centrales nucleares, asociaciones, empresarios y demás colectivos de su ámbito de influencia toda la información relativa a las tareas que se realizan en las instalaciones de su entorno. ■

## DURANTE UNA VISITA A LA CENTRAL JOSÉ CABRERA TÉCNICOS JAPONESES Y COREANOS CONOCEN CÓMO SE DESMANTELA UN REACTOR NUCLEAR



Delegación coreana de KHNP en Zorita.



Delegación japonesa de la compañía Shikoku Electric Power Co.

Una delegación de la compañía japonesa Shikoku Electric Power Co. se ha desplazado esta primavera hasta España para visitar los trabajos de desmantelamiento que Enresa acomete en Zorita. Los técnicos nipones mostraron especial interés en conocer cómo se realizó la segmentación bajo agua de los internos y de la vasija del reactor. En mayo de 2016 paró la Unidad 1 de las 3 con las que cuenta su central nuclear de Ikata.

Por otro lado, y fruto de la colaboración que existe con Enresa, técnicos de la KoreaHydro& Nuclear Power (KHNP) tuvieron recientemente una reunión de trabajo en la sede de Enresa en Madrid y visitaron la central José Cabrera y el centro de almacenamiento de El Cabril. KHNP produce el 30% de la energía eléctrica de Corea del Sur. ■

## ZORITA ACOGE UN AÑO MÁS EL ENCUENTRO ORGANIZADO EN COLABORACIÓN CON ENRESA VISITA DE LOS ALUMNOS DEL CURSO DE GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS DEL CIEMAT

Junto con los colectivos profesionales del sector nuclear, los estudiantes universitarios siguen

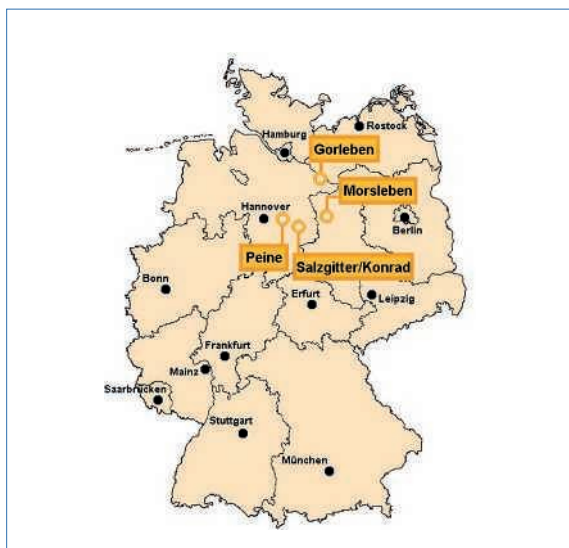
siendo otro de los colectivos más interesados en el desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera.



Momento de la visita técnica de los alumnos del curso.

Uno de los últimos en hacerlo han sido los alumnos de la XXVI edición del Curso de Gestión de Residuos Radiactivos que organiza el Ciemat, en colaboración con Enresa y la Universidad Politécnica de Madrid. La visita técnica, contemplada en el programa oficial del curso, se centró principalmente en conocer cómo se gestionan los materiales en el área del Box Counter y la planta de lavado de tierras. ■

## ALEMANIA TRASPASA LA TITULARIDAD DE EMPLAZAMIENTOS RELACIONADOS CON LA GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS AL NUEVO ORGANISMO FEDERAL PARA ALMACENAMIENTO BGE



Mapa de los emplazamientos de BGE.

El nuevo organismo federal para el almacenamiento de residuos radiactivos alemán BGE, asumió el pasado mes de abril la titularidad de cuatro emplazamientos relacionados con la gestión e investigación de residuos radiactivos: Asse, Gorleben, Konrad y Morsleben. Con este nuevo paso se avanza en la reestructuración del marco institucional alemán que comenzó con la creación en 2016 de este nuevo organismo, asemejable a Enresa, de manera que todas las responsabilidades de instalaciones de almacenamiento de todo tipo de residuos radiactivos se concentrarán en una misma organización pública.

La BGE tiene entre sus principales objetivos la planificación, construcción y operación de almacenamientos de residuos, así como la búsqueda de un emplazamiento para la gestión definitiva de residuos radiactivos de alta actividad.

Para ello, este nuevo organismo se ha creado con personal de la antigua oficina para la seguridad de los residuos radiactivos (BFS) y con personal de la empresa concesionaria de la construcción de almacenamientos (DBE), que ha sido comprada por el gobierno alemán. La reestructuración del marco institucional alemán se ha completado con la creación de un nuevo organismo regulador (BFE) también compuesto por antiguo personal del BFS. ■

## EL OIEA EVALUARÁ EN OTOÑO DE 2018 EL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS ESPAÑOL



Representantes de la misión Artemis en el Consejo de Seguridad Nuclear.

Un grupo de expertos internacionales coordinado por el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA) evaluará en otoño de 2018 el sistema de gestión de residuos radiactivos español, dentro de las revisiones periódicas que los Estados miembros de la UE deben realizar, al menos, una vez cada diez años para dar cumplimiento a la Directiva de Residuos.

Así, los expertos internacionales acudirán a España para realizar dos evaluaciones de manera conjunta: por un lado la IRRS (Sistema Integrado de Revisión Reguladora) que es un instrumento para reforzar y mejorar la efectividad del marco regulador de los Estados miembros, así como sus actividades en el ámbito de la seguridad nuclear, de los residuos radiactivos y del transporte; y por otro, ARTEMIS, una revisión integral del programa de gestión de residuos radiactivos.

La labor de examen de los expertos internacionales viene precedida por una autoevaluación que deben preparar las instituciones españolas, entre ellas Enresa, en la cual deben responder a una serie de preguntas facilitadas por el Organismo. España se encuentra trabajando ya en su autoevaluación para ambas misiones, autoevaluación que culmina con la elaboración de un plan de actuación y mejoras sobre el que se centrará gran parte del trabajo del Organismo Internacional.

España será el cuarto país de la Unión Europea en ser evaluado en una misión de tipo ARTEMIS en cumplimiento de la Directiva de Residuos, y el primero en someterse a una misión combinada de ARTEMIS con IRRS. ■

## CLAUSURA DEL XXVI CURSO DE GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS



De izquierda a derecha, M<sup>a</sup> Luisa Marco Arbolí, Eduardo Gallego Díaz y Mariano Navarro.

El pasado 24 de mayo, Mariano Navarro, director de Ingeniería de Enresa, participó en la clausura de la vigésimo sexta edición del Curso sobre Gestión de Residuos Radiactivos, que organiza el Ciemat con la participación de la Universidad Politécnica de Madrid y Enresa.

El director de Ingeniería representó a Enresa en el acto que daba fin al curso, junto con los representantes de las otras organizaciones implicadas: M<sup>a</sup> Luisa Marco Arbolí, jefa de la División de Gestión del Conocimiento, por parte del Ciemat, y el profesor Eduardo Gallego Díaz, Catedrático de Ingeniería Nuclear del Departamento de Ingeniería Energética de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Previamente, tuvo lugar una mesa redonda titulada *Aspectos de Protección Radiológica en la Gestión de Residuos Radiactivos*, moderada por Eduardo Gallego y con la participación de Fernando Lentijo Robledo,

técnico del Departamento de Licenciamiento y Seguridad, y Oscar González Corral, jefe del Servicio Protección Radiológica y Seguridad del Desmantelamiento y Clausura de la central nuclear José Cabrera, por parte de Enresa, junto con Carlos Puras González, de IDOM Servicios Nucleares.

Integrado en el Máster de Energía Nuclear y Aplicaciones - MINA - de la Universidad Autónoma de Madrid y el Ciemat; y en el Máster Universitario en Ciencia y Tecnología Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, el curso ha servido para completar la información que los alumnos y postgraduados universitarios reciben acerca de la gestión de residuos radiactivos.

Son muchos los profesionales de Enresa que han participado como docentes en este curso universitario que, a través de sus 51 horas lectivas, abarca multitud de aspectos relacionados con el servicio público que realiza la empresa.

Entre los contenidos del curso se incluyen disciplinas del área técnica tanto en materia de gestión de residuos (generación, características y clasificación; criterios de gestión y almacenamiento, etc.) como de desmantelamiento de instalaciones, con especial atención a las materias de seguridad y protección radiológica. Además de los contenidos de carácter más técnico, el curso abarca otros aspectos esenciales de la gestión de residuos como el marco legal, los programas de garantía de calidad o la participación social en la toma de decisiones.

El curso también incluyó dos visitas técnicas al centro de almacenamiento de El Cabril y al desmantelamiento de la central nuclear José Cabrera. ■



Momento de la entrega de diplomas.



El calentamiento produce que los gases generados en la barra de combustible durante el quemado produzcan una tensión circunferencial en las vainas.

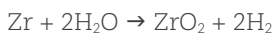
LOS HIDRUIROS RADIALES

# FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DE VAINAS DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

La pérdida de ductilidad de las vainas de combustible gastado —tubos metálicos fabricados con aleaciones de circonio y en cuyo interior están las pastillas cerámicas de combustible— puede ocasionarse por la presencia en ellas de hidruros de circonio. El circonio se oxida y produce hidrógeno que se difunde por la vaina y forma esos hidruros al sobrepasar su límite de solubilidad. Para determinar su efecto sobre las vainas, se realizan investigaciones que buscan encontrar una relación directa entre el procedimiento de secado empleado, la disposición (radial/circunferencial) de hidruros y la fragilización de la vaina a distintas temperaturas.

Texto: **MIGUEL ÁNGEL MARTÍN RENGEL, INVESTIGADOR SENIOR, E.T.S.I.C.C.P, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**L**as vainas de combustible nuclear de los reactores de agua ligera son tubos metálicos en cuyo interior se encuentran las pastillas cerámicas del combustible. Estos tubos se fabrican con aleaciones de circonio. Uno de los problemas principales que puede presentar el combustible gastado (CG) es la pérdida de ductilidad de la vaina causada, entre otras razones, por la presencia de hidruros de circonio en las mismas. El circonio de la vaina se oxida en el reactor según la siguiente reacción:



Dicha reacción de oxidación produce hidrógeno, siendo absorbido una parte del mismo por la vaina. El hidrógeno absorbido se difunde en el interior de la vaina y, cuando se sobrepasa su límite de solubilidad, precipita formando hidruros de circonio. Durante el quemado del combustible, los hidruros se distribuyen formando vetas dispuestas a lo largo de la dirección circunferencial de la vaina. Se ha comprobado que con esta disposición de los hidruros, incluso para el caso de contenidos altos de hidrógeno correspondientes con combustible sometido a alto quemado, las vainas siguen conservando cierta ductilidad [1-4].

Por otra parte, la carga de los elementos de CG en el contenedor tiene lugar dentro de la piscina. Cuando se extrae el contenedor, para eliminar el agua que contiene el mismo, se eleva su temperatura durante las operaciones de secado (sin llegar a superar en condiciones normales los 400 °C, según establece la regulación ISG-11 Rev3 de la NRC, aplicable subsidiariamente en España). Este calentamiento produce que parte de los hidruros (o todos, según

la aleación de la vaina y el grado de quemado del combustible) se disuelvan. Al mismo tiempo, el calentamiento produce que los gases que se han ido generando en el interior de la barra de combustible durante el quemado produzcan una tensión circunferencial en la vaina por incremento de la presión interna de la misma. Cuando cesa el calentamiento, la vaina se va enfriando lentamente mientras está sometida a la tensión circunferencial de los gases. Esta combinación de alta temperatura y tensión circunferencial provoca que los hidruros precipiten de nuevo pudiéndose disponer, al menos una parte de ellos, radialmente. Bajo determinadas circunstancias los hidruros radiales pueden llegar a fragilizar la vaina [5-7].

## INVESTIGACIONES

Son muchas las investigaciones realizadas para determinar el efecto de los hidruros radiales en las vainas. De entre todas ellas cabe destacar las realizadas con combustible irradiado en el Argonne National Laboratory (ANL) de los Estados Unidos de América. Estas investigaciones se han enfocado en encontrar una relación directa entre el procedimiento de secado empleado, la disposición (radial/circunferencial) de hidruros y la fragilización de la vaina a distintas temperaturas.

En ANL, para simular el efecto del secado en el combustible irradiado, se emplean muestras de barra de unos 80 mm de longitud. Mediante un tratamiento químico y con ayuda de un taladro adaptado, se eliminan las pastillas cerámicas del combustible. El tratamiento químico consiste, esencialmente, en baños sucesivos en ácido nítrico. Una vez hecho esto se sellan los extremos de la vaina vacía, introduciendo

previamente en su interior un gas inerte, Ar. Este gas inerte simula los gases que contiene el CG y que producen la tensión circunferencial en la vaina durante el secado. Posteriormente, el segmento de vaina sellado se introduce en el interior de un horno en atmósfera inerte (para evitar la oxidación adicional de la vaina) y la muestra se calienta hasta temperaturas que se consideran representativas del secado (350-400 °C) y tensiones circunferenciales máximas que pueden variar de los 60 a los 140 MPa. La vaina está a máxima temperatura durante 1 hora (tiempo suficiente para que la disolución de hidruros tenga lugar), siendo enfriada después lentamente (5 °C/h), precipitando así de nuevo los hidruros.

Una vez realizado el tratamiento termomecánico descrito, la vaina se despresuriza y se secciona en varios segmentos. Algunos de ellos, se emplean para medir el contenido de hidrógeno, otros son empleados para realizar estudios metalográficos y finalmente, varios segmentos de la vaina se emplean para realizar ensayos mecánicos con el fin de estudiar el comportamiento dúctil-frágil de la misma. El ensayo fundamental que se emplea es el de compresión diametral (Ring Compression Test, RCT), al final de este artículo se hablará de él en detalle.

En la actualidad, en España, no se puede trabajar con material irradiado debido a la carencia de un laboratorio que cuente con celdas calientes. Por ello los estudios sobre posible pérdida de ductilidad de vaina deben de realizarse utilizando material fresco sin irradiar. Enresa, en colaboración con CSN y Enusa, lleva más de 10 años financiando y colaborando en proyectos de este tipo. Estos proyectos se han desarrollado en la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

## En la actualidad, en España, no se puede trabajar con material irradiado debido a la carencia de un laboratorio que cuente con celdas calientes. Por ello, los estudios sobre posible pérdida de ductilidad de vaina deben realizarse utilizando material fresco sin irradiar

Dichos trabajos han contribuido notablemente a entender la fenomenología del problema, desarrollando numerosas técnicas experimentales.

### PRINCIPALES DESVENTAJAS

Son dos las principales desventajas que presenta el hecho de trabajar con material sin irradiar. La primera de ellas es que no se puede valorar el efecto fragilizador que provoca por sí misma la irradiación. La segunda es que el hidrógeno debe ser introducido en las muestras de vainas mediante tratamientos químicos previos. Además, en muchas ocasiones, no se logra reproducir exactamente la disposición que tienen los hidruros en la vaina durante el quemado. Por ello, aunque los tratamientos posteriores de simulación del secado sean idénticos a los que se emplean con material irradiado, la reorientación de hidruros conseguida puede ser bastante diferente.

### HIDRUROS RADIALES

En la figura 1 se muestran dos fotografías de vainas hidruadas de ZIRLO sin irradiar sometidas a tratamientos de reorientación. La

muestra correspondiente con la fotografía (A) contiene 150 ppm de hidrógeno, mientras que la correspondiente con la fotografía (B) tiene 1200 ppm de hidrógeno. La temperatura máxima que se alcanzó durante el tratamiento de reorientación fue de 400 °C y la tensión fue de 140 MPa en ambos casos.

Puede observarse que, aunque el tratamiento de reorientación empleado para ambas muestras fue el mismo, existen hidruros radiales de mayor longitud en la muestra con menor contenido de hidrógeno (150 ppm). La explicación es sencilla: a 400 °C se disuelven unas 200 ppm de hidrógeno. Por ello, en la muestra con menos hidrógeno se disuelven la totalidad de los hidruros. Al enfriarse y precipitar de nuevo bajo tensión, una parte importante de los hidruros lo

hace radialmente. Al existir una menor concentración de hidrógeno, existe una mayor distancia entre los hidruros que van precipitando circularmente, por lo que hay disponible espacio para que se formen hidruros radiales largos. Por el contrario, para el caso de la muestra con 1200 ppm de hidrógeno, sólo una sexta parte de los hidruros se disuelve, permaneciendo el resto distribuidos circunferencialmente en la muestra. La alta concentración de hidrógeno hace que exista poca distancia entre las vetas de hidruros circunferenciales, por lo que los hidruros que van precipitando radialmente al enfriarse bajo tensión, no disponen de tanto espacio como en el caso anterior y consecuentemente se forman hidruros más cortos.

### ENSAYOS MECÁNICOS

Como se ha comentado anteriormente, el ensayo mecánico más empleado para caracterizar la pérdida de ductilidad de las vainas es el ensayo de compresión diametral. Este ensayo es representativo de hipotéticos accidentes de pinzamiento de la barra de combustible por parte de la rejilla. Además, se cuenta con la ventaja de que este ensayo es muy sensible a la presencia de hidruros en la vaina [1].

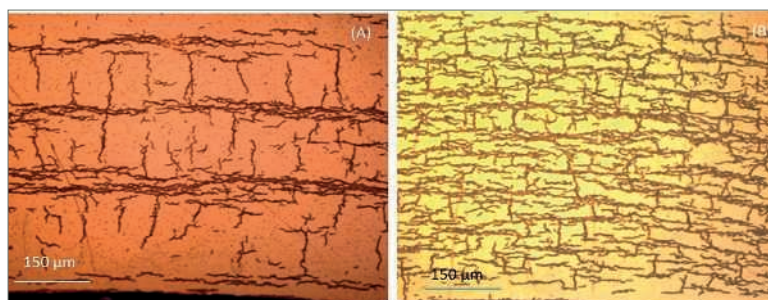


Figura 1 Muestras de ZIRLO sin irradiar con (A) 150 ppm y (B) 1200 ppm de hidrógeno sometidas a tratamiento de reorientación (400°C y 140 MPa).

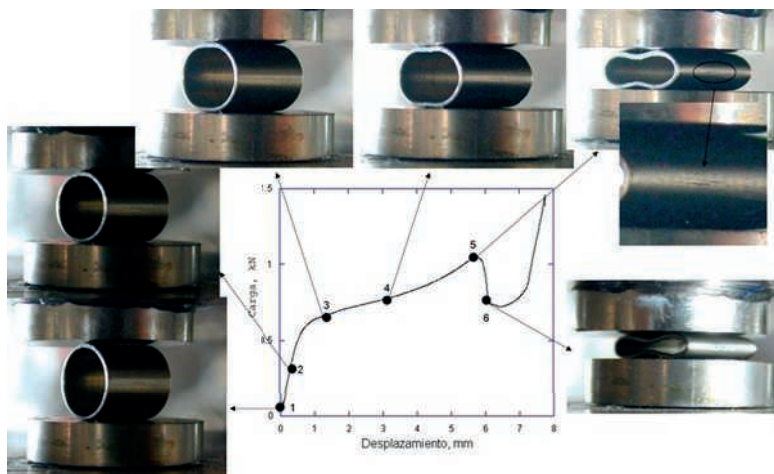


Figura 2 Curva Carga-Desplazamiento de un ensayo de compresión diametral para muestra de ZIRLO sin irradiar.

El ensayo es sencillo de ejecutar, consiste en comprimir una muestra de vaina mediante dos platos de compresión plano-parallel. En la figura 2 se muestra una gráfica carga-desplazamiento correspondiente a una muestra de ZIRLO sin irradiar. En dicha figura se presentan fotografías de esta muestra durante las etapas principales del ensayo.

En el punto 1 de la figura 2 comienza el ensayo. Al comprimir la probeta ésta se deforma elásticamente (punto 2). Al seguir aumentando el desplazamiento comienza la plastificación de la muestra (punto 3). Como consecuencia de la deformación sufrida por la probeta, la carga ya no se aplica sobre dos líneas, como sucedía al comenzar el ensayo, sino

sobre dos planos, uno por base, tal y como se aprecia en el punto 3 de la figura. La muestra sigue deformándose plásticamente, punto 4. Seguidamente la carga alcanza un máximo relativo en el punto 5. En ese instante, las generatrices que trabajan a tracción (exterior de la muestra), comienzan a fisurarse (ver fotografía aumentada correspondiente al punto 5, fig.2). La fisura se va propagando, con lo que la carga disminuye al aumentar el desplazamiento. En el punto 6 la fisura se ha propagado de un lado a otro de la probeta. A partir del punto 6, los platos de compresión entran en contacto, por lo que el valor de carga aumenta muy rápidamente.

Debido a la presencia de hidruros radiales, la vaina puede romperse en puntos intermedios del ensayo. A grandes rasgos, y sin entrar en matices, puede decirse que las probetas cuyas curvas carga-desplazamiento superen el punto 3, son dúctiles, ya que deforman

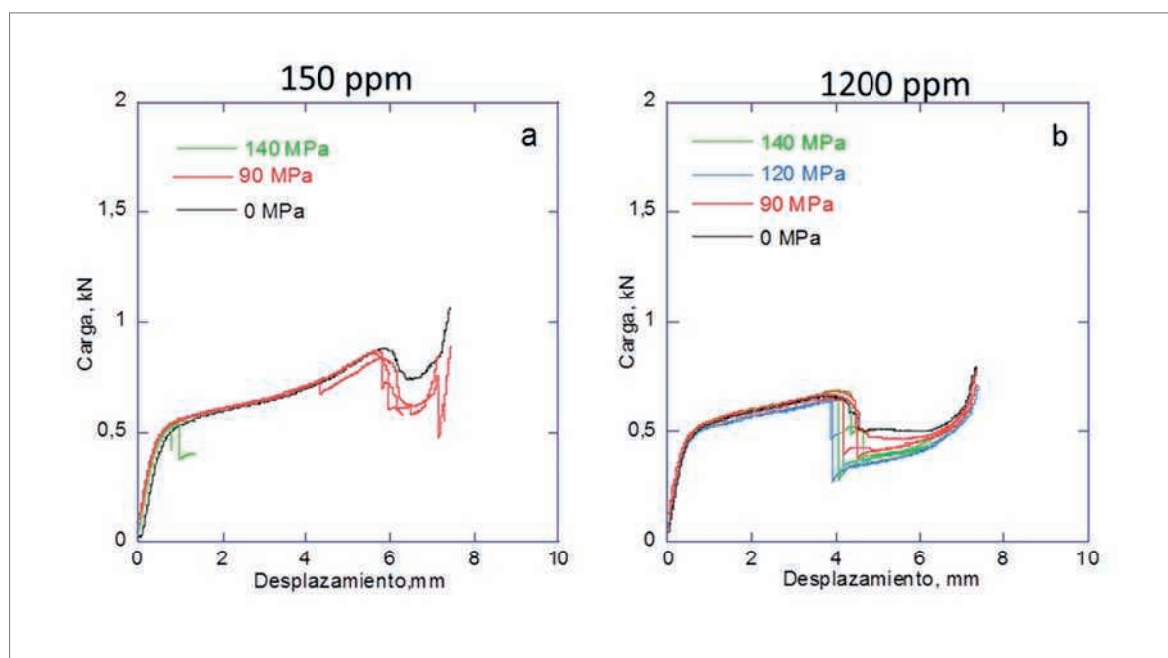


Figura 3 Curvas carga vs. desplazamiento de ensayos de compresión diametral a 135 °C para muestras con (a) 150 ppm y (b) 1200 ppm de hidrógeno sometidas a distintas tensiones de reorientación.

