

# Vida científica

## NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2019

### EN QUÍMICA

En esta breve reseña de la investigación actual dentro del campo de la Química se ha procurado atender en primer lugar a cuestiones de interés básico, así como a propuestas de nuevos métodos, materiales y fuentes de energía. Para completar la exploración se han revisado también algunos estudios de significación química que se están realizando en diversos campos, los cuales enriquecen de un modo u otro nuestros conocimientos científicos y técnicos. Entre ellos tiene un interés especial la investigación de las bases moleculares de fenómenos biológicos tales como las sensaciones de sueño y frío, o la evolución de las especies, y ha parecido interesante mencionar igualmente la creciente racionalización de recursos químicos destinados a las actividades agrícolas y la exploración con sentido químico del espacio exterior.

Como es habitual en esta sección, los trabajos comentados se identifican por sus autores, el título de la revista donde se han publicado (convenientemente abreviado), el volumen correspondiente y las páginas que abarcan, o bien el número del artículo según la notación DOI en uso, con objeto de facilitar su localización a los lectores interesados. El año de publicación es 2019, salvo que se indique que se trata de 2018.

### ALGUNAS CUESTIONES FUNDAMENTALES

Sin duda, una de las cuestiones científicas más fundamentales que se pueden plantear es la edad del Universo: ¿cuándo empezó todo?, y en estrecha relación con ella, la duración de la materia que nos rodea. Para dilucidarlas se han propuesto varias teorías, tan complejas como debatidas. Ahora ha surgido la circunstancia afortunada de poder centrar el problema por vía experimental, basándose en un ele-

mento químico tan veterano que su vida media sobrepasa en muchos órdenes de magnitud la edad del Universo. Se ha tenido la suerte de observar directamente la captura de doble electrón en el  $^{124}\text{Xe}$ , con la emisión de dos neutrinos, utilizando el detector de materia oscura XENON1T (XENON Collaboration, *Nature*, **568**, 532-535). La vida media resultante para este isótopo es de  $1,8 \times 10^{22}$  años, la mayor que se ha podido medir hasta ahora.

En un ámbito más familiar, y no es porque una y otra vez se trate del agua en esta sección, se ha estudiado el comportamiento del hielo a baja temperatura y alta presión, obteniendo unos resultados que cuestionan expectativas acerca de las propiedades del agua (Tulk y col., *Nature*, **569**, 542-545). Se ha podido comprobar que cuando el hielo se comprime a baja temperatura con suficiente lentitud, se producen formas cristalinas y densas de hielo IX, XV y VIII, en lugar de otras especies amorfas, relacionadas con el líquido sobreenfriado, que sólo se producen si la compresión es muy rápida (Figura 1). Las condiciones del experimento no son habituales en nuestro planeta, pero pueden ser compatibles con otros cuerpos celestes, por lo que se considera que el hallazgo tendría posibles repercusiones en la exploración espacial.

Otro descubrimiento de alcance ha demostrado que se puede superar el límite de velocidad establecido por el principio de Sabatier para una interacción óptima entre el catalizador y el sustrato. Cuando dicha interacción cumple la condición de no ser ni muy débil ni muy fuerte, resulta la máxima actividad catalítica posible para un sitio de enlazamiento individual. En esta ocasión se ha simulado la actuación de un catalizador heterogéneo, al que se aplican ondas para que oscile entre dos estados electrónicos. Con este método dinámico se puede regular a voluntad la velocidad de la reacción, obteniendo una actividad catalítica que excede en 4 órdenes de magnitud al valor máximo previsto (Ardagh y col., *ACS Catal.*, DOI 10.1021/acscatal.9b01606). Los hallazgos de este tipo, una vez puestos en práctica, permitirán

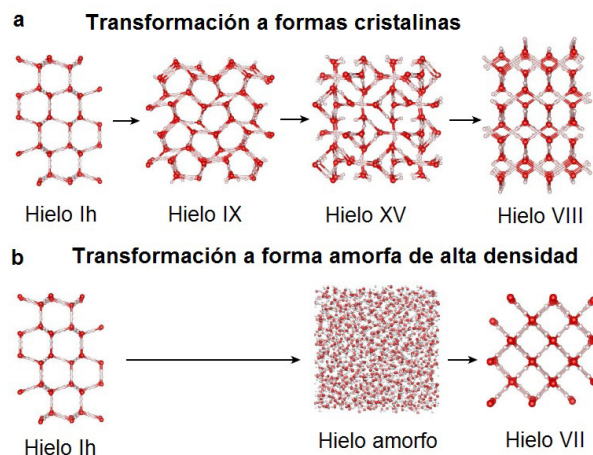
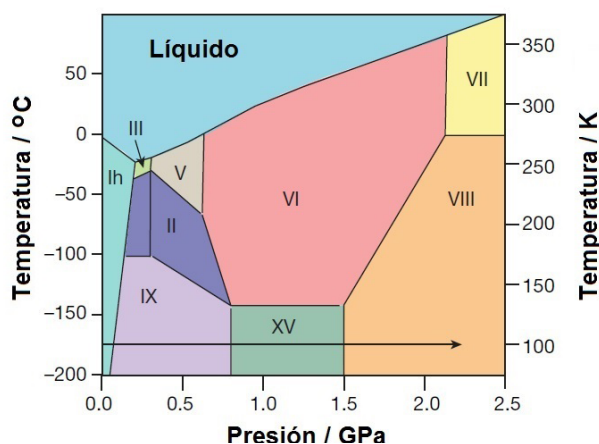


Figura 1. Izquierda: Diagrama de fases de equilibrio de los estados cristalinos del hielo en los intervalos de presión y temperatura relevantes para el experimento realizado, que ha seguido el camino señalado por la flecha horizontal. Derecha: Esquema de los cambios de fase del hielo Ih cuando se comprime a la temperatura de 100 K. a) Transformación entre varias formas cristalinas mediante una compresión lenta. B) Transformación con una compresión rápida, en la que se produce una forma amorfa de alta densidad. Según Tulk y col. (2019).

incrementar la velocidad y de paso rebajar el costo de muchos procesos químicos de interés industrial.

No todas las