## Las principales desventajas que presenta el hecho de trabajar con material sin irradiar es que no se puede valorar el efecto fragilizador que provoca por sí misma la irradiación y que el hidrógeno debe ser introducido en las muestras de vainas mediante tratamientos químicos previos

plásticamente. Sin embargo, aquellas que rompen antes de superar dicho punto, han fragilizado, ya que no sufren deformación plástica durante el ensayo.

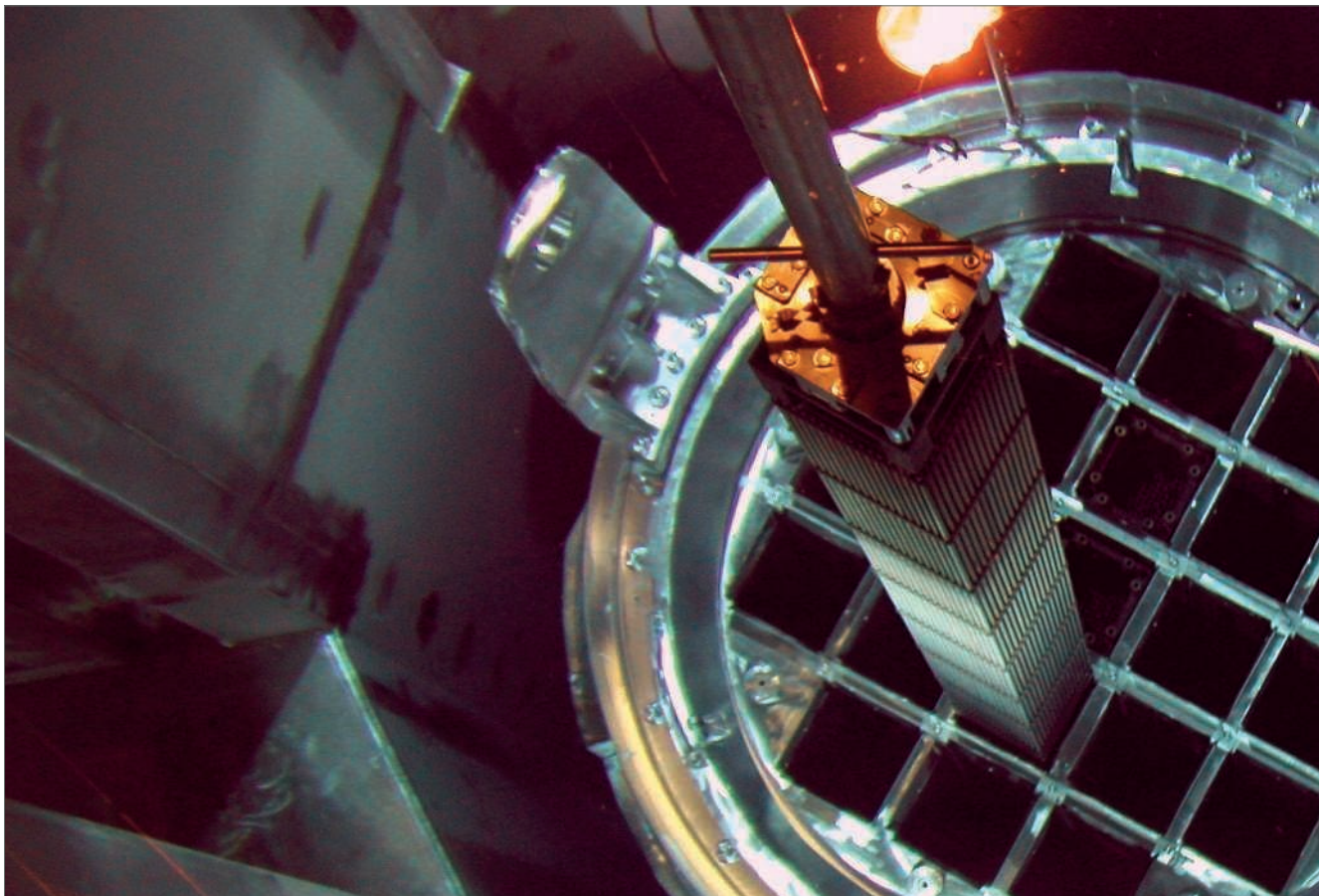
En la figura 3, se muestran las curvas carga vs. desplazamien-

to para ensayos de compresión diametral (realizados a 135 °C, temperatura representativa del transporte) de vaina de ZIRLO sin irradiar, hidruradas y sometidas a un tratamiento de reorientación. Las muestras contenían 150 ppm de hidrógeno,

curva a, y 1200 ppm de hidrógeno, curva b. La temperatura del tratamiento de reorientación fue en todos los casos 400 °C, mientras que se ensayaron muestras con distintas tensiones circunferenciales de reorientación (0, 90, 120 y 140 MPa).

### COMPORTAMIENTO DÚCTIL

Puede observarse que, en general, y a excepción de la muestra con 150 ppm de hidrógeno y 140 MPa de tensión circunferencial, todas las curvas presentan un comportamiento dúctil. Respecto al caso frágil (150 ppm y 140 MPa), cabe destacar que los 140 MPa de tensión circunferencial



Introducción de un elemento combustible.

están muy por encima de los 90 MPa admitidos para el combustible de bajo quemado. Para la misma tensión de reorientación (140 MPa), la muestra con 1200 ppm presenta un comportamiento dúctil. La razón radica en los motivos explicados sobre las características de los hidruros radiales de cada muestra.

Por tanto, de ello se extrae como conclusión que muestras con un menor grado de quemado (menor cantidad de hidrógeno absorbido) pueden tener un peor comportamiento que muestras con un grado de quemado mayor (mayor contenido de hidrógeno). Por el mismo motivo, para un quemado similar, se puede comportar

**Es importante destacar que, en todos los casos estudiados, las muestras sometidas a tensiones de 90 MPa e inferiores presentan un comportamiento dúctil. Por ello se concluye que la tensión circunferencial de 90 MPa que aparece en la normativa para impedir la fragilización es correcta**

peor una vaina de una aleación que absorba menos cantidad de hidrógeno que otra que absorba mayor cantidad.

También es muy importante destacar, como ya se ha mencionado, que la normativa no permite que en ningún caso se supere una tensión circunferencial de 90 MPa. En todos los casos estudiados las muestras sometidas a tensiones de 90 MPa e inferiores presentan un comportamiento dúctil. Por ello se concluye que los 90 MPa que aparecen en la normativa para impedir la fragilización son correctos.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] M.A. Martin Rengel "Integridad estructural de vainas de combustible nuclear en condiciones de almacenamiento temporal en seco". ENRESA, Publicación Técnica 05/2010.

[2] M.A. Martin Rengel, F.J. Gómez, J. Ruiz-Hervías, L. Caballero, A. Valiente "Revisiting the method to obtain the mechanical properties of the hydride fuel cladding in hoop direction" Journal of Nuclear Materials, 429, (2012) 276-283

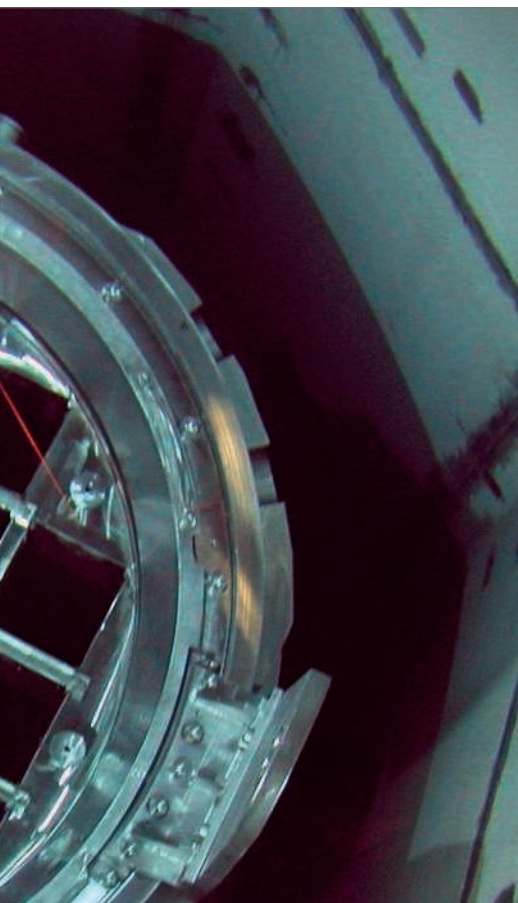
[3] M.A. Martin Rengel, F.J. Gomez, J. Ruiz-Hervías, L. Caballero "Determination of the hoop fracture properties of unirradiated hydrogen-charged nuclear fuel cladding from ring compression tests". Journal of Nuclear Materials, 436, (2013) 123-129

[4] F.J. Gómez, M.A. Martin Rengel, J. Ruiz-Hervías "A new procedure to calculate the constitutive equation of nuclear fuel cladding from ring compression tests". Prog. Nucl. Energy 97 (2017) 245-251

[5] M.C. Billone, T.A. Burtseva, Z. Han and Y.Y. Liu "Effects of Multiple Drying cycles on High-Burnup PWR cladding Alloys" FCRD-UFD-2014-000052. ANL-14/11

[6] M.C. Billone, T.A. Burtseva and M.A. Martin Rengel "Effects of lower drying-storage temperatures on the DBTT of High-Burnup PWR cladding" FCRD-UFD-2015-000008 ANL-15/21, August 28, 2015

[7] M.A. Martin Rengel, F.J. Gomez, J. Ruiz-Hervías, P. Munoz "Laboratory reproduction of different hydride morphologies in nuclear fuel cladding" LWR Fuel Performance Meeting (Top Fuel) 2013, Charlotte, N.C. ■



© Enresa



La información climática se transmite al interior de la cueva a través de un eficaz medio de transporte, el agua

## LOS ESPELEOTEMAS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los depósitos minerales de nuestras cuevas, como las estalagmitas, nos dan claves sobre los cambios climáticos y sus implicaciones ambientales a nivel global y regional. ¿Cómo es posible que esas rocas preserven señales climáticas de altísima resolución a pesar de haberse formado en ambientes muy aislados de la superficie?

Texto: **JAVIER MARTÍN-CHIVELET**

Fotos: **GRUPO ESPELEOLÓGICO EDELWEISS Y PROYECTO RECCE**

**E**l estudio de los cambios climáticos de épocas pasadas constituye una herramienta única para entender y contextualizar el cambio climático actual y su proyección futura. Para analizar esos cambios, incluyendo sus causas, pautas e impactos, es necesario contar con datos muy precisos. Lamentablemente, el registro instrumental del clima es muy limitado ya que cubre solo los últimos decenios, hasta un par de siglos las series más antiguas, y por ello es imperativa la búsqueda de *información paleoclimática*, es decir, la obtención de datos climáticos basados en indicadores indirectos o *proxies*.

Los indicadores que utiliza la *paleoclimatología* se encuentran en sedimentos, rocas sedimentarias, fósiles, anillos de árboles, formas relictas del relieve, documentos históricos y el hielo glaciar, entre otros registros. En conjunto conforman una inmensa base de datos paleoclimática que progresivamente se va descifrando e interpretando. Ese proceso conlleva dos aspectos básicos y complementarios: por un lado los indicadores deben aportar información fiable sobre variables climáticas, tales como la temperatura o la precipitación; por otro, deben ser susceptibles de datarse con precisión, es decir, situarlos de forma inequívoca en el tiempo.

En esa base de datos destacan los espeleotemas (del griego: depósito de cueva) que son los precipitados minerales que crecen en nuestros sistemas kársticos y admiramos en las cuevas turísticas, como las estalagmitas o las coladas. Estos depósitos, gracias a su finísima estratigrafía interna, con capas de crecimiento anual en muchos casos, y a que pueden ser datados radiométricamente mediante

series de uranio, compiten en definición temporal con los anillos de los árboles, los sedimentos varvados de los lagos, y las capas de acumulación anual en el hielo de Groenlandia y la Antártida. En cuanto a la información paleoclimática, estas formaciones minerales pueden registrar las condiciones climáticas y ambientales reinantes en el momento de su formación: la temperatura del exterior de la cueva, la pluviosidad, los patrones de precipitación, el tipo de vegetación y de suelos, o eventos naturales como incendios o inundaciones. Esa información climática queda registrada en la petrografía, la estratigrafía y la geoquímica de los espeleotemas, aunque su obtención dista mucho de ser sencilla. El proceso

conlleva pasos sucesivos que requieren de una aproximación interdisciplinar.

## INVESTIGANDO EL SISTEMA KÁRSTICO

El primer aspecto que debe considerarse es el lugar donde se va a realizar el estudio: la cavidad kárstica. Las cuevas son sistemas complejos desarrollados por la disolución de la roca carbonática (caliza, dolomía, mármol), que presentan un intercambio más o menos importante de energía y materia con el exterior. Para los estudios paleoclimáticos, las cavidades con cambios ambientales de carácter estacional son en general las menos adecuadas, ya que su



© M.A. Martín, GEE

En muchas cuevas karsticas se produce la formación de precipitados minerales que genéricamente se denominan espeleotemas, y que adornan la cavidad con morfologías muy diversas, siendo las estalactitas, las banderas, las coladas y las estalagmitas las más frecuentes. Estos precipitados se forman y crecen a partir del agua de percolación que entra en la cueva. El agua se filtra a través del suelo y el epikarst y termina saliendo a la cavidad, momento en el que se produce una desgasificación y la consiguiente sobresaturación en carbonato, que conduce finalmente a la formación del mineral. El flujo de agua a lo largo del tiempo produce el depósito de sucesivas capas de carbonato cálcico, que pueden registrar los cambios climáticos y ambientales que se producen en el exterior. Su estudio, por tanto, permite la reconstrucción de los climas del pasado y su variabilidad. Cueva de Kaité, Burgos.

dinámica puede ser muy compleja y hacer que, en la práctica, sea imposible la obtención de información paleoclimática precisa. Se buscan cuevas poco o nada ventiladas, con condiciones ambientales muy estables a lo largo del año en parámetros como la humedad relativa, la concentración de CO<sub>2</sub> o la temperatura. También es importante que no sufran inundaciones episódicas ni otras perturbaciones que modifiquen su ambiente físico-químico de forma significativa.

El lector se preguntará cómo, en una cueva muy aislada, pueden los espeleotemas registrar los cambios climáticos que ocurren en su exterior. La respuesta resulta sorprendente: la información climática se transmite al interior de la cueva a través de un eficaz medio de transporte, el agua. Los espeleotemas se forman en gran medida a partir del agua que percola en forma de goteo desde la superficie. Esa agua de goteo tiene unas características físico-químicas que dependen en primer lugar de la lluvia o la nieve y después su viaje desde superficie hasta la cueva, a través del suelo primero y del epikarst después.

El ejemplo más sencillo de esta transmisión de información climática lo encontramos en la cantidad de goteo que se produce en la cueva. Es fácil entender que en épocas húmedas, con más precipitación y recarga del epikarst, la cantidad de goteo será mayor, y lo contrario ocurrirá en épocas secas, donde el goteo puede llegar incluso a cesar. En este sentido, una estalagmita que crece bajo un punto de goteo reducirá su crecimiento hasta pararse si se dan condiciones climáticas de sequía prolongada. Si somos capaces de leer en la estalagmita esas reducciones y parones en el crecimiento, podremos reconstruir los periodos de sequía que ocurrieron durante su desarrollo.

Más complejo de entender es la transmisión de la información a través de la hidrogeoquímica: los isótopos del agua, los iones disueltos e incluso las partículas en suspensión reflejan las características del agua de precipitación (lluvia o nieve) más las pérdidas o ganancias que se producen en el viaje desde la atmósfera hasta la cueva. Entender estos procesos es clave para saber interpretar la química

del agua de goteo y, claro está, la química de los espeleotemas que se forman a partir de ella.

Para entender estos procesos es fundamental monitorizar las condiciones ambientales y la hidroquímica de la cueva en su conjunto, y modelizar su funcionamiento. El Grupo de Hidrogeoquímica del Departamento de Medioambiente del Ciemat lleva monitorizando cuevas desde hace más de una década. Según el químico Antonio Garralón y la geóloga María Jesús Turrero, investigadores de dicho Grupo, “se trata de desarrollar laboratorios de medida *in situ* que permitan entender las condiciones bajo las cuales se forman los espeleotemas y la información climática y ambiental que registran durante su crecimiento”, lo que entienden como “una parte fundamental del trabajo paleoclimático, pues conforma la base para la generación de funciones de transferencia que permiten convertir los datos geoquímicos de los espeleotemas en datos climáticos”. La monitorización debe durar al menos cuatro años, pero los investigadores indican que “periodos más largos son necesarios para entender la influencia de la variabilidad interanual en la cueva, por ejemplo, cómo se refleja un periodo de sequía, o un periodo especialmente cálido, en la cavidad”.

Una parte fundamental del trabajo de monitorización es estudiar los espeleotemas que crecen hoy en día. Mediante *trampas* de carbonato podemos recoger estacionalmente el mineral formado en puntos seleccionados y estudiar después en el laboratorio su composición, hábito, etc., además de conocer las tasas de formación mineral y su variación estacional. Con ello podemos certificar que el



Los trabajos de monitorización hidroquímica y ambiental en cuevas son claves para modelizar el sistema kárstico y para entender y calibrar los registros paleoclimáticos que se obtengan en él.

espeleotema que está creciendo registra realmente los cambios que ocurren en el exterior en sus propiedades y que, por tanto, los espeleotemas antiguos de esa cueva pueden tener el potencial para la reconstrucción paleoclimática.

Las cuevas que se estudian pueden ser turísticas o no. Si lo son, tienen la ventaja de contar con acometida eléctrica y vigilancia, lo que facilita las instalaciones necesarias, aunque la desventaja de estudiar un sistema muy antropizado, es que las visitas masivas y la infraestructura que precisan modifican la temperatura, la humedad relativa y la composición del aire, y la luz artificial favorece el crecimiento de microorganismos. Lo ideal es estudiar cuevas “vírgenes”, aunque ello conlleva notables esfuerzos adicionales. En esta labor es fundamental la colaboración de especialistas en la exploración espeleológica, ya que su conocimiento e infraestructura hacen posible una tarea que de otra forma sería demasiado costosa y arriesgada. Un excelente ejemplo es el Grupo Espeleológico Edelweiss, uno de los más veteranos y experimentados de España, que viene colaborando en proyectos paleoclimáticos desde hace quince años. Miguel A. Martín Merino, su presidente, aclara que “las asociaciones científicas de espeleología deben tener, más allá de su cometido de exploración y conservación, el compromiso de colaborar activamente con las líneas de investigación que puedan desarrollarse en el entorno kárstico. Nuestro grupo ha defendido desde los años 70 la protección de cavidades, muchas de las cuales son hoy parte del Patrimonio Cultural y Medioambiental, y ha colaborado en la selección de cavidades idóneas para la investigación”.

### SELECCIONANDO LOS REGISTROS

El siguiente paso es también crítico. Se trata de recoger las muestras de espeleotema que van a ser estudiadas. ¿Cuál es la muestra ideal? ¿Cómo se sabe su edad aproximada? ¿Es probable que no haya sufrido procesos de transformación posterior (diagénesis) que enmascaren la señal paleoclimática? Desgraciadamente no tenemos respuestas inequívocas, aunque sí criterios que, al menos, nos permiten desechar *a priori* algunos espeleotemas. Los paleoclimatólogos utilizan normalmente coladas o estalagmitas, y rara vez estalactitas, banderas u otros espeleotemas, que crecen en el techo o las paredes. La razón es que el segundo grupo presenta una estratigrafía interna mucho más compleja y discontinua, lo que plantea serias dificultades para construir series temporales. Pero incluso dentro de las estalagmitas y las coladas tenemos una enorme variabilidad, que se traduce en que, antes de cortar la muestra en el laboratorio, resulte difícil reconocer su complejidad estratigráfica interna.

Esta dificultad se ve amplificada por el hecho de que el material espeleotémico a muestrear es limitado, y normalmente considerado como parte del patrimonio natural. Extraer muestras sin los oportunos permisos puede constituir un delito, y por ello se debe trabajar siempre con la autorización correspondiente, aún para extraer pequeñas cantidades de muestra. Consuelo Temiño, Directora-Conservadora del Monumento Natural de Ojo Guareña, espacio protegido que incluye el complejo kárstico más extenso de la Península Ibérica, en la provincia de Burgos, nos



Sección longitudinal de una estalagmita en la que se aprecia su estratigrafía interna. Este tipo de muestra se usa para la reconstrucción de series de parámetros climáticos a partir de la identificación, a lo largo del eje de crecimiento, de cambios composicionales o texturales relacionados con los cambios climáticos. Esta estalagmita está expuesta en el Centro de Visitantes del Monumento Natural de Ojo Guareña (Burgos)

confirma que “la obligación de las administraciones es facilitar y colaborar con las investigaciones científicas, si bien el compromiso del científico debe ser generar la mínima perturbación ambiental y contribuir a la protección y difusión del patrimonio”. En el caso de los espeleotemas aclara que “lo adecuado es trabajar con fragmentos rotos y caídos cuya reubicación en la cueva resulte imposible o poco conveniente”.

### RECONSTRUYENDO EL CLIMA

El análisis de los espeleotemas recolectados pasa por distintas fases. La primera es el estudio, a partir de

secciones longitudinales y láminas delgadas, de su microestratigrafía. La metodología podría compararse con la de un geólogo en el campo, pero a pequeña escala: reconocer y caracterizar las posibles discontinuidades estratigráficas, las zonas con alteración diagenética, los paquetes de estratos definidos por tendencias estratigráficas, las capas individuales, y las diferentes fábricas petrográficas, definidas por el crecimiento de los cristales que conforman el carbonato. Este estu-

dio ya aporta información genética y ambiental, ya que nos habla de las fases de crecimiento y de los hiatos, de las alteraciones que el espeleotema sufrió en la cueva, y de las condiciones físico-químicas bajo las que precipita el carbonato y sus variaciones. Este trabajo microestratigráfico es la base fundamental sobre la cual plantear los análisis geoquímicos orientados ya sea a la datación de las capas del espeleotema, o a la obtención de indicadores paleoclimáticos.

La datación radiométrica suele basarse en series de uranio. En concreto la relación torio-230/uranio-234 resulta extraordinariamente resolutoria, y permite datar espeleotemas de hace unos pocos siglos hasta unos 600.000 años. El principio es sencillo, pues en condiciones ideales, el torio, que no es soluble y no está presente en el agua de goteo, no llega al espeleotema, mientras que el uranio sí que es soluble y llega a incorporarse en el precipitado mineral. La desintegración radiactiva del uranio-234 atrapado en el carbonato conduce a la formación progresiva de torio-230, conformando la relación entre estos isótopos un potente reloj radiométrico. Como la cantidad de estos isótopos en el espeleotema es minúscula (en partes por billón) el método analítico es complejo y delicado: se trata de extraer, mediante digestión química, el uranio y el torio de micromuestras de unos 50-100miligramos, que luego se mide en espectrómetros de masas en laboratorios especializados.

Entre los indicadores de tipo geoquímico destacan las relaciones de isótopos estables que encontramos en el carbonato cálcico, fundamentalmente las del oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y las del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ). En cuevas bien aisladas y con condiciones ambientales relativamente estables, el  $\delta^{18}\text{O}$  de cada capita del espeleotema depende del  $\delta^{18}\text{O}$  de agua de precipitación (lluvia o nieve) que ha recargado el epikarst, y esta depende de factores ambientales como la temperatura exterior o la cantidad de precipitación, si bien los procesos que ocurren en el suelo y en el epikarst pueden modificar esa señal meteorológica. El  $\delta^{13}\text{C}$  es aún más complejo de interpretar y sus variaciones en

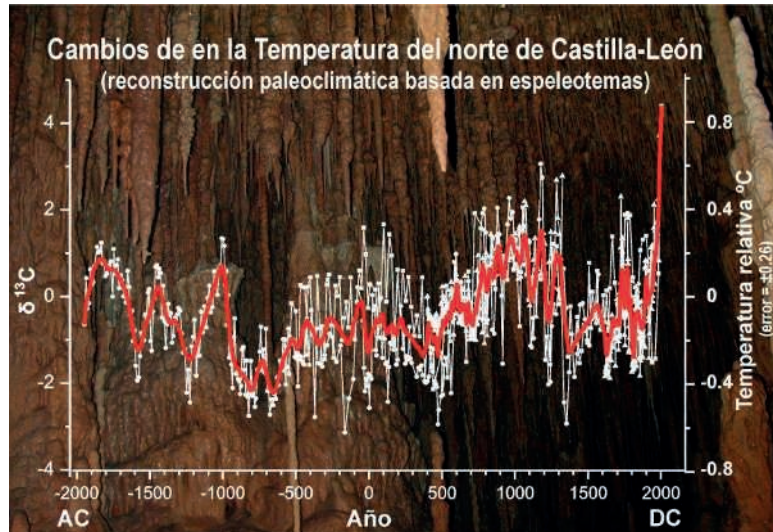


Diagrama de flujo de una investigación paleoclimática basada en espeleotemas, en la que se recogen en forma de "cajas" las principales tareas que conlleva, desde el estudio del clima actual hasta la obtención de series de variabilidad climática del pasado.

los espeleotemas suelen reflejar los cambios que se producen en el suelo y el epikarst, donde el intercambio isotópico puede ser muy intenso. Los cambios en la vegetación de superficie o en la interacción agua-roca determinan fuertes cambios en el  $\delta^{13}\text{C}$ , y estos pueden estar controlados por la temperatura de superficie, la pluviosidad y sus patrones, la evapotranspiración, o la ocurrencia de grandes incendios y la alteración humana.

En esta tarea de buscar indicadores paleoclimáticos también se utiliza la distribución de los elementos traza (que están en proporción inferior al 0,1%) a lo largo del espeleotema, porque puede reflejar cambios en variables climáticas. Un buen ejemplo nos lo aporta Juncal Cruz, geóloga de la Universidad Complutense que estudia los elementos traza en los espeleotemas de la cueva Kaite en el norte de Burgos: “En Kaite, las variaciones en el contenido en magnesio a lo largo del espeleotema son indicadores de una mayor o menor pluviosidad. En periodos de tiempo más secos la recarga del epikarst es menor y el agua, que permanece más tiempo en contacto con la roca antes de llegar a la cueva, se enriquece en este elemento”.

Una vuelta de tuerca más que evidencia el potencial de estos depósitos subterráneos es el estudio del agua atrapada dentro o entre los cristales de los espeleotemas en forma de poros micrométricos, que técnicamente reciben el nombre de *inclusiones fluidas*. Maialen López-Elorza, también geóloga, colabora con la Universidad de Innsbruck en esta línea frontera de la paleoclimatología y nos comenta que “se trata de bus-



Reconstrucción de las variaciones en las temperaturas del Norte de Castilla y León para los últimos 4000 años basada en espeleotemas procedentes de la Cueva Kaite (Burgos), Cueva del Cobre (Palencia) y Cueva Mayor (Burgos). Los resultados demuestran una considerable variación en las temperaturas, con una diferencia que alcanza 1,5 °C entre las etapas más frías y las más cálidas. En estos estudios, las temperaturas de la segunda mitad del siglo XX aparecen como las más altas en los cuatro milenios, aunque una prolongada y prominente etapa cálida medieval queda muy bien perfilada entre el siglo VII y el siglo XIII, con máximos en los siglos X y XII. Así mismo, destacan los episodios fríos de los siglos IV y V, y de los siglos XV al XIX. Estos estudios permiten una mejor caracterización de los patrones climáticos peninsulares y su variabilidad en escalas temporales de décadas a milenios. La integración de las series en un marco geográficamente más amplio permite analizar, además, el impacto local de los cambios climáticos a gran escala. [Modificado de Martín Chivelet et al., 2011. *Global and Planetary Change*].

car el *agua fósil* original a partir de la cual precipitó el carbonato, extraerla sin contaminación alguna, y luego analizar su composición química e isotópica con el fin de inferir parámetros climáticos como paleotemperaturas, o también ayudar a calibrar otros indicadores más tradicionales. El proceso es complejo y costoso, pero los resultados están siendo muy prometedores”.

### MIRANDO AL FUTURO

Las series temporales de variación paleoclimática como las construidas a partir de los espeleotemas constituyen la base para entender los cambios globales del pasado y también los impactos de esos cambios a nivel regional. En este sentido resulta de singular importancia entender cómo fueron los

cambios climáticos en nuestro entorno. Los informes recientes del IPCC ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)) y de otros paneles como la Red CLIVAR-España ([www.clivar.es](http://www.clivar.es)) identifican a la Península Ibérica como una zona de especial vulnerabilidad frente al cambio climático, con pronósticos de incremento de temperatura, cambios en los patrones de precipitaciones y aumento de los fenómenos extremos como sequías e inundaciones. Los elevados costes sociales y económicos asociados a estos pronósticos dictan la necesidad de implementar estrategias de adaptación adecuadas, siendo necesario entender los patrones de cambio en el clima en nuestro país y anticipar sus efectos. En esta tarea es fundamental adoptar una perspectiva amplia que proporcione un conocimiento detallado de la dinámica y variabilidad del clima y de sus impactos regionales. ■



MARÍA JOSÉ ALONSO, EXPERTA EN NANOTECNOLOGÍA FARMACÉUTICA Y CATEDRÁTICA DE FARMACIA Y TECNOLOGÍA FARMACÉUTICA EN LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

## **“SOY OPTIMISTA CON LA VACUNA CONTRA EL SIDA, SE ESTÁN INVIRTIENDO MUCHOS ESFUERZOS”**

Los fármacos requieren una forma adecuada para ser administrados. Con la nanotecnología se busca ir un paso más allá para que en esa acción resulte más fácil superar cualquier barrera biológica, como puede ser la piel, y que además con esa forma el medicamento sea lo más efectivo posible y lo menos tóxico para el sujeto que lo ingiera. Esta es la especialidad de María José Alonso, que ha sido coordinadora e investigadora principal de consorcios y proyectos corporativos con la Organización Mundial de la Salud, la Fundación Bill y Melinda Gates o la Comisión Europea.

Texto: **GERMÁN HESLES**

Fotos: **USC**

**N**acida en Carrizo de la Ribera (León) en 1958, Alonso ha sido recientemente elegida miembro de la National Academy of Medicine de Estados Unidos, uno de los mayores honores en los campos de la salud y la medicina. Un reconocimiento que a esta investigadora le supone, además de poder ampliar conocimientos, una mayor visibilidad para su grupo de investigación o para opinar sobre temas de gran trascendencia y, a su vez, conocer la opinión de otros sobre ellos.

### ¿Qué es lo que se conoce como tecnología farmacéutica?

Es aquella que permite dar a los fármacos la forma adecuada para su administración. Por ejemplo, cuando tomamos una cápsula o un jarabe de ese medicamento hay un principio activo, o fármaco, que es una molécula química concreta, y una serie de excipientes, materiales accesorios que acompañan al fármaco y que en algunos casos no tienen ninguna misión más allá de darle volumen. Tomarse un miligramo de ácido acetilsalicílico es más fácil con la presentación que todos conocemos y que nos permite cogerlo con la mano y meterlo en la boca para tragarlo. Es decir, es una cuestión de facilitar la administración, pero en otras ocasiones los ingredientes que van junto con el fármaco tienen misiones más importantes, como, por ejemplo, mantener el fármaco estable, que se absorba mejor, que llegue más rápidamente a la sangre.

### ¿Y qué es la nanotecnología farmacéutica?

Se trata de ir un paso más allá, dando al fármaco la forma necesaria para que sea lo más efectivo

y lo menos tóxico posible, pero no deja de ser un vehículo de administración de los fármacos.

### ¿Cómo se manejan esas nanoestructuras?

Todas las nanoestructuras están constituidas de biomateriales, de materiales que son biodegradables, biocompatibles, que no presentan problemas para la salud. Con frecuencia estamos hablando de aceites, lípidos y también polímeros. La composición de estas nanoestructuras viene determinada por el tipo del fármaco que han de transportar y por el tipo de barreras biológicas que han de superar. Una vez identificada la diana no es lo mismo que yo quiera llegar al humor vítreo ocular o que busque llegar al pulmón o al cerebro. Desde que se administra, el fármaco se encuentra con unas barreras biológicas que la nanoestructura, el nanotransportador, le va a ayudar a superar. Si el fármaco tiene problemas para atravesar la piel, se añade una sustancia

que sea un promotor de la penetración, que con frecuencia es un polímero o un aceite. También es importante la forma en que los acomodamos junto al fármaco: no se trata solo de juntar moléculas, se trata de que las moléculas del fármaco no se pierdan por el camino y que lleguen al lugar al que han de llegar y allí vayan liberándose a la velocidad que deben liberarse. Todo eso lleva implícito un diseño arquitectónico de cómo montamos una molécula encima de otra y encima de otra con una capa, con dos capas... Son nanoestructuras muy bien organizadas en su interior para que cumplan con su misión.

### Pero las nanopartículas cambian sus propiedades...

Desde el punto de vista de la interacción con el organismo es muy distinta una nanopartícula de una micropartícula. Una micropartícula difícilmente puede entrar dentro de una célula, a lo sumo puede entrar dentro de

## Desarrollando nanoestructuras

María José Alonso ha coordinado y coordina varios consorcios de investigación financiados por la Organización Mundial de la Salud, la Fundación Gates y la Comisión Europea. Su trabajo se centra en el desarrollo de nanoestructuras que sirven de vehículo para que los fármacos puedan llegar a su lugar de acción de un modo más seguro y directo, haciendo, incluso, diana intracelular. Esta labor ha sido reconocida con numerosos premios y ha permitido su aceptación como miembro de varias academias:

- Premio de Nuevas Tecnologías 'I Rey Jaume' (2011)
- 'Novoa Santos' Premio (2011)
- Medalla del Consejo General de Farmacia (2012)
- Mujeres 'Josefa Wonenburger' en Premio de Ciencias concedida por la Xunta de Galicia (2013)
- Premio 'Janot Marie Maurice', otorgado por la Sociedad Farmacéutica Europea (APGI) (2014)
- Miembro de la Academia gallega de Farmacia
- Miembro de la Real Academia Española de Farmacia
- Miembro de la Real Academia de Ciencias de Galicia
- Miembro de la Academia Nacional de Medicina de EE.UU.

## **Las patentes son fundamentales para rentabilizar un conocimiento en el que se han invertido millones de euros. Por tanto, no es lógico que después cualquiera pueda copiar el medicamento y obtener beneficio sin haber invertido nada**

un macrófago, pero una nanopartícula tiene una capacidad enorme para atravesar células. Si uno administra micropartículas por vía oral se quedarán adheridas en el moco y de ahí pasarán a las heces. Si son nanopartículas pueden atravesar la mucosa intestinal y llegar al epitelio intestinal.

### **Entonces ¿cómo sería la forma de administración de un medicamento ‘nanotecnológico’?**

Puede ser cualquier forma. Una vez que se tienen las nanopartículas –por ejemplo las destinadas a la administración oral–, se podría administrar como un líquido, pero no sería aceptable industrialmente porque lo que la industria quiere es un comprimido. Desecamos ese líquido, lo convertimos en un polvo, lo introducimos en una cápsula que cuando llega al intestino, tras el contacto con la humedad, se va a reconstituir. Con un inyectable no suele haber manipulación, se inyecta tal y como lo desarrollamos, aunque también hay inyectables que vienen en polvo y se le añade suero salino.

### **¿Cada fármaco necesita de una nanoestructura diferente?**

Una misma tecnología puede ser adaptada a diferentes fármacos, pero no se trata de cápsulas que

abro y lleno. Cada fármaco va a retener un nivel de especificación, porque hay una interacción muy íntima entre él y los biomateriales. Hay que ir adaptando uno a uno. El conocimiento de una tecnología permite identificar rápidamente lo que puede ser necesario para otro, pero cada fármaco requiere su nanopartícula.

### **Hay quien percibe a las grandes farmacéuticas como corporaciones poderosas y movidas únicamente por el ánimo de lucro.**

La gran industria farmacéutica es necesaria, invierte mucho dinero, y por eso hay pocas, pero muy poderosas. La inversión para el desarrollo de un nuevo medicamento es altísima. En España está Pharma Mar, que, siendo una empresa de tamaño medio, ha logrado el éxito con un solo medicamento. No es lo habitual y por eso solamente unas pocas empresas son capaces de llevar a cabo estos desarrollos y arriesgarse a hacerlo. Hay que partir de la base que la mayoría de los productos que investigan, desarrollan y que incluso alcanzan la fase clínica, no llegan al mercado. Sea como fuere, yo no tengo ninguna razón para denostar a las empresas farmacéuticas; nunca he visto comportamientos anómalos.

### **¿Por qué también hay en ocasiones polémicas respecto a las patentes farmacéuticas?**

Hay un gran prejuicio y se desconoce la realidad. Las patentes son fundamentales para rentabilizar un conocimiento en el que se han invertido millones de euros. Por tanto, no es lógico que después de esas grandísimas inversiones cualquiera pueda copiar el medicamento y obtener beneficio sin haber invertido nada. Otra cosa es que luego los medicamentos se vendan a un precio superior al de su producción, pero eso es algo que permiten los gobiernos y las aseguradoras. Aunque también hay justificación: el dinero que se gana con un solo medicamento les permite cubrir el desarrollo de esos otros cien medicamentos que quizá no llegaron al mercado. España forma parte de un grupo de países que respetan las normas internacionales sobre patentes y no hacerlo sería un error.

### **Cuenta con grandes reconocimientos... ¿hasta qué punto se traducen en ayudas económicas para la investigación?**

Que duda cabe que cuando uno es más visible, la posibilidad de captar recursos y de que te llamen las grandes farmacéuticas aumentan. Ahora bien, cuando uno solicita un proyecto de investigación, en concreto a una institución pública –que de ahí vienen la mayoría de nuestros fondos–, nos evalúan nuestros compañeros y lo que se valora es la propuesta. A mí, como a cualquiera, me rechazan proyectos continuamente. Y es que el margen de éxito en los proyectos europeos suele ser de un diez por ciento, pero a veces las propuestas tienen que ser excepcionales y, además, gustar a la comisión que las evalúa.

### ¿Cómo se coordina y se trabaja en un proyecto consorciado?

Trabajamos grupos de investigación, normalmente de diferentes países, con competencias complementarias. Por ejemplo, la UE financia consorcios en los que se busca que nos organicemos como si fuésemos centros de investigación virtuales explotando al máximo las competencias individuales. He coordinado un consorcio TRANS IT que tiene como objetivo evaluar el potencial de la nanotecnología para la administración oral de biomoléculas. Busqué nanotecnólogos, expertos en biología celular y toxicología, en química biológica, gente de la industria que nos ayudará a trasladar nuestro trabajo a la práctica y somos 16 centros trabajando. El consorcio es una estructura dirigida a establecer el máximo flujo de comunicación con el fin de aprovechar la capacidad de cada uno y progresar en conocimiento y desarrollo. Uno solo no puede desarrollar un medicamento.

### ¿Algún descubrimiento no se ha podido aplicar por falta de interés de la industria?

La Fundación Gates buscaba el desarrollo de vacunas no inyectables porque una de las causas más importantes de la diseminación del sida y de la hepatitis era la falta de higiene en países en vía de desarrollo en los que se llegaba a compartir jeringuillas. La vacuna de la hepatitis b es muy efectiva, y de lo que se trataba era de resolver ese problema. Desarrollamos una vacuna nasal, no inyectable, que funcionaba muy bien en ratones. Una vez vistos los resultados, se nos pidió una estimación del coste del producto y de su viabilidad en países en vías de desarrollo. La conclusión fue que no era viable a pesar de que era muy barato; dos o tres dólares por dosis. El problema es que la actual cuesta céntimos en la India. Las grandes compañías del sector no se interesaron porque era un problema exclusivo de un país no desarrollado. El propio

Bil Gates lo decía: “nos equivocamos eligiendo la vacuna de la hepatitis b que en los países desarrollados da igual que sea nasal o inyectable”. Y por eso empezamos a investigar para la del sida.

### Desde que se empezó a hablar de una vacuna contra el sida han pasado muchos años, ¿en qué punto se está?

Dar una fecha es imposible porque las vacunas que llegaron a fases clínicas avanzadas, al final, fallaron. Soy optimista con la vacuna contra el sida, se están invirtiendo muchos esfuerzos. Pero no es fácil. Ya no solo se trata de identificar el antígeno adecuado sino el adyuvante adecuado, el vehículo. La mayoría de las vacunas utiliza ahora como adyuvante sales de aluminio, que son las que provocan esa inflamación que suele aparecer tras la administración. Para la vacuna del sida se necesitan adyuvantes específicos que hasta ahora han fallado. Nosotros estamos trabajando en dos ideas muy innovadoras. Una con un equipo norteamericano que ha identificado nuevos potenciales antígenos: en lugar de una proteína antigénica, un cóctel de unos cuantos fragmentos de proteínas mezclados. Los mezclamos y los empaquetamos en nuestras nanopartículas. La otra aproximación, que la hacemos con el doctor Felipe García, del IDIBAPS de Barcelona, es con una secuencia de ARN, lo que sería una vacunación genética. Son estrategias muy distintas. Hasta ahora casi todas las vacunas que se probaron frente al SIDA eran vacunas proteicas, clásicas, y ahora hay otras aproximaciones que quizá puedan dar resultados. ■



Alonso ha coordinado el consorcio europeo TRANS IT para evaluar el potencial de la nanotecnología en la administración oral de biomoléculas.

Un grupo de investigadores, Anthropocene Working Group (AWG), reúne evidencias para definir una nueva época geológica

# ANTROPOCENO, EL TIEMPO GEOLÓGICO DE LOS HUMANOS

Una pieza de Lego, la anilla de un bote de refresco o un móvil tal vez sean los fósiles del futuro que los descendientes de los actuales humanos usen para estudiar el periodo del Cuaternario, que siguió al Holoceno, y al que se ha llamado Antropoceno. El Anthropocene Working Group ha recogido desde 2009 pruebas que evidencian que la interacción humana con los ecosistemas terrestres se refleja con la intensidad suficiente para establecer un nuevo periodo geológico con entidad propia para formar parte de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional.

Texto: **PABLO ALMERA**

En la playa de Tunelboca, en la ría de Bilbao, existe una franja de siete metros donde se han acumulado sedimentos que muestran el cambio geológico.



**E**n el año 2000, el Nobel de Química, Paul J. Crutzen acuñó el término Antropoceno con el fin de reflejar la intensidad de la modificación humana sobre los ecosistemas terrestres. La idea no era del todo original y ya se venían discutiendo en los foros científicos términos y fechas para limitar lo que se consideraba podía ser un cambio medioambiental global y sincrónico. En 2009, se creó el Grupo de Trabajo del Antropoceno (Anthropocene Working Group), dependiente de la Subcomisión sobre Estratigrafía del Cuaternario, con la misión de evaluar una posible nueva unidad dentro de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional, que sería denominada con el término, cada vez más extendido, de Antropoceno.

Meses después de su puesta en marcha, entró a formar parte del AWG Alejandro Cearreta, titular de Geología en el departamento de Estratigrafía y Paleontología de la facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del País Vasco. Sus trabajos en sedimentos recientes, en impacto humano en las zonas costeras y en las zonas estuarinas particularmente, le avalaron para formar parte de un equipo multidisciplinar integrado por 38 especialistas. “Soy especialista en micropaleontología, trabajo con microfósiles y lo hago en zonas costeras donde la transformación ambiental en los sedimentos más recientes permite verificar la importancia de la huella humana en los cambios que se están produciendo”, explica Cearreta. Y son precisamente los microfósiles –los restos fósiles de organismos que por su tamaño necesitan de una lupa o de un microscopio para su estudio– los que tienen el registro fósil más antiguo de nuestro planeta y los más abundantes.

## A FUTURO

El objetivo del AWG es novedoso: una disciplina que siempre había mirado al pasado, estudia el presente y, de alguna manera, intenta prever el futuro. Además, al estar basadas las investigaciones en los tiempos actuales y en las consecuencias de la acción humana, se abren toda una serie de ramificaciones políticas, sociales, ambientales y hasta filosóficas, pues, dependiendo de los resultados, habrá que determinar si se puede o debe intensificar la actividad humana transformadora o frenarla; es decir, habrá que tomar decisiones respecto al impacto humano en el planeta. Las cifras se interpretarán también desde la ética y la moral.

Y es que, como señala Cearreta, el antropoceno se está generando sobre todo con lo que ocurrió hace varias decenas de años, pero también con lo que ocurre en el presente y lo que ello supondrá en el futuro: “Los sedimentos que se están formando tienen continuidad e incluso se incrementarán en su energía; por primera vez nos interrogamos sobre cómo será el planeta en el futuro, cómo serán los procesos geológicos y qué consecuencias tendrán... es un desafío novedoso, sobre todo, para los geólogos”.

Es un trabajo lento para tratar de certificar un cambio tan rápido como es el que se supone que la humanidad está provocando. La misión es reunir pruebas, ahondar en los estudios y presentarlos a la Comisión Estratigráfica Internacional para que decida si el antropoceno es una época geológica o una fase cultural de la evolución humana, como pueden ser el paleolítico o el mesolítico.

A la pregunta de si sería posible y cuánto tiempo sería necesario para que un móvil fosilizara, Cear-

reta asegura que depende de dos factores: “De dónde se deposite el móvil, que puede ser destruido o reciclado por el sistema de recogida, reciclaje y reutilización y así no llegará a sedimento, y de la durabilidad de los materiales que componen ese móvil, pues ahora mismo se trabaja con diferentes tipos de plásticos, de metales que no sabemos si van a durar cientos, miles o millones de años en el registro sedimentario”.

No obstante, en las rocas de playa puede darse una sedimentación más rápida y ya hay plásticos que se preservan cementados en estas rocas, pero son rocas que tienen pocas decenas o centenas de años. ¿Qué es lo que ocurrirá dentro de miles de años con esos materiales? Por ahora, solo se puede especular, pues son tan nuevos en su creación que no hay experiencia de durabilidad. Algunos, seguro, se preservarán. Tal vez los móviles, las botellas, las muñecas o los clips, los cedés, los bolígrafos... son materiales que se producen en cientos de millones de unidades y que se distribuyen por todo el planeta. Potencialmente, esos materiales se pueden convertir en lo que ya se denominan tecnofósiles: fósiles que no son producto de la evolución biológica sino de la evolución tecnológica de la especie humana.

El AWG trabaja, reporta informes y acata las directrices de las comisiones del Cuaternario, la Comisión Internacional de Estratigrafía y la Unión Internacional de Ciencias Geológicas. En 2016, se presentaron una serie de conclusiones preliminares en el XXXV Congreso Internacional de Geología celebrado en Sudáfrica. Y a la AWG se le encomendaron otra serie de tareas, como encontrar el estratotipo, el clavo dorado, el lugar del planeta en el que se definiría de forma más clara y contundente

## Si los datos que está recabando el grupo de especialistas fueran, al final, concluyentes y aceptados, el holoceno habría finalizado a mediados del siglo XX dando comienzo el antropoceno

las características de este tiempo geológico. Una vez ya se localice ese estratotipo ideal –el patrón o modelo a seguir para reconocer y diferenciar el límite entre dos periodos geológicos– se elevará a la comisión pertinente.

### DÓNDE SE ESTÁ

El antropoceno se ha convertido en más mediático que cualquier otro tiempo geológico y parece que hay cierta prisa por definirlo y establecer si es formalmente aceptado o no, pero hay que ir aportando evidencias y se terminará por aceptar o por descartar formalmente. Hasta ahora, lo único que se sabe con certeza es que en la Tabla Estratigráfica Internacional solo aparece el holoceno, definido como el último periodo interglaciar desde el último cambio climático natural hace 11.700 años, que proporcionó una estabilidad climática que permitió la evolución cultural de la especie, no exenta de repercusión sobre su entorno y que cobró ámbito planetario a mediados del pasado siglo XX. El AWG propone el antropoceno, por ahora, como época que se sumaría al holoceno y al pleistoceno, dentro del periodo cuaternario y la era cenozoica. Si los datos, al final, fueran concluyentes y aceptados, el holoceno habría finalizado a mediados del siglo XX dando comienzo el antropoceno.

Con más de la mitad de la población mundial viviendo en ciudades interconectadas tecnológicamente, se ha llegado a un extremo en el que los productos y materiales que genera la tecnología humana, la tecnósfera, aparecen de modo prácticamente instantáneo en todo el planeta. Un nuevo modelo de móvil se vende en todas las tiendas de la marca de todo el mundo y, además, se agota ese mismo día. Si a esto se suma los fines de ciclo de estos productos, el investigador de campo obtiene un indicador geológico muy preciso.

En la actualidad, ya se puede hacer una estratigrafía de los teléfonos móviles en los vertederos, en los sedimentos, y eso también pasa con los diferentes tipos de plásticos inventados en los últimos 60 o 70 años, las piezas de Lego, los cd o las botellas de refrescos. Pero eso no basta para definir un tiempo geológico.

### LA GRAN ACELERACIÓN

La gran aceleración nació como concepto socioeconómico con indicadores como el producto interior bruto, la población, el consumo de energía o de agua, entre otros, para representar la actividad humana. Los gráficos que surgieron al unir todos esos datos coincidían señalando la década de los 50 del siglo XX como la de la gran aceleración,

la del crecimiento exponencial del consumo. Paralelamente, se producían una serie de respuestas ambientales: incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, del metano, la destrucción de ecosistemas y extinción de especies. La idea de la gran aceleración coincidía con los registros geológicos que estudia el AWG para definir el antropoceno.

Al estudiar exclusivamente la señal geológica de los procesos humanos es necesario encontrar una sincronía y una afectación planetaria, y sí, se ha detectado un paralelismo entre el proceso cultural humano y el geológico. Con el impacto meteórico en el Yucatán se dio por finalizada la era mesozoica y dio comienzo la cenozoica. Hubo una extinción de organismos muy importantes y paleontológicamente hablando se pasó de un dominio de los reptiles a un dominio de los mamíferos. Sin ese impacto, quizá no habría aparecido la especie humana.

La geología se construye día a día y ahora mismo se están depositando los estratos del futuro, pero se pueden analizar, entender los procesos que se están produciendo e incluso tener un registro instrumental y cuantitativo. Hoy se sabe, por ejemplo, que se produce tanto plástico al año como biomasa humana existe. Asimismo, se sabe que la sexta extinción masiva está en marcha, bien porque las especies se han ido eliminando por ser ‘dañinas’ para el hombre, bien porque se han destruido sus ecosistemas. Sea como fuere, el ritmo de desaparición de especies supera al de la extinción natural.

### 1945 VS 1952

La gran aceleración es sincrónica y global y de una intensidad y

extensión suficiente como para justificar el cambio que da pie a un nuevo tiempo geológico. Falta por determinar una fecha concreta de inicio, que siempre va a depender de la cantidad de evidencias que definan mejor al antropoceno. La más importante son los isótopos radioactivos producidos por las explosiones nucleares en la atmósfera. La primera explosión nuclear en 1945, la de la bomba Trinity en el desierto de Álamo Gordo en Nuevo México, y luego las de Hiroshima y de Nagasaki, dieron lugar a las casi 500 pruebas atómicas que no cesaron hasta 1963, con la firma del tratado que prohibió los ensayos en la atmósfera.

Esas 500 explosiones atómicas fueron generando nuevos isótopos radioactivos, como el cesio 137, que era desconocido en el planeta, e incrementó la cantidad de otros isótopos que eran minoritarios, como el estroncio 90 o el plutonio 239. Esa liberación de isótopos en la atmósfera se transportó por las corrientes atmosféricas de mane-

ra global y hoy en día esos isótopos están tanto en los polos, como en el ecuador o en latitudes medias.

Para la AWG no es fácil decantarse: históricamente la señal isotópica empieza en 1945, pero no empieza a ser registrable en los sedimentos hasta 1952. Hay un lapso de siete años entre la primera explosión y la primera señal registrada en los sedimentos. Si el Grupo de Trabajo del Antropoceno aceptase las evidencias estrictamente geológicas, la fecha elegida sería el año 1952, pero si, se añade la información histórica, sería el 16 de julio de 1945.

### AÚN HAY MÁS FACTORES

No obstante, además de los isótopos radioactivos, para definir el antropoceno los geólogos cuentan con los plásticos, que son ubicuos y ya se encuentran en los fondos más profundos de los océanos. También con el incremento de elementos químicos, que son considerados contaminantes –como

el plomo, el cadmio o el mercurio–, que no son artificiales, pero que sí aparecen en lugares y en cantidades que no son naturales. Asimismo, con el incremento de los gases de efecto invernadero, aunque estos se registran en las burbujas de aire de las acumulaciones de hielo y no en los sedimentos rocosos. Con la ya citada la desaparición de especies y el empobrecimiento de la señal de especies vegetales provocada por los monocultivos extensivos. Y también con el cambio climático que se está produciendo, y que geológicamente es valorable: el ascenso del nivel del mar está modificando los sedimentos, erosionando unos materiales y desplazándolos al interior del continente.

Queda trabajo por hacer, pero el antropoceno, dada la cantidad de estudios y del trabajo de la AWG, cuenta con grandes posibilidades de convertirse en un nuevo tiempo geológico y con un gran protagonista, para lo positivo y para lo negativo: el hombre. ■



Vista de la playa cementada en los acantilados de Getxo originada con la escoria industrial transportada por las corrientes.



El ADN más antiguo de la humanidad encontrado en el yacimiento de Atapuerca.

El análisis del ADN de restos arqueológicos permite comprender cómo el ser humano y los animales han ido transformándose

## LA PALEOGENÉTICA Y SUS TRES LETRAS PARA CONOCER EL ÁRBOL EVOLUTIVO

Trabajar con el ADN de restos del pasado ofrece aportaciones fundamentales para el conocimiento evolutivo de los habitantes del planeta. A partir de la comparación genética de la población antigua y de la moderna, se puede determinar las relaciones entre antecesor/descendiente y, así, determinar el origen de las poblaciones actuales. Aunque en muchos de los casos no resulta posible, debido a las malas condiciones del ADN recuperado de restos humanos o de animales antiguos, existen nuevas técnicas que están permitiendo grandes resultados.

Texto: **PURA C. ROY**

**L**os investigadores pueden abrir ventanas al pasado con el análisis del ADN antiguo, el ADN recuperado de especies humanas y animales desaparecidas, ya que suministra información directa para reconstruir el árbol evolutivo.

“Actualmente se suele utilizar más el término de ‘paleogenética’, que consiste en la recuperación y análisis de fragmentos de ADN de restos del pasado, también llamado ADN antiguo. Estos restos pueden tener diferentes orígenes (hueso, diente, tejido momificado, cabello, piel, heces fosilizadas, sarro...) y pertenecer a diferentes especies (animales, vegetales y microorganismos). En los últimos años se ha producido un avance importante, que ha dado lugar a un nuevo enfoque en el estudio del ADN antiguo, lo que se conoce como ‘paleogenómica’, que consiste en la recuperación y análisis de genomas completos de individuos del pasado”, explican las investigadoras Concepción de la Rúa y Montserrat Hervella, del Departamento de Genética, Antropología Física y Fisiología Animal de la Universidad del País Vasco. Su grupo, denominado Biología Evolutiva Humana, desarrolla su trabajo en varias líneas de investigación, una de las cuales se ha centrado en el estudio genético de los humanos del pasado mediante la extracción de ADN de restos humanos de procedencia arqueológica y su análisis mediante técnicas de paleogenética y paleogenómica.

## NUEVOS DATOS

La integración de datos genómicos, paleoclimáticos y culturales permite reconstruir la interacción entre la biología y cultura, lo que

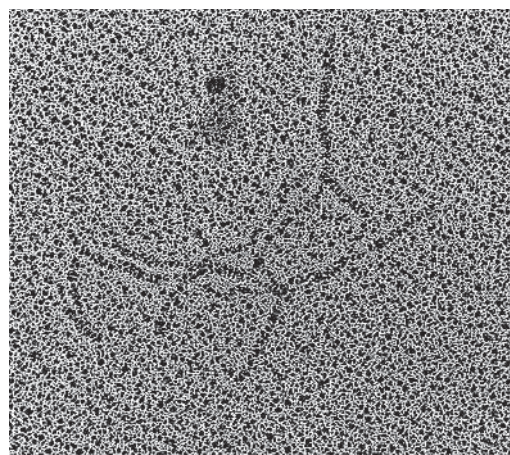
es fundamental para comprender cómo hemos llegado a ser lo que somos. Nuestros genes conservan la memoria de la interacción con estas especies humanas arcaicas. Gracias a los avances de la paleogenómica, hoy en día se puede recuperar parte del genoma de dichas especies humanas arcaicas, facilitando la reconstrucción de la historia humana, que sigue dando muchas sorpresas. Así ocurrió cuando los paleontólogos de Atapuerca y los máximos expertos mundiales en ADN antiguo de Alemania lograron obtener ADN de un fósil humano del yacimiento de la Sima de Los Huesos, de hace 400.000 años (Pleistoceno Medio), y obtener la secuencia casi completa de sus genes, resultados que fueron publicados en la revista *Nature*.

Se trata del ADN mitocondrial, un orgánulo de la célula que se hereda solo por vía materna con un único cromosoma. Su estudio ha proporcionado una gran sorpresa a los investigadores, porque, al compararlo con los genomas de humanos modernos, neandertales, chimpancés y bonobos, han descubierto que los individuos de la sima están emparentados, no con los neandertales, como esperaban por los rasgos que comparten, sino con una población de los montes Altai, en Siberia, de hace unos 40.000 años, los denisovanos, de los que se han encontrado muy pocos fósiles.

Tan desconcertante fue el resultado, que los investigadores se plantearon varias hipótesis para explicar esta relación genética tan distantes, los humanos de la

sima y los denisova. Para los investigadores, Juan Luis Arsuaga, codirector de Atapuerca, y Svante Pääbo, director del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, entre otros, la más plausible es que los hombres de la sima pueden estar relacionados con los ancestros comunes de denisovanos y neandertales, pero habría que explicar la semejanza del genoma mitocondrial con los primeros y no con los segundos. Este resultado ha sido posible al aplicar una nueva técnica de secuenciación del ADN desarrollada por Matthias Meyer en el prestigioso laboratorio de Pääbo, que ha logrado obtener, entre otros, el genoma del neandertal y de los individuos de Denisova. Este logro supone retrasar la más antigua secuencia genética humana que se tenía en más de 200.000 años, señalaban los científicos en la revista *Nature*. Hasta ahora solo se había secuenciado ADN tan antiguo en animales, en concreto, de un caballo de hace 700.000 años, conservado en permafrost en Canadá.

Los primeros trabajos sobre el ADN antiguo se publicaron a mediados de la década de los 80, pero las aportaciones de mayor peso se realizaron una vez desarrollada la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). Es el caso de



Reticulado extraído del hígado del sacerdote egipcio Ankh-Nekht.

© Svante Pääbo, Max Planck Institute.

## Información hasta en los dientes

Recientemente, también la revista Nature se hacía eco de la primera investigación que aporta pruebas genéticas sobre la complejidad del comportamiento de los neandertales. Al analizar el ADN antiguo conservado en la placa dental de dos individuos del yacimiento europeo de Spy (Bélgica) y otros dos de El Sidrón (España), de 42.000 y 50.000 años de antigüedad, respectivamente, se ha podido comprobar sus diferencias en la alimentación. “La placa dental conserva los microorganismos que vivieron en la boca, patógenos del aparato respiratorio y digestivo, y partículas de comida en los dientes, con ADN que se ha preservado durante miles de años. El análisis genético de este ADN representa una ventana única a la forma de vida neandertal y revela nuevos detalles sobre lo que comieron, cómo era su salud y cómo impactó el entorno en su comportamiento”, explicaba Laura Weyrich, investigadora de la Universidad de Adelaida que ha liderado el estudio.

los análisis realizados a partir de una hoja fósil de magnolio de entre 17 y 20 millones de años, del fósil de un dinosaurio de 80 millones de años, o de los fósiles más antiguos que hoy por hoy se han analizado, y que corresponden a insectos conservados en ámbar, de entre 120 y 135 millones de años.

En esa década de los 80, el principal objetivo consistía en determinar la mayor antigüedad de los fósiles de los que se podía extraer

ADN, pero enseguida quedaron de manifiesto los problemas originados por la degradación y contaminación con ADN moderno. Desde ese momento, las investigaciones del ADN han estado envueltas de un halo de incredulidad, aunque, gracias a la implantación de unos severos criterios de autenticidad y al éxito alcanzado por los análisis genéticos de animales recientemente extinguidos, el ámbito del ADN ha vuelto a recuperar el prestigio perdido.

Las principales características del ADN antiguo son dos: la primera es que se encuentra fragmentado, por lo que resulta imposible recuperar fragmentos de ADN >100 pares de bases de longitud, y, en segundo lugar, que la secuencia de ADN está modificada debido a las reacciones de oxidación e hidrólisis que se producen inmediatamente después de la muerte del organismo. Por tanto, se llama ADN antiguo a todo ADN que reúne estas dos peculiaridades. Así, dentro de esta segunda y más amplia definición, se puede incluir, asimismo, restos no muy antiguos, como el análisis de los restos de animales recientemente extinguidos, cuyos tejidos se conservan en los museos, la identificación de vestigios biológicos en Genética Forense o el análisis molecular de los animales en libertad, siempre y cuando se realice a partir del examen del ADN extraído de sus excrementos o cabellos hallados en su hábitat ecológico.

## RECUPERACIÓN

Pero, ¿cómo?, ¿con qué instrumentos y de dónde se obtiene el material genético de seres muertos hace miles y miles de años? “El ADN se extrae de los restos celulares recuperados de



El ADN se extrae de los restos celulares recuperados de los tejidos conservados de un organismo (óseo, dentario, epitelial...).

los tejidos conservados de un organismo (tejido óseo, dentario, epitelial...). El proceso de extracción del ADN comienza con la limpieza de las muestras para eliminar contaminantes superficiales, llevándose a cabo posteriormente la rotura de las células y la recuperación de las moléculas de ADN por medios químicos. Este ADN se purifica y se trata de forma diferente según utilicemos técnicas de paleogenética o paleogenómica”, explican de la Rúa y Hervella.



© Crédito de foto: CSIC.

Placa dental hallada en el yacimiento de El Sidrón (España), de cuyo ADN se ha podido comprobar la alimentación de los neandertales.

“La paleogenética consiste en el análisis de fragmentos cortos de una secuencia de ADN, normalmente degradada, que se copia miles de veces mediante un técnica denominada PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa), lo que permite obtener cantidad suficiente de ADN para su posterior secuenciación mediante un secuenciador automático. La paleogenómica se basa en la construcción de librerías que son fragmentos de ADN en los que se reparan los extremos dañados y se colocan unas etiquetas para llevar a cabo la secuenciación

de miles de fragmentos de ADN en un ultrasecuenciador. Estas secuencias son ordenadas para reconstruir el genoma del individuo, lo que requiere la utilización de potentes ordenadores para procesar todas las secuencias de ADN obtenidas, que suelen ocupar miles de gigabytes.

Esta nueva tecnología (paleogenómica) ha logrado superar las dificultades aparentemente insalvables asociadas a la deficiente preservación del material

genético y a la contaminación de muestras antiguas por ADN humano moderno. Son técnicas que requieren una infraestructura costosa y gran especialización analítica. El análisis del ADN antiguo se debe llevar a cabo en un laboratorio estéril especializado, específico para el análisis de ADN antiguo, donde no se puede trabajar con muestras actuales. Además, los investigadores deben utilizar una vestimenta adecuada y de un solo uso”, aclaran de la Rúa y Hervella.



© MNAT.

Investigadores paleogenéticos en el Museu Nacional Arqueològic de Tarragona.

## CONSERVACIÓN

La conservación del ADN tiene sus dificultades. El ADN antiguo se degrada en función del tiempo y de factores tafonómicos, principalmente los acontecidos en los primeros momentos del enterramiento (pH del suelo, humedad, temperatura,...). “La temperatura es un factor que condiciona la preservación del ADN. Las bajas temperaturas favorecen la preservación del material genético, ya que las reacciones bioquímicas que degradan el ADN se ralentizan. Por el contrario, las elevadas temperaturas tienen

## La humedad ejerce un efecto negativo en la conservación del ADN, ya que favorece las reacciones de hidrólisis y de oxidación y puede permitir la filtración de sustancias del sedimento a los restos

un efecto contrario. Sin embargo, también se ha observado en algunos casos –momias–, que la temperatura elevada a la que se ven sometidos algunos inhumados favorece la deshidratación parcial del ADN, impidiendo en parte los procesos de hidrólisis. Además, a esto le sumamos que la ausencia de oxígeno (que puede reaccionar con el ADN) favorece la conservación. La humedad ejerce un efecto negativo en la conservación del ADN, ya que favorece las reacciones de hidrólisis y de oxidación y puede permitir la filtración de sustancias del sedimento a los restos antiguos, las cuales pueden actuar como inhibidores en las reacciones que se realizan durante el análisis del ADN. El pH del sedimento en el que se encuentran enterrados los restos, si es ácido, acelera la degradación del ADN”, explican de la Rua y Hervella

El análisis del ADN de especies desaparecidas permite a los investigadores, en relación a las especies animales (por ejemplo, las antecesoras de las actuales de oso, caballo, avestruz...), el conocimiento de su genoma, que resulta de gran interés para re-

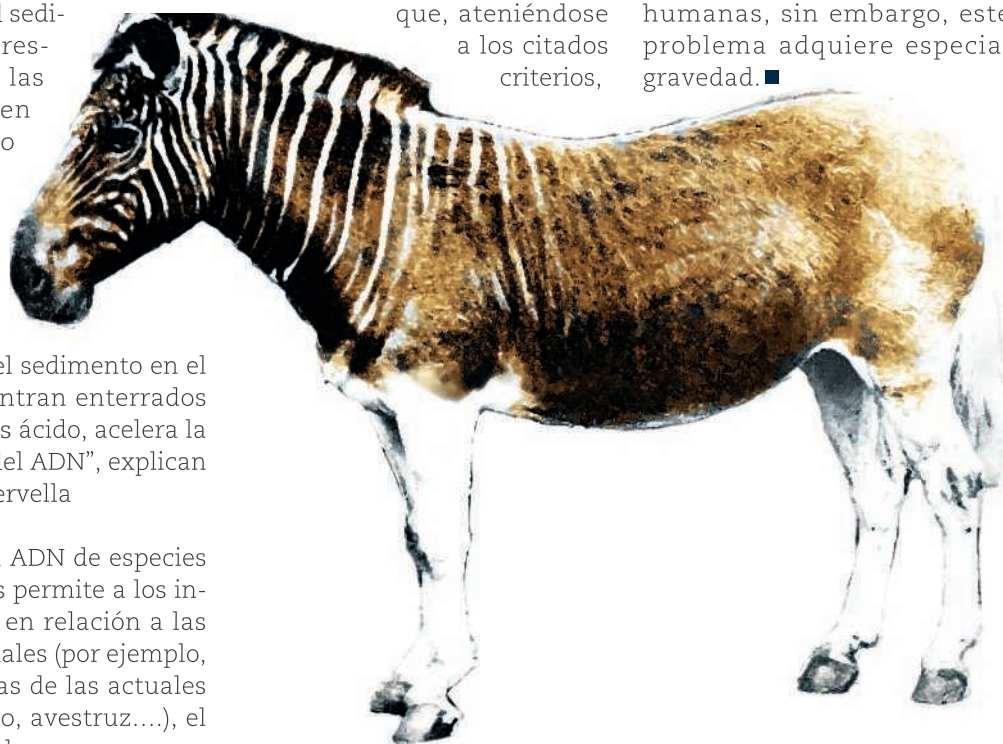
construir su evolución, ya que los cambios acontecidos en el patrimonio genético de una especie pueden utilizarse para enfocar políticas de conservación de especies amenazadas, las cuales suelen presentar una reducción de la diversidad genética (como parece que ocurrió en el caso de los neandertales).

En estos momentos se puede afirmar que el campo del ADN antiguo ha alcanzado la madurez. Ya no se trata de conocer todo el genoma de los organismos que existieron en el pasado, sino que, ateniéndose a los citados criterios,

ir definiendo objetivos científicos cada vez más concretos.

Los mayores éxitos científicos se han alcanzado en las investigaciones acerca de la historia evolutiva de animales extintos. Así, por ejemplo, ha sido posible determinar la relación existente entre el quagga, desaparecido hace 150 años, y la cebra, o entre el mamut y el elefante de la India, así como las relaciones filogenéticas del lobo marsupial de Australia o del oso de las cavernas de Eurasia.

El denominador común de todos estos estudios viene a ser que el investigador y las muestras analizadas pertenecen a especies diferentes, de modo que si en un momento dado las muestras llegaron a contaminarse con el ADN del investigador, no habría ningún problema para distinguir cuál pertenece a uno y cuál al otro. Al examinar muestras humanas, sin embargo, este problema adquiere especial gravedad. ■



© Frederick York/ Biodiversity Heritage Library.

Gracias al ADN antiguo se ha podido determinar la relación entre el desaparecido quagga y la cebra.

## HORNACHUELOS, DESDE LA PREHISTORIA HASTA LA EDAD CONTEMPORÁNEA

Sus primeros moradores fueron cazadores prehistóricos, más tarde llegarían los romanos y, tras la época musulmana, la Reconquista. A Hornachuelos también le tocaría vivir intensamente la desamortización eclesiástica, la II República y la llegada de la Democracia.

Pág 40

## REHABILITACIÓN DEL CASCO HISTÓRICO DE HORNACHUELOS



© Ayto Hornachuelos

El Ayuntamiento de Hornachuelos destinará cerca de un millón de euros en una serie de intervenciones en el casco antiguo de la localidad con el objeto de impulsar el turismo y desarrollo económico de la zona.

Pág 42

## FUENTE OBEJUNA PREMIADA POR SUS PATIOS



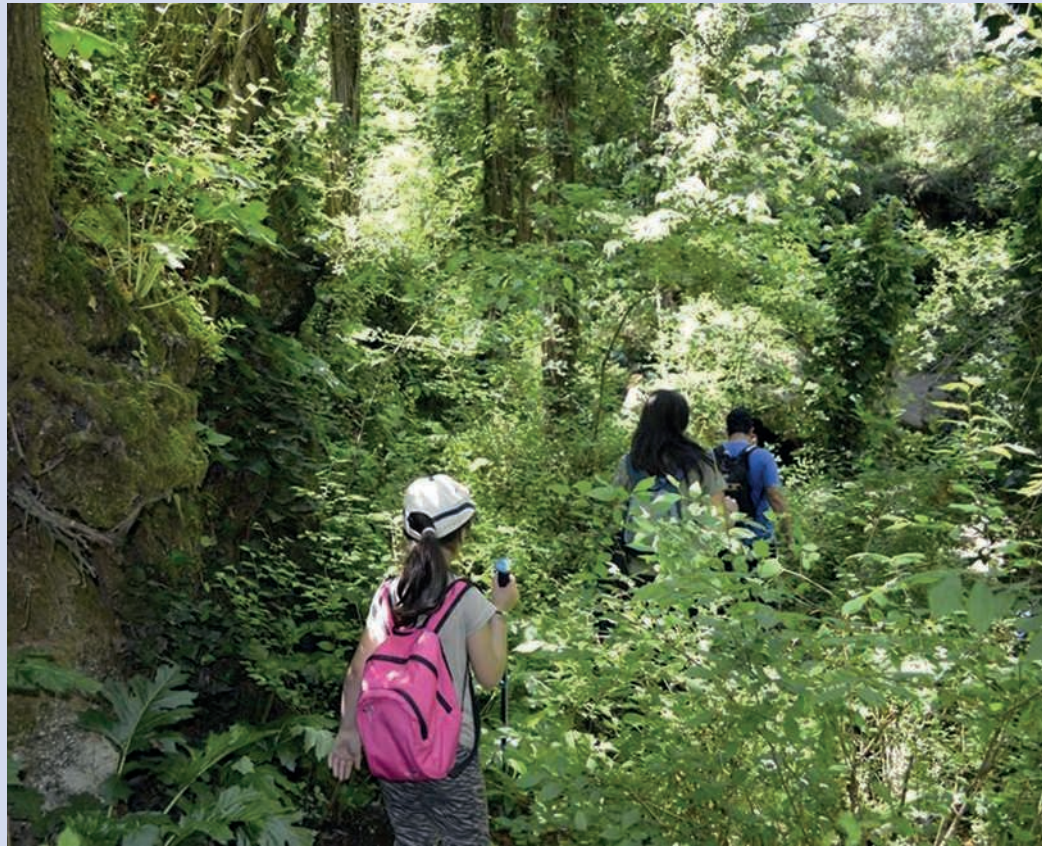
© Ayto Fuente Obejuna

La localidad de Fuente Obejuna ha recibido el tercer premio del II Concurso de Patios, Rincones y Rejas de la Provincia de Córdoba, certamen que busca poner en valor y promocionar uno de los patrimonios más significativos de Córdoba.

Pág 43

# SIERRA ALBARRANA

## El Cabril y su entorno



© Asoc. Nat. Alto Guadiato

## ACTIVIDADES PARA CONSERVAR Y DISFRUTAR DEL ALTO GUADIATO

Diversas asociaciones de carácter naturalista o cultural organizan con regularidad todo tipo de actividades para disfrutar con respeto del entorno natural del Alto Guadiato, la zona comprendida entre el río Guadiato-Bembézar -que rodea al Parque Sierra de Hornachuelos- y la del río Zújar: senderismo, fotografía, ornitología, educación medioambiental, micología, rutas nocturnas o de reforestación. Todas estas actividades están diseñadas para aprender y disfrutar a la vez de, y en entornos excepcionales en los que es posible caminar por uno de los bosques de ribera mejor conservados de la comarca.

Pág 38

DIVERSAS ASOCIACIONES ORGANIZAN ACTIVIDADES  
SOSTENIBLES EN PLENA NATURALEZA

## CONSERVAR Y DISFRUTAR EL ALTO GUADIATO

La zona del río Guadiato-Bembézar —que rodea al Parque Sierra de Hornachuelos— y la del río Zújar son las dos extensiones naturales que dentro del Alto Guadiato están definidas como Lugares de Interés Comunitarias (LIC). Paisajísticamente tienen gran importancia al contar con uno de los terrenos de bosque de ribera mejor conservados de la comarca y por su amplia y rica fauna y flora, entre las que destacan la cigüeña negra o el nenúfar blanco. Estos y otros lugares, y gracias a las actividades que llevan a cabo algunas organizaciones, hacen posible aprender y disfrutar a la vez de y en entornos excepcionales.

Texto: **BÁRBARA GORDO**

Momento de una jornada senderista por la Sierra del Castillo de Espiel.



El paisaje abrupto de la Sierra Morena cordobesa, con esas grandes masas de vegetación y líneas montañosas, son el campo de acción de colectivos como la Asociación Naturalista Alto Guadiato, la Asociación Camino Mozárabe por el Guadiato o el Club de Senderismo Saltamontes, que se dedican a organizar todo tipo de actividades para disfrutar con respeto del entorno natural del Alto Guadiato: senderismo, ornitología, educación medioambiental, micología, rutas nocturnas, reforestación...

Se han convertido ya en un 'clásico' y no pueden faltar los cursos de fotografía donde se enseña la metodología que hay que emplear en la imágenes de naturaleza. Instantáneas que luego se usan para mostrar y promocionar la riqueza natural de este entorno en las exposiciones itinerantes que posteriormente se organizan. Pero también propuestas más novedosas, como en la que se apadrina una caja-nido; una jornada para adultos y niños en las que se ofrece la posibilidad de apadrinar un nido para pájaros, pintándola y poniendo el nombre, para por último depositar en las copas de los árboles.

Otra de las iniciativas más originales es la *Salida orquídeas silvestres*, en la que, aparte de fotografiar este tipo de flora, se ofrecen nociones básicas para que cualquiera pueda saber dónde y cómo buscarlas, junto con explicaciones sobre sus géneros y especies, así como sobre los rasgos que permiten distinguir las de otras familias. Y para distinguir también están pensadas las jornadas micológicas, donde se estudian y fotografían variedades de hongos.

También las hay que, como es el caso de la *Ruta de las grullas*, son una ocasión única de ver especies de gran tamaño durante sus pa-

ses migratorios o que invernan en la zona. O, por otro lado, en las que disfrutar con mascotas domésticas de la Naturaleza. La ruta canina permite que el senderista esté acompañado por su perro –atado con correa– para disfrutar de rutas de más de diez kilómetros. Sin olvidar las clásicas, pero imprescindibles, rutas ornitológicas. En la conocida como *La Piruetanosa*, en el término municipal de La Granjuela, es posible adentrarse en observatorios de aves.

## SENDERISTAS

Las actividades diseñadas para el senderista son innumerables, cambiando destinos y tipos de paisajes. *La Aurora mozárabe* de Bélmez, por ejemplo, es una ruta de 22 kilómetros que va desde Villaharta hasta el Albergue de Espiel y que –entroncando con la Vía de la Plata– forma parte de la histórica ruta mozárabe a Santiago a su paso por el Guadiato. Camino en el que a veces es posible, desde el Cerro Apolinar, disfrutar de un bello mar de nubes. Destacan también las rutas nocturnas, como las que se llevan a cabo por Bélmez, para disfrutar de una caminata bajo un cielo estrellado y con la luz de la luna guiando los pasos de los participantes.

No podían faltar las jornadas de concienciación o educación medioambiental. Desde las que se organizan para la limpieza de entornos naturales, como las orillas del merendero del Embalse Sierra Boyera; hasta las pensadas para dejar constancia de las nidificaciones de aves invasoras y cómo están afectando al hábitat natural; pasando por los talleres medioambientales para niños de entre 6 y 12 años con actividades que les muestran cómo se anilla científicamente a las aves, se identifica las plantas y los minerales, o se observan cuerpos celestes.



Nenúfar blanco, cuyos hábitats son lagunas o ríos de cauce lento.

© Asoc. Naturalista Alto Guadiato.



Hongo fotografiado en una jornada micológica.

© Asoc. Naturalista Alto Guadiato.



Hay jornadas para ver cigüeñas, grullas...

© Asoc. Naturalista Alto Guadiato.



Tramo de la ruta mozárabe a Santiago.

© Junta de Andalucía

La organización de todas estas actividades muestra que es posible conservar, aprender y disfrutar de un entorno natural tan excepcional como el que ofrece a sus visitantes el Alto Guadiato. ■

## MÁS INFORMACIÓN

- [www.anaguadiato.es](http://www.anaguadiato.es)  
Asociación Naturalista Alto Guadiato
- [clubsenderismosalta montes.blogspot.com.es](http://clubsenderismosalta montes.blogspot.com.es)  
Club Senderismo Saltamontes
- [www.facebook.com/pages/Camino-Mozarabe-por-el-Guadiato](http://www.facebook.com/pages/Camino-Mozarabe-por-el-Guadiato)  
Asociación Camino Mozárabe por el Guadiato



Detalle del pilar y el arco del puente árabe en el camino que unía Córdoba con Sevilla.

INSTRUMENTOS DE SILEX TALLADOS INDICAN QUE LA ZONA ERA FRECUENTADA POR CAZADORES EN EL PALEOLÍTICO

## HORNACHUELOS, DESDE LA PREHISTORIA HASTA LA EDAD CONTEMPORÁNEA

El origen mozárabe del nombre de Hornachuelos da algunas pistas sobre los motivos de la creación de este núcleo urbano. Deriva de la palabra *fornix/fornax* “bóveda subterránea o roca agujereada” y de hornacho “concavidad que se hace en la montaña para extraer minerales” y apunta a que su recinto amurallado estaba situado cerca de unas minas de plata y oro. Los primeros moradores del entorno fueron cazadores prehistóricos, más tarde llegarían los romanos y, tras la época musulmana, Hornachuelos viviría la Reconquista. En el siglo XVII pasaría a ser villa de señorío y luego condado. A esta localidad también le tocaría vivir intensamente la desamortización eclesiástica, la II República y la llegada de la Democracia.

Texto: **JAIME HIERRO**

Fotos: **AYTO. DE HORNACHUELOS**

Un viajero árabe llamado Al-Idris es el primero que deja constancia por escrito, en la época musulmana, en el siglo XII, que donde se ubica el Hornachuelos actual existía una ciudad amurallada rodeada de viñas y huertas llamada *Fumayulush*, nombre derivado de hornacho (concauidad en la montaña) por su cercanía a unas minas de plata y oro. En esa época, estas tierras estaban pobladas por las tribus árabes qays y kalb, y la bereber hawwara. Sin embargo, el origen de Hornachuelos como territorio por el que transitaban los seres humanos se remonta a la prehistoria. Instrumentos de sílex tallados en el paleolítico dan fe de que la zona del Guadalquivir y el río Bembézar era ya frecuentada por grupos de cazadores.

La presencia humana en la Edad de los Metales queda reflejada por los excepcionales hallazgos de la finca El Bramadero: un vaso campaniforme, en forma de cazuela ancha y baja, y un puñal de bronce arsenicado, triangular, de 14 centímetros y diseñado con una aleación de cobre y arsénico. En la Edad Antigua, al final de la Edad del Cobre, sólo la explotación de recursos mineros y la fundición de metales en las riberas del río habían dejado constancia de cierta actividad humana en la zona. Es con la llegada de los romanos cuando se amplía considerable-



Almena del recinto amurallado.

mente el número de habitantes. Aunque todavía se sigue investigando, algunos historiadores han vinculado Hornachuelos con Celti, el poblado fortificado del *Conventus hispalensis* –citado por el escritor Plinio– y punto de descanso de la vía romana que unía Astiji (Ecija) con Emerita (Mérida). En cualquier caso, los restos romanos escasean en la parte norte de Hornachuelos, porque el accidentado relieve del terreno dificultaba el establecimiento de poblaciones y el desarrollo agrícola. Sí sobresale la implantación rural en la zona sur, con los restos de numerosas villas romanas, los molinos y las infraestructuras hidráulicas creadas para la producción de aceite y para la fabricación de ánforas donde almacenarlo.

### EDAD MEDIA Y MODERNA

Es en 1240 cuando Fernando III reconquista Hornachuelos y en 1254 Alfonso X pone a la localidad bajo la jurisdicción del Concejo de Córdoba. A partir de ahí se busca delimitar la personalidad territorial de Hornachuelos. En 1444 se ‘señorializa’ el pueblo en favor de Martín Fernández Portocarrero. En años siguientes se suceden los dueños. Alfonso de Aguilar lo mantiene en propiedad durante las guerras civiles del reinado de Enrique IV hasta que en 1478 los Reyes Católicos le quitan la posesión.

Ya en el siglo XVII, Hornachuelos pasa a ser villa de señorío debido a una deuda de más de 40.000 ducados que la Corona tenía contraída con Lope de Hoces, miembro de los consejos de Guerra y Hacienda, a quien el 7 de agosto de 1637 se le concede la jurisdicción de la población. Y en 1640 se convierte en condado al nombrar primer duque de Hornachuelos a Alonso Antonio, el hijo de Lope, tras la muerte de éste en la guerra contra los holandeses.

Uno de los hitos que más marcó a Hornachuelos en el paso de lo que



Convento de Santa María de los Ángeles.



Aldea de San Calixto.

se conoce como la transición del antiguo al nuevo régimen es la desamortización eclesiástica, ya que es el momento en el que se vende el convento de Santa María de los Ángeles, inmueble de gran arraigo popular. También se consolidan las grandes propiedades dentro de sus extensiones. A comienzos del Siglo XIX, siguen las repoblaciones que se habían comenzado en la anterior centuria, aunque en este caso no fueran ilustradas, sino señoriales, creándose la aldea de San Calixto. La proclamación de la II República daría un vuelco en la composición del Ayuntamiento: de doce concejales monárquicos se pasa a doce republicanos-socialistas. Y, con la llegada de la Democracia, la gestión de Hornachuelos se abriría a los partidos políticos de nuevo cuño. ■

## HORNACHUELOS

## CEDIDA UNA NAVE A ANDALUCÍA EMPRENDE



Representantes de la Junta y el Ayuntamiento en la firma del acuerdo.

El Ayuntamiento de Hornachuelos ha cedido a Andalucía Emprende –el organismo de apoyo a emprendedores perteneciente a la Junta de Andalucía– una nave por un periodo de diez años. El objeto es que se use y gestione como una incubadora de proyectos innovadores presentados por emprendedores de la localidad, a los que se cede su utilización de forma gratuita. Con el de Hornachuelos, esta red de Andalucía Emprende –una de las más activas de toda España– dispone de 21 espacios, repartidos por la comarca del Guadalquivir, para acoger a autónomos o pequeñas y medianas empresas.

A los interesados se les ofrecerá no sólo el espacio físico, sino también se les asesorará o se les ayudará a buscar financiación, tanto pública como privada. A través de este organismo, el año pasado se crearon en Hornachuelos hasta siete empresas que generaron ocho empleos y movieron un inversión para esta zona de más de 35.000 euros. Además, más de 200 profesionales se beneficiaron de las acciones al emprendimiento y formación que se desarrollaron. ■

## UN MILLÓN DE EUROS PARA EL CASCO HISTÓRICO



Ermita-del-Salvador.

El Ayuntamiento de Hornachuelos destinará cerca de un millón de euros en una serie de intervenciones que se llevarán a cabo entre este año 2017 y 2019 en el casco antiguo de la localidad. Iniciativa de rehabilitación y reactivación que busca dar un impulso al turismo y desarrollo económico de la zona. En este sentido, el consistorio ha agradecido a Enresa su disposición colaborativa para acelerar el pago de una serie de licencias correspondientes a las instalaciones de El Cabril, que ha permitido que se cuente en gran medida con los fondos necesarios para emprender esta actuación. ■

## PEÑARROYA-PUEBLONUEVO

## SUBSANADAS LAS DEFICIENCIAS DE LA RESIDENCIA PARA DISCAPACITADOS



Fachada de la Residencia.

El Ayuntamiento de Peñarroya-Pueblo nuevo ha concluido –con una inversión de 100.00 euros– los

trabajos encaminados a subsanar las deficiencias eléctricas, de climatización o de placas solares que presentaba la residencia de gravemente afectados, con lo que ya se podrá solicitar la autorización de funcionamiento para abrir estas instalaciones. Una residencia de cuya gestión se hará cargo la Fundación Prode, la asociación para la promoción de personas con discapacidad. Se estima que la inauguración de esta residencia generará cerca de 60 puestos de trabajo, de los cuales un porcentaje se cubrirá con personas con algún tipo de discapacidad. ■

## FUENTE OBEJUNA

## TERCER PREMIO EN EL CONCURSO DE PATIOS



© Ayto. Fuente Obejuna

Patio de viviendas en Fuente Obejuna.

El Patronato provincial de Turismo –perteneciente a la Diputación de Córdoba–, la Fundación Viana y la Asociación de Amigos de los Patios Cordobeses han concedido a la localidad de Fuente Obejuna el tercer premio del II Concurso de Patios, Rincones y Rejas de la Provincia de Córdoba. Un certamen que busca poner en valor y promocionar uno de los patrimonios más significativos e insignes de toda la provincia de Córdoba. ■

## REFUNDACIÓN SIMBÓLICA DE MELLARIA



© Ayto. Fuente Obejuna

Presentación de la exposición de armamento romano.

de sus ciudadanos, cómo se vestían o qué comían. También se organizó una exposición de maquetas de armamento del Imperio Romano en el palacete modernista de la localidad. ■

En colaboración con el tercer Plan Galileo de la Universidad de Córdoba, el Ayuntamiento de Fuente Obejuna organizó a principios de junio diversos actos para refundar de forma simbólica la Mellaria Romana, la antigua ciudad romana fundada en el siglo II antes de Cristo y situada cerca del Cerro Masatrigo. El momento principal fue el desfile de los integrantes de la Legio I Vernácula de Gilena que, junto escolares que habían elaborado armas y vestimenta romana en diversos talleres, recorrieron las calles de la localidad hasta llegar a la Plaza Lope de Vega, donde se teatralizó la refundación, explicando el significado del nombre Mellaria y dando a conocer cuáles eran las costumbres

## AZUAGA

## CELEBRADA LA XXXVI EDICIÓN DE FECSUR



© Diputación Badajoz

Ganado para la feria Fecsur.

Del 25 al 28 de mayo, Azuaga acogió la XXXVI edición de FECSUR, la feria de muestras agrícola y ganadera de referencia del sur de Extremadura, que integra, además, la XI Feria del Porcino Ibérico y Salón de Maquinaria Agrícola y Ganadera. Una cita en la que la Diputación de Badajoz ha invertido 51.400 euros y ha aportado ganado ovino puro merino con certificado de alta calificación; y que ha contado con más de 90 expositores pertenecientes a cooperativas de productos agrícolas, empresas de automóviles o industrias de agroalimentación. Los primeros datos apuntan a que visitaron la feria cerca de 50.000 personas. ■

## GUADIATO

## EDITADO "LA ARQUITECTURA POPULAR EN LA CUENCA DEL RÍO GUADIATO"

Una descripción completa, y con datos muy originales, sobre la arquitectura básica y agraria, aquella que estaba adaptada a los trabajadores del campo, es la esencia del libro que José Manuel Domínguez ha publicado con el nombre de 'La arquitectura popular en la Cuenca del Río Guadiato'. Una obra que muestra un gran trabajo de campo y que pone especial énfasis en la singularidad de lo popular, de la importancia de preservar un tipo de viviendas que son joyas auténticas de la arquitectura de la zona. ■



Portada del libro de José Manuel Domínguez.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) publica una nueva edición del Atlas Internacional de las Nubes

## ‘CAZADAS’ NUEVAS NUBES

Publicado por primera vez en 1896, el atlas ha sido desde siempre una guía de culto para los observadores del cielo. Ahora, la edición de este año —en formato digital— ya lo ha hecho accesible para cualquier interesado en los fenómenos producidos por la condensación de vapor de agua. Incluye cientos de fotografías de nubes, entre las que doce corresponden a nuevas tipologías y a una nueva especie, ‘nube enrollada’. Algunas de estas nuevas nubes están causadas incluso por la actividad humana, pero, al convertirse en ‘oficiales’, ya pueden estudiarse —junto con sus efectos— como tales.

Texto: **ELENA GARCÍA**

Cumulus congestus y calima.



“

Si queremos predecir el tiempo, debemos entender las nubes. Si queremos modelizar el sistema climático, debemos entender las nubes. Y si queremos predecir la disponibilidad de recursos hídricos, debemos entender las nubes”, afirmó Petteri Taalas, secretario general de la OMM, en la presentación de la edición 2017 del Atlas Internacional de las Nubes, y añadió que se trata de la única referencia autorizada y exhaustiva para la identificación de las nubes: “Su reputación entre los aficionados a las nubes es legendaria y constituye una herramienta de formación esencial para los profesionales que trabajan en servicios meteorológicos y en sectores como la aviación y el transporte marítimo”.

Y no es para menos. Del atlas dependerá en gran parte el futuro de la relación humana con las nubes, y por tanto con el futuro del agua, así como con la forma de interpretarlas. En este momento, cuando el clima está en pleno proceso de cambio, el atlas es aún más determinante si cabe. ¿Motivo? La impronta humana cambia el cielo. “Lo más destacado de este nuevo atlas es que aparecen las nubes causadas por la actividad humana. Esto es muy importante puesto que las convierte en oficiales. A partir de ahora podrán estudiarse como tales”, dice Rubén del Campo, experto en nubes y portavoz de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMAT).

“El primer tipo de nubes se derivan de la estela de actividad de los aviones. Técnicamente este tipo de nubes nos dice por dónde pasan los aviones y las características térmicas del lugar. Hay mucho que estudiar puesto que hoy por hoy son grandes desconocidas. Apenas sabemos nada de su com-

portamiento y mucho menos si tienen relación con las lluvias o el clima”, explica del Campo. De hecho, las nubes fruto de la estela de los aviones, pertenecen al tipo homogénitas y a la especie contrails. Pero hay muchas más. Gracias al

atlas el cielo vuelve a ser el espejo en el cual se mira el ser humano, con su cara y su cruz; con las aristas del humo provocado por los aviones. “El nuevo atlas tiene una nueva especie llamada volutus, cuyo significado es rodado



Altostratus lenticularis duplicatus y Cumulus.

© Gréta S. Guðjónsdóttir.



Altostratus floccus virga.

© Mok Hing Yim.



Cumulus congestus y otras especies.

© Marcin Kocylik.

y designa las nubes que parecen enrolladas. También las asperitas, estéticamente semejantes a la rugosidad del mar”. Entre otras novedades, se señala una nueva nube accesoria llamada flumen –o cola de castor– que está asociada a fuertes tormentas en rotación, y cinco rasgos complementarios: asperitas, cavum, cauda, fluctus y murus.

### UN ATLAS DEL FUTURO

El atlas, que a partir de ahora podrá consultarse desde cualquier lugar del mundo gracias a internet, dibuja una clara línea en el tiempo meteorológico y es un paso adelante con respecto a la última revisión, realizada hace veinte años, en 1987. “Esta es la mayor y más minuciosa revisión del atlas las nubes” para Ana Cal-sals, de la Agencia Estatal de Meteorología. A lo largo de los años mucha gente en todo el mundo ha donado imágenes privadas de las nubes. Se trata de un tesoro oculto hecho público gracias a un meticuloso trabajo. De hecho, este atlas no hubiera sido posible sin el observatorio situado en Hong Kong, donde un equipo de la OMM ha dedicado tres años para clasificar, revisar y organizar las cientos de imágenes disponibles.

De entre ellas, se han entresacado aquellas más singulares, las más descriptivas, las más novedosas, e incluso, sí, las más bellas. “El equipo de expertos del Atlas Internacional de Nubes tuvo que elegir entre miles de imágenes de meteorólogos, amantes de las nubes y fotógrafos de todo el mundo”, señalaba recientemente Chi-ming Shun, director del Observatorio de Hong Kong: “Elegimos las mejores de las mejores. Estamos orgullosos de

haber contribuido a crear el atlas. Agradecemos a la OMM que haya actualizado el Atlas Internacional de Nubes, que proporciona una plataforma única para que el público comprenda mejor las nubes, el tiempo y el clima”.

### UN MOMENTO HISTÓRICO DE CAMBIO

La primera clasificación de las nubes, en latín, se llevó a cabo a principios del siglo XIX de la mano del científico Luc Howard, cuyas



© Gary McArthur

Altostratus stratiformis opacus asperitas.



© Lee Tsz Cheung

Altostratus stratiformis perlucidus translucidus cavum.



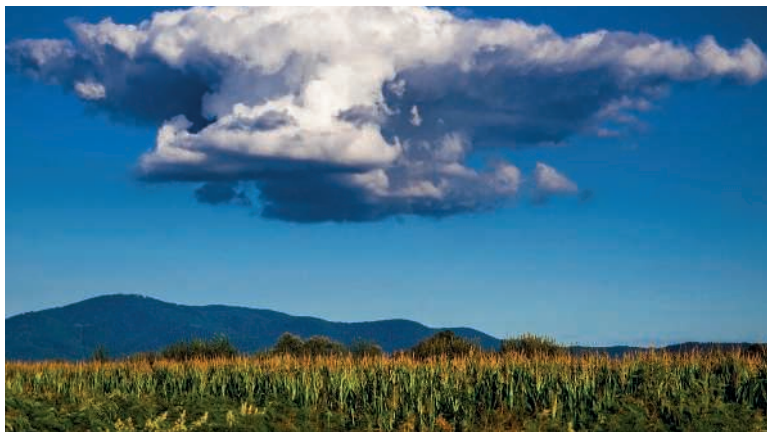
© Fabrizio

Relámpago de Cumulonimbus capillatus.

## Los géneros permiten definir el lugar donde se generan las nubes y su apariencia. Una clasificación que está inspirada en la taxonomía que el investigador Carlos Linneo aplicó a los seres vivos



Cumulonimbus capillatus incus.



Stratocumulus cumulogenitus.



Alto cumulus stratiformis translucidus perlucidus en una forma muy estrecha y disolviéndose.

observaciones dieron lugar al libro *The modifications of clouds* (El cambio de las nubes). Howard clasificó las nubes de igual modo que se clasifican las plantas o los insectos. Es decir, por géneros y especies. Los géneros permiten definir el lugar donde se generan y su apariencia, y están divididos a su vez en especies, que muestran la forma y estructura interna de la nube. Éstas a continuación se dividen en variedades en función de la transparencia y la distribución de la nube. En total hay unas 100 combinaciones.

“La clasificación está inspirada en la taxonomía que el naturalista sueco Carlos Linneo aplicó hace varios siglos a los seres vivos y, como aquella, utiliza términos en latín”, aclara Rubén del Campo. Hoy por hoy hay diez géneros, quince especies, nueve variedades y nueve rasgos, los cuales combinados permiten clasificar, en principio, cualquier tipo de nube en cualquier lugar.

### CAZADORES DE NUBES

Las nubes son algo más que un eslabón en el ciclo del agua. Cada una de ellas tiene la información suficiente para poder interpretar el cielo, al igual que las razas humanas tienen información acerca de nuestro origen ancestral. Las nubes se clasifican por su origen, naturaleza, nivel atmosférico y formas. De hecho, cada foto tomada por los que se conoce como ‘cazadores de nubes’ se clasifica por fecha, hora, lugar donde se ha visto, movimiento, dirección y descripción complementaria acerca del entorno, además del tipo de nube que se trata.

Lo de estos 'cazadores' no es poesía, ni un vano intento de catalogar la libertad del agua en crear formas sobre el cielo; es información y belleza. Tres años, cientos de fotos y un equipo completo dedicado a separar, clasificar, organizar y

dar a luz el Atlas Internacional de la nubes, pero mucho tiempo más para crear la base de datos que ha dado lugar a las impresionantes imágenes que lo conforman. Los cazadores de nubes están en todo el mundo y tienen un modo

de operar muy definido. Son ellos quienes buscan, fotografían y clasifican. Como detectives del detalle tienen todo un itinerario de viaje marcado.

Una de las características más destacadas de esta nueva edición del atlas es que está directamente relacionado con el momento que se vive de cambios en el clima. "Las nubes son universales y su papel en el cambio climático es una fuente de incertidumbre. No conocemos todavía lo suficiente. Las nubes influyen en el sistema meteorológico, en el ciclo del agua y el clima. Pero desconocemos cómo varía cada tipo de nube", aclara del Campo, quien aboga por investigar mucho más: "Las nubes generadas por los efectos humanos son una gran fuente de incertidumbre en cuanto a cómo afectan a la propia previsión climática. Se conoce su papel decisivo a corto plazo, pero hay insuficientes estudios para conocer cómo influirán en el clima del futuro".

El efecto de las nubes, para del Campo, es de vital importancia, ya que provocan la lluvia o influyen en la temperatura del día porque interfieren en la llegada de los rayos solares e impiden que el calor de la tierra se escape hacia el cielo. Pero con cada tipo de nube y la altura en la cual esté en la atmósfera, el efecto es diferente. Los cirros, las más altas, actúan como una manta, caliente, impiden las radiaciones solares y evitan que se escape el calor de la tierra, pero aumentan el efecto invernadero. Las más bajas, llamadas estracúmulos, protegen a la tierra de las variaciones solares y enfrían la temperatura. En cuanto a las nuevas nubes, aún no se conocen sus efectos. ■



© Stephen Burt

Cirrus floccus homomutatus.



© Alfons Puertas

Cirrus uncinus y fibratus.



© Jüri

Cirrus floccus en el cielo de Tallinn.



Escalinata monumental, con una altura de 3,5 metros y que salva la separación entre los dos pisos que componen la edificación.

Yacimiento del Turuñuelo (Extremadura): una edificación tartesa singular y diseñada por esta civilización prerromana

## PELDAÑO A PELDAÑO HACIA EL MISTERIO DE LOS TARTESIOS

Un paraje conocido como Turuñuelo, en el municipio de Guareña, cerca de Mérida (Badajoz), escondía hasta hace poco bajo los campos de maíz un auténtico tesoro: los restos de un palacio-santuario que fue levantado en el siglo V antes de Cristo por los tartesios, pueblo que descende de los fenicios, que llegó al sur de la Península Ibérica y permaneció en ella unos siglos antes de desaparecer tras la invasiones de otros pobladores venidos del norte. 'La bañera', un recipiente de más de una tonelada, es una de las piezas únicas encontradas por los arqueólogos.

Texto: **ROSA M. TRISTÁN**



© Instituto de Arqueología de Mérida

Vista general de una de las estancias del palacio ubicado en el Turuñuelo.

**U**na escalinata monumental de dos metros y medio de altura y construida con unas técnicas desconocidas en el Mediterráneo occidental es la 'entrada' a un edificio tartésico de hace más 2.500 años. Se trata del yacimiento del Turuñuelo que, ya en las primeras fases de excavación, ha demostrado su gran riqueza histórica. En cada campaña se descubren nuevas piezas de un 'ajuar' que va a ayudar a revelar muchos de los misterios que aún rodean a esta cultura y seguramente a abrir la puerta a otros nuevos. 'Tartesso' es el nombre que los griegos dieron a la civilización que encontraron al Occidente de Europa, en concreto en lo que en la actualidad son las provincias de Cádiz, Huelva, Málaga y Badajoz. El historiador Herodoto ya habla en sus textos

del siglo V antes de Cristo de un rey llamado Argantonio, 'El hombre de plata', de gran riqueza y muy generoso, que habitaba esas lejanas tierras. Esta cultura tartésica había surgido de la fusión entre lo que trajeron los fenicios hasta las costas españolas tres siglos antes de la referencia de Herodoto, y los pueblos indígenas que habitaban la península ibérica.

Jarras, copas, calderos gigantes, pinchos morunos, platos y hasta una bañera de grandes dimensiones son parte de lo que un grupo de arqueólogos de Extremadura ha encontrado hasta la fecha en las dos únicas salas excavadas de las muchas que podría tener el palacio. En total, ya hay más de 2.000 piezas que están siendo restauradas por parte del equipo del Instituto de Arqueología de Mérida (IAM), que dirige Sebastián Celestino, también respon-

sable del yacimiento junto a su compañera y arqueóloga Esther Rodríguez.

El hecho de que estos arqueólogos acabaran 'picando' de sol a sol en Turuñuelo en la primavera de 2014 tiene que ver con la tesis que estaba realizando Rodríguez sobre los tartessos. La investigadora había identificado una decena de enclaves en los que podría haber restos tartésicos como los ya conocidos de los yacimientos de Cancho Roano y La Mata (ambos en el municipio extremeño de Villanueva de la Serena).

### UN CERRO ARTIFICIAL

"Uno de esos diez puntos era el pequeño cerro artificial que había en mitad de una llanura en una finca en el paraje de Turuñuelo, un túmulo que quedó aislado en mitad de una finca cuando en los

años 50 se hicieron muchas tierras de regadío en torno al Guadiana. Pero el túmulo, de unas dos hectáreas, no podían ararlo debido a la pendiente, así que –aunque sufrió un recorte, quedándose en una hectárea–, estaba intacto”, explica Rodríguez, quien recuerda que debido a los trabajos agrícolas, ya en los 80 se habían encontrado materiales arqueológicos que habían despertado el interés.

### LA ‘HABITACIÓN 100’

La buena disposición de los propietarios de la finca para dejarles hacer un sondeo hizo que poco tiempo después los arqueólogos se pusieran manos a la obra gracias a fondos de un proyecto del Programa Estatal de I+D. Fue tal la cantidad de restos de cerámica y otros materiales que se hallaron en esa primera campaña que para el año siguiente presentaron ya un proyecto específico de excavación a la Consejería de Patrimonio y Cultura de la Junta de Extremadura. “En esa segunda campaña pudimos contar con un equipo de casi 30 estudiantes y un arquitecto que nos ayudó a interpretar lo que encontrábamos”, cuenta Celestino.

Y el resultado fue muy interesante. Salió a la luz la que llaman ‘Habitación 100’, por su posición en la cuadrícula dibujada del terreno. Es una sala de 70 metros cuadrados, un gran espacio con paredes encaladas en la que se encontró un banco corrido, una gran bañera de cerámica hecha pedazos y también una pileta excavada en el suelo, forrada de cal. En el suelo, justo en el centro de la sala, tenía el dibujo de una piel de toro, que según los arqueólogos podría ser el lugar donde se situaba un altar. Aún no se sabe, pero el codirector del yacimiento aventura que el edificio podría tener forma de ‘u’ con 12 ó 14 habitaciones en torno al patio central, siguiendo el modelo de otros enclaves similares que existen en Andalucía.

Los trabajos desde entonces continúan y también los hallazgos. “En 2016 encontramos una puerta de dos metros de ancho, con dos pilastras, que comunicaba la ‘Habitación 100’ con una segunda sala, en las que ya estamos excavando y donde hemos hallado hasta ahora unos bronce magníficos. En realidad, tenemos lo que podría ser todo el mena-

je necesario para un banquete de muchas personas”, señala el arqueólogo.

### EN RESTAURACIÓN

Gran parte de este ‘tesoro’ se encuentra ahora en el laboratorio de restauración de la Universidad Autónoma de Madrid, con el que el IAM colabora. Más de cien piezas reconstruidas de cerámica, jarros de bronce, braserillos, una barba-coa, coladores, un gran caldero de un metro de diámetro, y hasta quemaperfumes (candelabros altos con un plato para aromatizar el lugar). “Probablemente, los tartesios comerían ovejas, cabras, miel, aceite, y beberían vino. Era un pueblo que vivía de la agricultura, pero también comerciaba; en la costa, con la plata de las minas de Río Tinto y Aznalcóllar, y en el interior con el estaño”, dice el director del IAM.

Entre tantos tesoros arqueológicos, Celestino y Rodríguez destacan la belleza de unas piezas de importación: cajas de marfil con leones labrados y copas griegas. “Su presencia en el valle medio del Guadiana nos habla de que este pueblo tenían relaciones con Ática, que entonces estaba en su apogeo”, apuntan.

Para el equipo del IAM no hay duda de que el palacio-santuario de Turuñuelo era un lugar destacado de la cultura tartessa. De hecho, no descartan que debajo de este edificio pudiera haber otros anteriores, que se fueron quedando pequeños con el tiempo. “Esta cultura surgió en torno al Guadalquivir. En el entorno de Doñana ya se han excavado edificios que eran también santuarios, pero que además de una función religiosa tenían también otra económica,



Trabajos arqueológicos durante una de las últimas campañas realizadas.

© Esther Rodríguez

## Los tartesios y la misteriosa Atlántida

La leyenda del continente perdido de la Atlántida se ha intentado relacionar a lo largo de la historia con la cultura de tartessos de la Península Ibérica. Su abrupta desaparición, en pocos años, algunos han querido relacionarla con esa gran isla perdida que parece que sólo existió en la imaginación del filósofo griego Platón.

A raíz de sus indicaciones sobre la existencia de una civilización rica y poderosa “en una isla delante de las columnas de Hércules (el Estrecho de Gibraltar)”, muchos investigadores han buscado en el suroeste peninsular sus restos sin encontrarlos. En 2011, el arqueólogo estadounidense Richard Freund, con el apoyo de la National Geographic Society, llegó a las marismas del río Guadalquivir y, en poco tiempo, concluyó que la supuesta Atlántida y los tartessos eran lo mismo, dejando su hipótesis plasmada en el documental *Encontrando la Atlántida*. Freund concluía que aquella gran isla frente a Doñana había desaparecido por un tsunami hace unos 2.500 años, justo con el fin de los tartessos. Pero toda esta argumentación ha sido tajantemente desmentida por los investigadores españoles, entre ellos el director del Instituto Arqueológico de Mérida, Sebastián Celestino, que en 2009 buscó restos arqueológicos en el punto del Parque Nacional de Doñana donde Freund había detectado supuestos restos de templos en fotos de satélite. Y no encontró nada. Otros trabajos también han descartado la conexión Atlántida-Tartessos, dejando a la Atlántida de nuevo en el capítulo de las leyendas.

política y comercial. En estos lugares vivían las personas que controlaban el territorio y eran asentamientos en los que no había murallas porque era sobre todo una cultura de paz, sin armas. De hecho, se conoce como la época de la Paz Tartésica”, explica la codirectora del yacimiento.

### ¿POR QUÉ DESAPARECIERON?

Precisamente el desconocimiento de las estrategias de guerra está en el origen de la desaparición de este pueblo, pues a partir del siglo V antes de Cristo comenzaron a llegar hasta su territorio extremeño invasores celtas que venían del norte, con un buen entrenamiento bélico. Todo indica que los tartessos no pudieron resistir. Pero antes de huir de lugares como Turuñuelo, y al igual que hicieron en todo el Guadiana, quemaron sus propiedades y derrumbaron las paredes de lo que habían sido sus centros de poder y lugares de culto, para sellarlos con arcilla para que el enemigo no pudiera mancillar su cultura.

Algunas piezas lucen en el Museo de Mérida, pero la ‘bañera’ ya restaurada, y de una tonelada de peso, de momento sigue en el yacimiento. Esther Rodríguez reconoce que en realidad ese gran recipiente de cal de unos 70 centímetros de alto y 1,70 m de largo, podría ser para acumular agua: “No hay otra igual en la Península. Hay algunas de dos siglos más tarde, pero con desagüe, y ésta no tiene, así que es en realidad no tenemos la certeza de para qué la utilizaban, aunque le hayamos puesto ese nombre por la forma que tiene. Estamos seguros de que este túmulo aún nos deparará muchas sorpresas”. ■



Caldero de bronce hallado durante las excavaciones.



La ‘bañera’ pesa una tonelada y se cree que era un depósito de agua.

© Esther Rodríguez.

© Esther Rodríguez.



© Holger Krisp

Los gecko son unos pequeños lagartos con una asombrosa capacidad de adherencia a las paredes que ha dado lugar a más de 100 patentes de pegamentos no tóxicos..

Algunas características de animales o plantas pueden 'replicarse' para el diseño de todo tipo de artículos

## BIOMÍMESIS O CÓMO RECREAR LA NATURALEZA

Si algunos animales o vegetales han sido capaces durante 4.000 millones de años de adaptar sus formas y estructuras para lograr ser más eficaces y sobrevivir, ¿por qué no copiar esas características exitosas y aplicarlas en procesos o elementos de la actividad humana? Ese es el reto de la biomímesis, la ciencia que estudia y descifra el código de la Naturaleza para dar solución a problemas humanos que ya resolvió la vida a lo largo de la evolución. Hoy, grandes empresas y centros de investigación ya están adoptando la biomímesis como estrategia para crear nuevos productos y estrategias comerciales.

Texto: **ROSA MARTÍN**

**L**as innovaciones por biomímesis están detrás de preguntas que mucho tienen que ver con aquellas que pueden parecer sacadas de un libro de curiosidades: ¿Cómo captura la luz la hoja de un árbol? ¿Cómo se pega el mejillón azul a las rocas debajo del agua? ¿Cómo trepa el lagarto gecko por las paredes o las ramas? ¿Por qué un tiburón es tan eficaz y rápido nadando?... Un listado de cuestiones tan interminable como la cantidad de adaptaciones que los expertos en esta materia ‘replican’ para aplicarlas a sectores tan diversos como son la salud, la arquitectura, la industria, el reciclaje, la energía, el transporte o la moda textil.

El biólogo y también profesor de la Escuela Europea de Diseño (EED) Manuel Quirós está especializado en biomímesis –rama científica también conocida como biomimética o biomimetismo– y cree que es, en gran medida, el futuro. De hecho, imparte una asignatura reglada sobre la materia: “Es importante ser conscientes de que casi todo lo que se busca como innovación está ya en los organismos que nos rodean, así que es fundamental estudiarlos y aprender de ellos. Ahí está la base de la biomimética, una ciencia cada vez más en auge en otros países, pero que en España aún no está consolidada”.

Este investigador es también uno de los fundadores de la asociación Biomimicry Iberia, que agrupa a los investigadores que en España divulgan esta forma de ‘ver y crear’. Así, en centros del CSIC, universidades y empresas, cada vez son más los biólogos e ingenieros que se unen para asomarse a ese mundo animal y vegetal en el que otros ya descubrieron que la sustancia que genera el mencionado mejillón azul para adherirse a las rocas es un pegamento subacuático excelente o que imitar la piel de los escualos para bañadores de competición es una gran idea porque se elimina la fricción con el agua y aumenta la velocidad del nadador.

### LOS ORÍGENES

Para acercarse al origen de la biomímesis hay que retrotraerse a los orígenes mismos de la Humanidad, cuando los primitivos homo sapiens, quién sabe si sus ancestros también, se fijaron en los seres que les rodeaban para aprender a sobrevivir en un entorno hostil. Sin embargo, el pionero de lo que conocemos como esta disciplina fue el renacentista Leonardo da Vinci, que ya en el siglo XV trató de imitar el vuelo de las aves para hacer tecnología en sus máquinas voladoras, los ‘ornitópteros’. Leonardo fue consciente de sus limitaciones y optó por no viajar en sus artilugios, aunque sí que tuvo éxito con un helicóptero del tamaño de un juguete. “Es

más noble imitar las cosas de la naturaleza, que son de hecho imágenes reales, que imitar lo que se dice con palabras”, llegó a decir el sabio italiano.

Finalmente, fue a mediados del siglo XX cuando los ingenieros industriales comenzaron a fijarse y aprender de los organismos que nos rodean. Un caso emblemático es el del ingeniero suizo George de Mestrel, quien, en 1948, tras un paseo por las montañas, se percató de lo difícil que era quitarse de la ropa unos restos de flores de cardos. Al mirarlas por el microscopio, descubrió que sus pinchos acababan en un pequeño garfio, de cuya imitación acabó creando el velcro (en origen, nombre de la empresa de Mestrel que lo patentó). Una década después se fabricaban ya 60 millones de metros al año y hoy no hay quien no tenga algo con este tipo de cierre.

Otro de los clásicos inventos por biomímesis es el tren bala japonés, cuya cabecera tiene la forma del pico de un martín pescador (alcedo atthis). ¿Por qué? Pues porque, a finales de 1990, los japoneses habían logrado unos trenes capaces de alcanzar velocidades sorprendentes, pero acumulaban tanto aire en su parte delantera que ocasionaban un estampido de sonido insoportable para los viajeros. Entonces, un ingeniero vio a este pequeño pájaro entrando al agua de una charca sin generar ninguna turbulencia ni rui-

## Imitar las aletas con crestas de las ballenas jorobadas ha permitido diseñar turbinas eólicas que se mueven hasta con un 25% más de eficacia que las tradicionales y generan un 20% más de energía

do y decidió probar a diseñar la parte delantera del convoy como su largo y estrecho pico. El tren bala no sólo se hizo silencioso, sino que además se ahorró un 15% electricidad por ser aerodinámico, a la vez que aumentó su velocidad.

### APRENDER Y NO EXTRAER

Hay quien sospecha que aquel ingeniero japonés había leído algún ensayo de la bióloga de Nueva Jersey Janine Benyus, que en 1997 escribió un libro que hoy es como la biblia de quienes quieren acercarse con los ojos de la biología a la innovación: 'Biomímesis. Cómo la ciencia innova inspirándose en la naturaleza' (Tusquets). "En la biomimética no se trata

de extraer materiales de los organismos o de sus ecosistemas, no es talar árboles o cosechar un producto, sino que consiste en aprender de ellos. Los expertos en biomimética 'consultan' a los organismos, que les inspiran una idea, ya sea un esbozo físico, un paso en una reacción química o un principio ecosistémico, como el reciclaje de los nutrientes. Tomar prestada esa idea es como copiar un dibujo: la imagen original permanece para inspirar a otros", asegura Benyus, creadora de Biomimicry Wild, organización que busca soluciones en este campo, y presidenta del Instituto Biomimicry.

"En Estados Unidos lo tienen claro. Empresas como Nike han diseñado unas zapatillas inspira-

das en la pezuña de los canguros para ahorrar energía, por poner un ejemplo de tantos. Cada vez más a menudo grandes empresas incorporan la biomímesis en sus estrategias de innovación. Un reciente estudio de la Universidad de Point Loma –ubicada en San Diego, Estados Unidos– estimaba que el impacto económico de esta ciencia es la aportación de 3.000 millones de dólares. Se podría decir que Benyus popularizó algo que existía previamente, ayudó a que se vieran las ventajas. En España aún nos cuesta mucho introducir el concepto, pero también ya hay emprendedores trabajando en cómo mejorar sus procesos observando la naturaleza", señala Manuel Quirós.

### CIENTOS DE EJEMPLOS

Es imposible no sorprenderse con las innovaciones que ya existen. Es el caso de las derivadas de los gecko, esos pequeños largartos con una asombrosa capacidad de adherencia a las paredes que ha dado lugar a más de 100 patentes de pegamentos no tóxicos; el de las ballenas jorobadas, cuyas aletas con crestas han inspirado unas turbinas eólicas que se mueven hasta 25% más eficazmente que las tradicionales, generando un 20% más de energía; el de las flores de loto, cuya capacidad para que el agua no moje su superficie ha sido replicada en pinturas y telas que son repelentes a los líquidos y a la vez inocuas para el medio ambiente; o la seda de araña, que tiene una capacidad de resistencia superior a la fibra de acero, y que a comienzos de este mismo año 2017 se ha logrado imitar artificialmente con éxito (trabajo que anunciaron en la revista Nature científicos de la Universidad



© Emke Dénés

Para adherirse a las rocas, el mejillón azul emplea una sustancia que el ser humano 'usa' para fabricar un fuerte pegamento subacuático.

Politécnica de Madrid, de Suecia, China y el Reino Unido). Hasta en España la compañía Biomival ha diseñado una turbina inspirada en el pico de un flamenco.

## EN ARQUITECTURA

Y no todo es diseño de objetos, sustancias o estructuras para la industria. La arquitectura es otra de las grandes áreas de aplicación de la biomímesis. Por ejemplo, en la capital de Zimbabue, Harare, se ha construido un edificio en el que se ha ‘copiado’ la peculiar estructura que tienen los termiteros para mantener así una temperatura constante de 30°C sin necesidad de gasto energético: es el centro comercial y de oficinas EastGate Center. “Las posibilidades de estos desarrollos son impresionantes para usarse en territorios con climas como los que hay en gran parte de África. Lo que hicieron con EastGate Center fue fijarse en cómo construyen las termitas para mantener una temperatura adecuada a su supervivencia”, apunta Quirós.

El matemático y también filósofo Jorge Riechman, que dirigió hace



© Philmarin

Los pinchos del cardo, que acaban en un pequeño garfio, acabaron siendo imitados para crear el velcro.

algún tiempo el Observatorio de la Sostenibilidad en España y es autor del libro titulado Biomímesis: ensayos sobre la imitación de la naturaleza, considera que el

objetivo de la biomímesis debiera ser ir más allá de la fabricación de objetos concretos para dar el paso a la imitación completa de los ecosistemas. Para este profesor de la Universidad Autónoma de Madrid lo que caracteriza a la biomimética ingenieril es la imitación de partes de los organismos: “Lo que resulta muy atractivo desde una óptica industrial, porque genera buenas ideas para patentes, pero hay que tener en cuenta que más importante que ese funcionamiento concreto es aprender de los ecosistemas cómo la naturaleza resuelve el tema de la energía, cómo cierra los ciclos de los materiales sin dejar residuos, porque es el modo de caminar hacia un modelo totalmente sostenible”. ■



El escarabajo de Namibia es capaz de recolectar agua de la neblina y el hombre le ha imitado con una botella en la que se condensa el rocío y se almacena como agua



© Dew Bank

Los acuíferos son formaciones geológicas que permiten almacenar y hacer fluir agua en cantidades significativas

## EL USO NECESARIO Y SOSTENIBLE DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Muy degradados e incluso algunos completamente secos. Esto es lo que ha descubierto la NASA de los principales acuíferos del mundo. La degradación de estos recursos naturales ha ocurrido en los últimos 60 años. ¿La causa? La sobreexplotación. En el caso de España, el grado de utilización de sus masas de agua subterránea varía: el estado de una treintena empieza a preocupar, pero en general se está lejos de lo señalado por la NASA. Aparte, los planes de la cuenca hidrológica tienen en cuenta este fenómeno y las medidas que hay que tomar para su recuperación.

Texto: **BRUNO DÍAZ**

Acuífero de Subijana, que, con una cuenca de 170 Km<sup>2</sup>, sólo se aprovecha 1,5 hectómetros cúbicos al año, de los 72,5 posibles.



**D**e los 37 grandes acuíferos que existen en el mundo, 21 están muy degradados y nueve prácticamente secos. En total, un tercio. La conclusión del informe que ha publicado la agencia espacial americana NASA –con datos obtenidos por satélites que miden las anomalías de la gravedad de la Tierra cuando el planeta se ve afectado por su masa de agua– muestra que este tipo de reservas de agua se empieza a agotar con rapidez debido al excesivo consumo por parte del ser humano. De todos ellos, ocho se encuentran en estado de estrés, apenas tienen una reposición natural de agua y cinco muy o extremadamente estresados. La mayoría se encuentra en zonas secas de la Tierra, donde más necesitan hacer uso de ellos.

Las consecuencias negativas más inmediatas de esta situación son ya –o podrían ser en un futuro cercano– el agotamiento de ríos, el desplome de terrenos, la disminución de la calidad del agua o el desabastecimiento de agua potable para algunas poblaciones si no cuentan con otros recursos. Si las lluvias no lo remedian, hay ciudades como Sao Paulo (Brasil), con millones de habitantes, que sufren restricciones de forma periódica. Maude Barlow, presidenta del Consejo de Canadá (una entidad que vela por los intereses públicos) y exconsejera de la ONU ha advertido del peligro que esto

supone entre aquella clase baja y media que no puede pagar por el agua: “Se trata de un derecho fundamental de todo ser humano. El problema es que se comercializa con ella y se trata como una mercancía. Existen tratados de libre comercio que permiten a empresas extranjeras comprar agua de fuentes naturales y usarlas sin el adecuado control”.

Se da la paradoja de que para fabricar una botella de plástico se necesita más agua que la que cabe en su interior, sin olvidar la energía que se consume para su fabricación o que el material con el que está hecha es contaminante. Barlow aboga por beber agua del grifo y controlar que no haya empresas que, con el fin de comercializar su agua en otros puntos del planeta, exploten sin control acuíferos de una zona hasta agotarlos, mientras la población del lugar queda desabastecida.

### EL CASO DE ESPAÑA

España es uno de los países con más acuíferos: ocupan una superficie de unos 177.000 km<sup>2</sup>. El país dispone de más de 760 masas de agua subterránea, con diferentes extensiones y espesor, y de tres tipos: Detrítica (arenas, gravas, arcosas) que ocupan las grandes cuencas terciarias (Duero, Tajo, Guadalquivir) y los aluviales de las principales cuencas; Carbonática (calizas y dolomías, principalmente) localizadas en

las cadenas montañosas (Picos de Europa, Ibérica, Catalánides, Pirineos y Béticas); y los de Canarias, que se trata de acuíferos en terrenos volcánicos.

“Su explotación en España es variable. Aproximadamente una treintena de entre los principales están intensamente explotados, pero los vigentes planes sobre la cuenca hidrológica tienen bien presente el grado de explotación y las medidas que deben seguirse para procurar su recuperación en unos casos y su uso sostenible en todos ellos. Hay casos preocupantes en España, pero, en general, se está lejos de ese agotamiento que anuncia la NASA”, explica Fermín Villarroya, profesor titular de Hidrogeología y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM).

Para satisfacer las demandas de agua, son con gran diferencia las superficiales, las de los ríos, a las que más se recurre. En España se cuenta con más de 1.300 embalses, una cifra que sólo está por detrás de India, China y EEUU, y que indica, según Villarroya, que en muchas ocasiones se minusvalora la potencialidad que ofrecen los acuíferos, capaces de almacenar no menos de 250.000 hm<sup>3</sup>, mientras las presas retienen cerca de 55.000 hm<sup>3</sup>, y teniendo en cuenta que su estado más habitual se encuentra, dependiendo de épocas y cuencas, entre un 50 y 75% de su capacidad. “El origen del agua es abrumadoramente superficial: de las presas proviene

el 80%, y el resto –la quinta parte del total– de los acuíferos. Sería deseable una mayor integración de las aguas subterráneas y fomentar más intensamente el uso conjunto de ambos recursos que en realidad es uno solo: agua”.

Con la promulgación de la Directiva Marco del Agua de la UE, se avanzó notablemente en el conocimiento hidrogeológico. En la actualidad se está por tanto en condiciones –técnica y científicamente– para llevar a cabo una explotación sostenible y prudente de los acuíferos, recursos que pro-

porcionan seguridad y resiliencia en las épocas de sequía. Su uso adecuado pasa, en opinión de los expertos, por la gestión controlada de los pozos existentes y de su explotación mediante una red de vigilancia, y por dotar de un papel más destacado a los organismos de cuenca y al IGME, así como de informar a los ciudadanos.

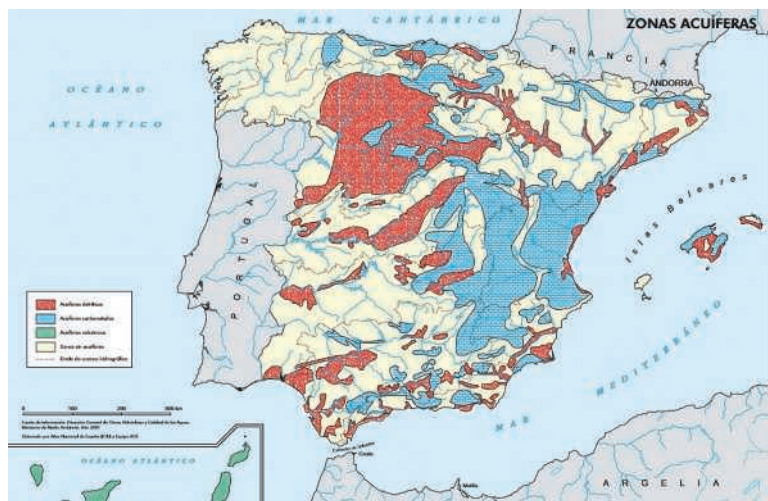
### AMENAZAS

No sólo la sobreexplotación amenaza la supervivencia de los acuíferos. Una serie de ni-

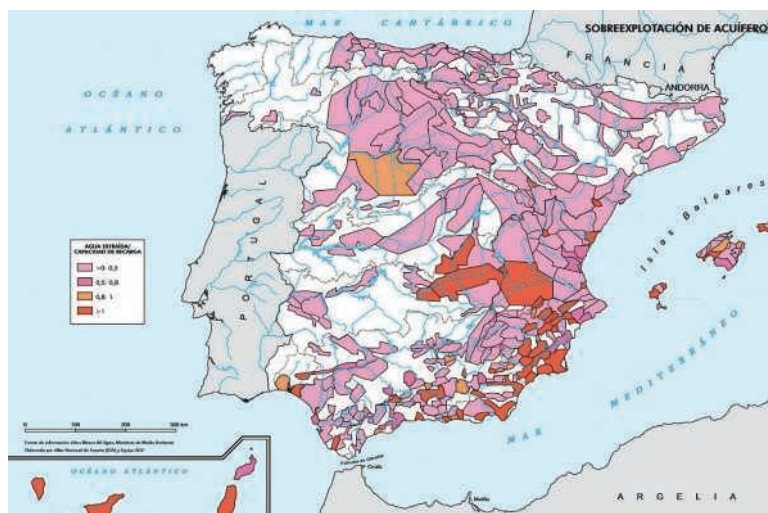
tratos –nocivos para la salud y los ecosistemas– está afectando a estas fuentes de agua. Se trata del uso masivo de abonos, de fertilizantes nitrogenados que se usan en la agricultura. En España, uno de cuatro acuíferos está contaminado. Cerca de 170 masas de agua están afectadas en mayor o menor medida, según el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Los responsables de este organismo apuntan a que ya no ocurre en zonas exclusivamente agrícolas en las que se producen filtraciones hacia el subsuelo, sino también en zonas consideradas hasta hace poco como ‘limpias’ y cuya área de recarga no se dedica a labores relacionadas con la agricultura.

El 70% de los municipios de España con menos de 20.000 habitantes se abastece de aguas subterráneas, por lo que los expertos aconsejan un mayor control, ya que una concentración de nitratos superior a los 50 miligramos por litro (mg/l) en el agua para consumo humano es totalmente desaconsejable. Esto es lo que estipula la Organización Mundial de la Salud (OMS) pero la Agencia para la Protección del Medioambiente de Estados Unidos va mucho más allá y lo sitúa en 10 mg/l.

El cambio en el clima también se cierne, para Villarroya, como una sombra sobre los recursos hídricos: “Los pronósticos auguran un descenso de las precipitaciones y un aumento de la temperatura, por lo que habrá una mayor demanda hídrica en la agricultura”. Otra de las amenazas que acechan a los acuíferos cercanos a la costa es la intrusión de agua marina. Se saliniza el agua y ya no se puede usar para regadíos ni para consumo humano. En España, los más expuestos, según IGME, son



Principales zonas acuíferas en España según tipología.



Zonas acuíferas según su explotación de agua extraída y capacidad de recarga.

© Ministerio de Fomento/Instituto Geográfico Nacional

© Ministerio de Fomento/Instituto Geográfico Nacional

los del Mediterráneo peninsular, Baleares y Canarias. Y lo más grave es que, una vez salinizado, el acuífero queda abandonado sin posibilidad de explotación.

Por otro lado, aunque estrechamente vinculado con el agua, los icebergs también están en el punto de mira: ya hay empresas que comercializan agua de los glaciares destinada a un consumo de lujo. Se llega a pagar hasta 94 euros por una botella de agua del Ártico. También se han concedido incluso licencias para la explotación de los glaciares del Himalaya. En ambos casos, hay quien considera que, aunque esos terrenos pertenezcan a territorios nacionales, son patrimonio de la Humanidad y no deberían explotarse. De cualquier modo, habría que determinar si toda la cadena de producción de estas iniciativas es sostenible y no produce ningún impacto medioambiental.

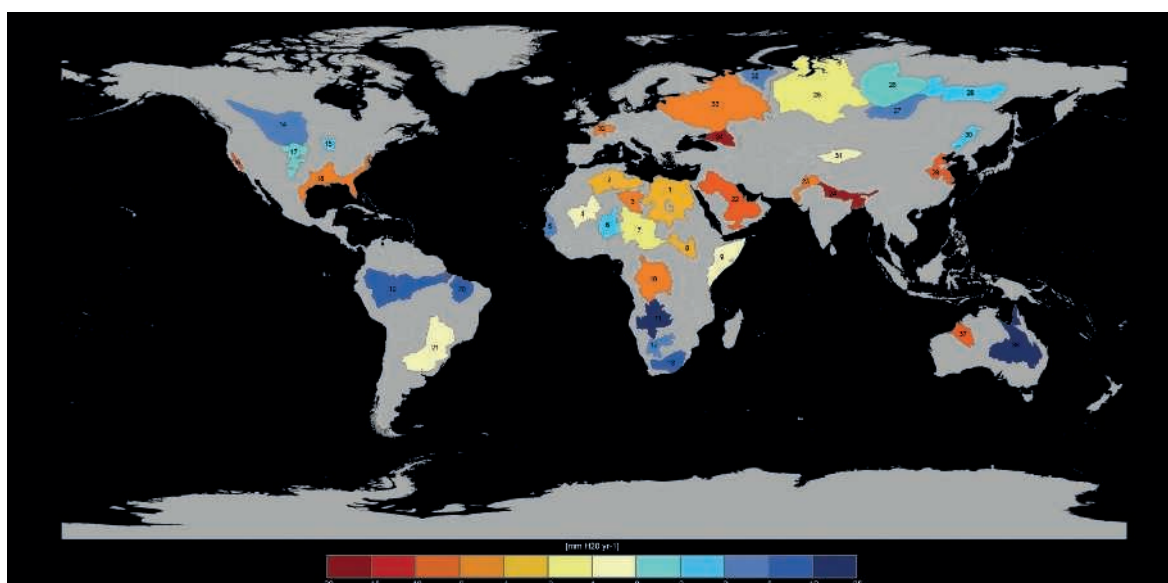
Un último dato: según el Banco Mundial, cerca de 45 millones de metros cúbicos de agua potable se pierden al día, entre otros

### ¿Y si desapareciesen los acuíferos?

En ningún foro científico se plantea un escenario tan extremo en el que pudieran llegar a desaparecer los acuíferos, por lo que es pronto para adelantar cómo afectaría globalmente a la Tierra que esto ocurriera. “Es probable que algunos queden exhaustos, así que habrá que dejarlos recuperar y buscar otras fuentes alternativas. En todo caso, y siempre de forma preventiva, hay que fomentar el ahorro y la eficiencia en el uso del agua. Se insiste en estos días en la búsqueda de nuevas fuentes, de recursos alternativos como el fomento de la reutilización y reciclado de las aguas y la desalación”, comenta Villaroya, quien opina que hay que tener en cuenta todo tipo de agua –según su procedencia– ya que es vital a la hora de planificar cómo se van a satisfacer las demandas hídricas de un país: “Por eso hay que contar también con los acuíferos. No hay que olvidar que desempeñan un papel muy relevante en el origen y mantenimiento de numerosos ecosistemas, contribuyen a la diversificación del paisaje y prestan, entre otras más cosas, servicios de capital importancia, natural y medioambientalmente, para la humanidad”.

motivos por fugas, fallos en las instalaciones o acometidas fraudulentas. Una cantidad –conocida como Agua No Registrada (ANR)– que permitiría abastecer a aproximadamente 200 millones de personas. Razón de más para

cuidar esos espacios tan valiosos que son los acuíferos y no olvidar que –como señala la legislación española desde el siglo XIX– la gestión puede ser privada pero la propiedad del agua siempre es pública. ■



© NASA

Mapa que detalla la situación de los 37 principales acuíferos en milímetro de agua (mmH2O). Cuanto más ‘calido’ su color, más sobreeplotado.



Recreación del posible aspecto que tendría uno de los exoplanetas recientemente descubiertos.

Han sido descubiertos nuevos exoplanetas en la zona de habitabilidad de sus estrellas

## ¡OTRAS TIERRAS A LA VISTA!

Son más de 3.500 los exoplanetas catalogados desde que hace 22 años se descubriera el primero. De ellos, hasta ahora solo nueve reunían las condiciones mínimas para tener posibilidades de albergar vida. En 2017, la cifra se ha disparado y los astrobiólogos se enfrentan con cuatro nuevos candidatos en zonas de habitabilidad: tres en la constelación de Acuario, orbitando la enana roja TRAPPIST 1, y otro, en LHS1140, en la constelación de Cetus, en torno a otra enana roja. En 2018, con el telescopio espacial James Webb ya operando, se dispondrá de datos sobre la composición de sus atmósferas.

Texto: **CÉSAR DE ECHAGÜE**

Ilustraciones: **NASA**



Qué es lo primero que convierte a un exoplaneta en candidato para albergar vida? Que por la distancia a su estrella orbite en la zona habitable, es decir, que la temperatura media de su superficie oscile entre los 0 y 99° centígrados y pueda contener agua en estado líquido. ¿Qué se considera un exoplaneta cercano? Aquel que está situado a menos de 100 años luz.

El pasado mes de febrero, el equipo de Michaël Guillom, astrónomo de la Universidad de Lieja, confirmó que a 40 años luz (350 billones de kilómetros), una estrella enana roja ultrafría, nominada TRAPPIST 1, contaba con un sistema planetario de al menos siete mundos rocosos similares a la Tierra. Tres de los siete, estaban en la, supuestamente, zona habitable. El interés entre los científicos no se hizo esperar, pues el estudio de estos planetas cercanos podría, en un plazo más o menos breve, arrojar luz a una incógnita con la que la humanidad siempre ha especulado y, al mismo tiempo, desechar muchas ideas preconcebidas y antropocéntricas: si hay vida más allá de la Tierra y si se hallará una nueva tierra que colonizar.

Por si todo esto no fuera suficientemente interesante, el descubrimiento de este sistema solar casi ofrece la certeza de que, si se han detectado siete planetas orbitando una estrella cercana, habrá muchos más aún por detectar.

### TRÁNSITOS PLANETARIOS

Ignasi Ribas, investigador del CSIC-IEEC, Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña, doctor en Física y especializado en Astrofísica, lleva quince años dedicado

a investigaciones relacionadas con exoplanetas.

Lo primero que aclara al referirse a TRAPPIST 1 (siglas en inglés del Telescopio Pequeño para Planetas en Tránsito y Planetesimales, ubicado en Chile), es que el descubrimiento no es nuevo, sino una ampliación del que tuvo lugar hace más de un año, cuando en la constelación de Acuario, a 39 millones de años luz, el equipo de Guillom anunció el descubrimiento de dos exoplanetas. “Ahora, lo único que ha sucedido es que se han añadido cinco a esa lista, tres de ellos en la zona en la que se supone puede existir agua líquida; algo imprescindible para la vida tal y como la conocemos”, explica Ribas. “Que se haya prestado tanta atención desde los medios –continúa el físico– ha sido porque, hasta el momento, de los 3.500 exoplanetas detectados, sólo había nueve que reunirían condiciones similares y, por supuesto, cada uno orbitando diferentes estrellas”.

La pregunta es básica, ¿cómo se detectan estos planetas de tamaño similar al de la Tierra a tantos millones de años luz de distancia? Gracias a la observación indirecta. La luz del planeta no es visible, pero sí los efectos que ejerce sobre su estrella. En TRAPPIST 1 –no solo desde el telescopio que da nombre al descubrimiento, sino desde otros ubicados en Marruecos y Canarias– se han percibido los pequeños eclipses que producen estos mundos, cuyas órbitas están perfectamente alineadas, al pasar por delante de su estrella. “Y esto ha sido posible porque se trataba de una estrella enana roja ultrafría –con una tipo G, como el Sol, esto sería inapreciable por su luminosidad– y los planetas están cercanos a su pequeño sol; tanto, que un año

dura, en el caso del más cercano, un día y medio, y 20 días, en el caso del más lejano”, aclara el investigador del CSIC-IEEC. Cercanía que, además, tiene otra consecuencia: las órbitas de estos planetas son sincrónicas por el efecto de la atracción gravitacional, es decir, siempre presentan, como la Luna, un hemisferio iluminado y el otro en la más absoluta oscuridad. Algo que, en principio, no sería un obstáculo para albergar algún tipo de vida, pues en la Tierra, por ejemplo, hay mucha mayor densidad biológica cerca del ecuador que de los polos.

### OBSERVACIÓN REMOTA

Los siete planetas tienen unas dimensiones que suponen ser entre un 25% más pequeños y un 10% más grandes que la Tierra; medida que se ha calculado por la cantidad de luz que bloquean al pasar por delante de su estrella. Del mismo modo, por la forma en que cada planeta es atraído y empujado por sus vecinos del sistema planetario, es probable que su masa sea rocosa, como la terrestre.

Por ahora, de los siete planetas descubiertos, el candidato más cualificado para albergar vida sería el denominado como f (el quinto), que completa una órbita alrededor de la estrella cada nueve días terrestres. Sea como fuere, el siguiente paso a dar, para poder seguir especulando sobre condiciones de vida, es detectar si tienen atmósfera o no y, en caso afirmativo, determinar su composición.

Mercedes López, astrónoma canaria del Centro de Astrofísica Smithsonian de Harvard, especializada en la detección y caracterización de atmósferas en exoplanetas, reconoce que

## El telescopio James Webb podrá analizar los gases de la atmósfera de los planetas y detectar la marca de las moléculas de ozono, metano u oxígeno, que son buenos indicadores de actividad biológica

Lo ideal para conocer la composición de las atmósferas de los exoplanetas sería enviar una sonda para trabajar in-situ, pero eso es imposible con la tecnología actual: “Por eso, para tratar de desentrañar la composición de la capa de gas que envuelve a los planetas utilizamos observaciones remotas. Cuando el planeta pasa por delante de su estrella, parte de la luz de ésta atraviesa la atmósfera del planeta e interacciona con ella, pudiendo ser absorbida por nubes en el planeta o dispersada por moléculas”.

Hasta ahora se han utilizado telescopios en tierra (a los de Chile, Marruecos y Canarias, se sumaron los de Hawái y Sudáfrica) o en el espacio para observar la luz de la estrella y comprobar si se distorsiona al atravesar algún tipo de atmósfera.

### JAMES WEBB

Las observaciones se están ampliando a otros sistemas estelares con el proyecto Speculoos, un complejo de cuatro telescopios que se están construyendo en el Observatorio Paranal de Chile y que permitirá multiplicar por diez la muestra de estrellas observadas en busca de sistemas planetarios. Asimismo, la NASA tiene previsto poner en órbita durante el año en curso el telescopio espacial TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) especialmente diseñado para buscar exoplanetas.

No obstante, es pronto para aventurar información sobre condiciones atmosféricas, pero tampoco habrá que esperar mucho para hacerlo. En octubre de 2018, se espera que sea puesto en órbita, a 1.5 millones de ki-

lómetros de la Tierra, el nuevo telescopio espacial James Webb, que ayudará a resolver estas cuestiones mediante el análisis de los gases de la atmósfera de los planetas de TRAPPIST. Se espera que el sucesor del Hubble, pueda detectar, por ejemplo, la marca de las moléculas de ozono, metano u oxígeno que son buenos indicadores –no definitivos– de actividad biológica en los planetas. Como destacan los investigadores, TRAPPIST 1 supone un avance crucial para buscar vida en otra parte, porque ya se sabe dónde mirar.

Paradójicamente, el James Webb, sin haber entrado en funcionamiento, ya tiene muchos deberes pendientes, pues, con un intervalo de apenas dos meses de diferencia, se anunció el descubrimiento de LHS 1140b, otro prometedor exoplaneta situado a una distancia similar a los de TRAPPIST, pero en la constelación de Cetus”.

### LHS 1140B

Para José Caballero, investigador titular del Centro de Astrobiología del INTA, Instituto Nacional Técnica Aeroespacial, este mun-

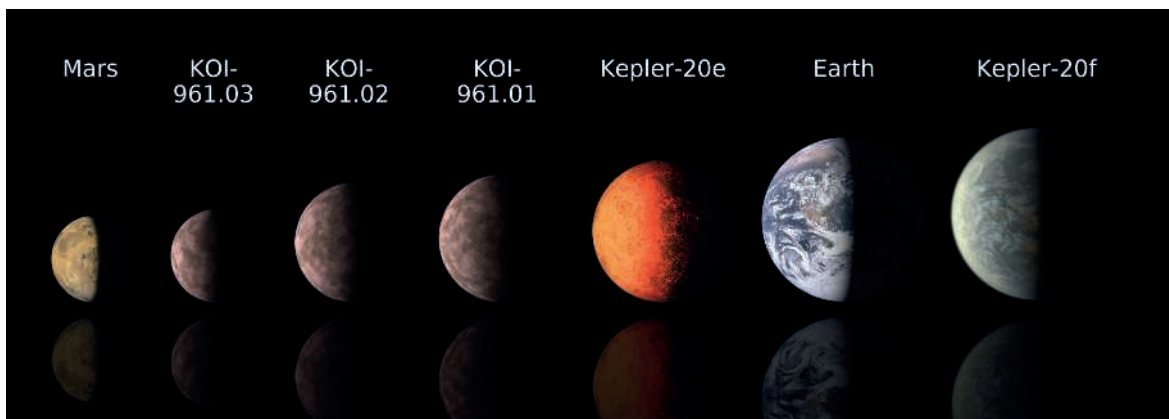
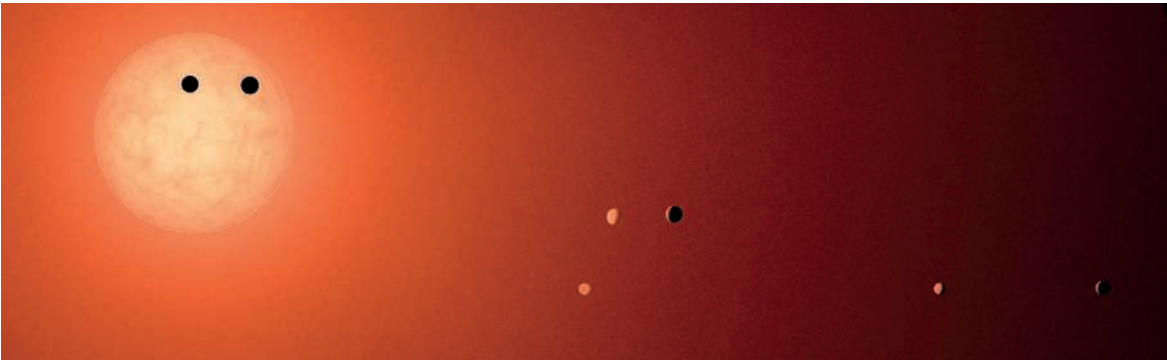


Gráfico en el que se compara los exoplanetas conocidos más pequeños, o planetas que orbitan fuera del sistema solar, respecto a Marte y la Tierra.



El sistema planetario TRAPPIST-1, con su estrella enana ultrafría y sus planetas.

do sería aún mejor candidato para albergar vida que los mencionados. El LHS 1140b es un planeta relativamente pequeño, con un radio de 1,4 respecto a la Tierra, una masa 6,7 veces mayor y una densidad de 2,3 en relación a la de nuestro planeta, por lo que se podría estar hablando de una supertierra cuyo año dura 25 días”.

Caballero considera que se trataría de un planeta oceánico, sin zonas emergidas, algo que complicaría las posibilidades de habitabilidad, pero, como en el caso de los siete planetas del sistema TRAPPIST, del que habrá que esperar a que el nuevo telescopio empiece a operar para obtener datos sobre su atmósfera, pues, como argumenta el investigador del INTA, “la Tierra, sin el efecto invernadero producido por la atmósfera que la envuelve, tendría unas condiciones muy diferentes a las que han permitido la vida”.

### VIDA ‘EXTRATERRESTRE’

La posibilidad de encontrar vida ‘extraterrestre’ es un aliciente que está ‘removiendo’ los círculos científicos más avanzados. Ante el habitual escepticismo que existía hasta la fecha entre la mayoría, la nueva generación de investigadores habla de la posibilidad sin ningún tipo de cortapisa.

Eso sí, la única posibilidad, por ahora, es buscar vida basada en

la química del carbono, “porque es el único proceso para generar vida que conocemos en la actualidad, aunque eso no quiere decir que existan otros sistemas que, por ahora, nos resultarían irreconocibles”, explica Caballero.

Sea como fuere, y gracias al estudio de los exoplanetas, para Ignasi Ribas es posible dar con una pieza más de un puzzle que el ser humano tiene pendiente de resolver: “¿Cuál es el contexto del ser humano en el universo? ¿Somos únicos en el universo o hay vida en otros planetas? ¿Somos una excepción o es lo normal?”.

### PROBABILIDADES

Si hay que atenerse a cuestiones probabilísticas, los expertos apuntan a que desde que en 1995 Didier Queloz y Michel Mayor descubrieron 51 Pegasi b –un gigante, supuestamente gaseoso, a 50 años luz–, se han descubierto alrededor de 3.500 exoplanetas. A ello hay que sumar que se calcula que existen unos 200.000 millones de estrellas solo en la Vía Láctea. Si cada una de estas estrellas tuviera al menos un planeta orbitándola, las posibilidades de que existen planetas similares a la Tierra son milmillonarias.

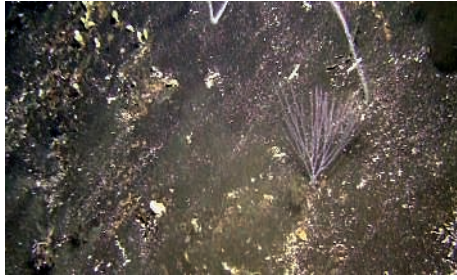
De lo que tampoco dudan los expertos es que la Tierra, en el mejor de los casos, en cientos de millones de años será un planeta inhabitable y no se puede descartar que en esas condicio-

nes habrá que buscar un segundo hogar. Caballero también es optimista respecto a este punto: “Con el tiempo, se podrán estudiar exoplanetas que orbiten estrellas de tipo G como el Sol, se habrá avanzado en sistemas de propulsión y se enviarán sondas robóticas... Nuestro objetivo está muy claro: hay que buscar planetas similares a la Tierra capaces de albergar vida y por supuesto, si es posible, colonizarlos”.

López, la investigadora canaria, se muestra aún más esperanzada con esos avances tecnológicos a la hora de llegar a colonizar otros planetas y se sirve del ejemplo de los famosos hermanos Wright para corroborarla: “Inventaron el avión hace apenas cien años y en la actualidad volamos de Estados Unidos a Europa en unas cuantas horas sin darle mayor importancia... Es, por tanto, muy difícil predecir los avances en medios de transporte que se producirán en otros cien años, pero si algo bueno tenemos como seres humanos es nuestra naturaleza innovadora”.

Esta científica tampoco duda sobre el futuro más inmediato en la investigación del espacio exterior y de sus muchas incógnitas por despejar: “Somos la generación que descubrirá planetas capaces de albergar vida, pero serán las futuras generaciones las que desarrollarán la tecnología para llegar y hacer de alguno de ellos un nuevo hogar. ¿Por qué no?”. ■

## CORALES QUE PREDICEN ERUPCIONES VOLCÁNICAS SUBMARINAS



© Instituto Español de Oceanografía

Corales negros de la isla de El Hierro

El análisis de las muestras tomadas en la erupción volcánica submarina que tuvo lugar en la isla de El Hierro en 2011 ha permitido a científicos de la Universidad de Salamanca –junto con otros investigadores de España, Japón, Reino Unido y Portugal– observar que algunos gases nobles procedentes del magma del manto terrestre quedaron atrapados en el esqueleto de los corales negros meses antes de la erupción. Este hecho les ha llevado a la conclusión de que si se monitorizan estos isótopos de helio de los corales, y el de los olivinos de las rocas ígneas que emitió el volcán, es posible anticipar nuevas erupciones, ya que los isótopos tienen el mismo origen y, por tanto, comenzaron a liberarse con antelación al evento y a los movimientos sísmicos que lo precedieron. ■

## HAY CICLONES GIGANTESCOS EN JÚPITER



© NASA

Polo sur de Júpiter captado por Juno (a 52.000 km).

La nave Juno, lanzada por la NASA en agosto de 2016, ha dado su primera vuelta alrededor de Júpiter y se ha aproximado a unos 4.200 kilómetros de la espesa capa de nubes que rodea al mayor planeta del sistema solar. Los primeros datos enviados por la nave han detectado emanaciones de metano que alteran el clima y un campo magnético que, además de tener una fuerza inesperada, genera auroras espectaculares cuando interacciona con el viento solar. Pero, en este escenario tan sobrecogedor, lo que más ha llamado la atención son unas estructuras ovaladas blanquecinas, que en realidad son gigantesos ciclones, algunos con un tamaño de hasta 1.400 kilómetros de diámetro. ■

## EXPERIMENTO PARA CULTIVAR PLANTAS EN EL ESPACIO



© CSIC

Astronauta de la estación espacial con el experimento.

Como parte de la misión espacial SpaceX-11 de la Estación Espacial Internacional (ISS), un equipo internacional liderado por investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) efectuará un experimento, Seedling Growth-3, para estudiar el cultivo de plantas en condiciones de gravedad cero y cómo ésta afecta a su desarrollo. El objetivo es determinar la viabilidad del cultivo de plantas como apoyo a la exploración humana del espacio y, en concreto, para sostener la presencia de seres humanos en Marte, ya que lo que se persigue es hacer posible el cultivo de especies vegetales de interés en el ambiente espacial. ■



© Museo de Historia Natural Chile

## DESCUBIERTOS LOS RESTOS DE UN GRAN MOSASAURIO

Recreación del mosasaurio.

Los restos fosilizados encontrados en rocas de la Antártida de un mosasaurio, un descomunal animal que vivió hace unos 66 millones de años, a finales del Cretácico, y que se alimentaba de reptiles marinos de gran tamaño, sugieren que este reptil acuático extinto podría superar con creces los 10 metros de largo. Sus descubridores, unos paleontólogos chilenos, creen que se trata de una nueva especie de mosasaurio, al que han llamado *Kaikaiflu hervei*. Fue contemporáneo del *Tyrannosaurus rex* y se extinguió al tiempo que lo hicieron los dinosaurios. ■



## **Apostando por la tecnología e I+D+i**

Centro de Tecnología Avanzada en constante innovación

## **Pasión por la mejora continua**

Excelencia operativa, mejores prácticas y cultura de seguridad

## **Consolidando nuestra internacionalización**

Flexibilidad, exportada más del 85% de la producción

**Passion**  
for  
improvement

[www.ensa.es](http://www.ensa.es)



# EMPRESARIOS AGRUPADOS

Ingeniería y servicios para el Sector Eléctrico.

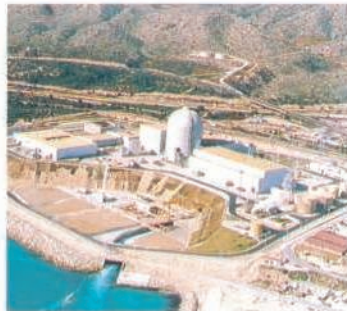
En el campo nuclear ofrecemos nuestra experiencia de ámbito internacional en una amplia gama de servicios para el proyecto, construcción y apoyo a la explotación de centrales nucleares e instalaciones con ellas relacionadas, incluyendo:

- ▶ Consultoría
- ▶ Gestión de Proyectos
- ▶ Ingeniería y Diseño
- ▶ Seguridad Nuclear y Licenciamiento
- ▶ Protección Radiológica
- ▶ Adquisición de Equipos
- ▶ Supervisión de Construcción
- ▶ Pruebas y Puesta en Marcha
- ▶ Garantía de Calidad
- ▶ Apoyo a la Operación y Mantenimiento
- ▶ Evaluaciones de Seguridad
- ▶ Análisis Probabilista de Seguridad
- ▶ Proyecto e Implantación de Modificaciones
- ▶ Gestión de la Configuración
- ▶ Gestión de Residuos Radiactivos de Baja Actividad
- ▶ Proyectos de Instalaciones para Almacenamiento de Combustible Gastado
- ▶ Programas de Alargamiento de Vida
- ▶ Descontaminación y Desmantelamiento

■ Tecnología

■ Experiencia

■ Dedicación



EMPRESARIOS AGRUPADOS, A.I.E. Magallanes, 3 • 28015 Madrid, España • Teléfono (34) 91 309 80 00 - Fax (34) 91 591 26 55  
[www.empre.es](http://www.empre.es)

EMPRESARIOS AGRUPADOS, A.I.E. es una Agrupación de Interés Económico (Ley 12/1991 de 29 Abril)  
constituida por GHESA, TRSA, IBERDROLA Ingeniería y Construcción S.A.U., TRPI y GAS NATURAL FENOSA ENGINEERING, S.L.U.

EMPRESARIOS AGRUPADOS INTERNACIONAL, S.A. es una Sociedad Anónima promovida por los mismos socios.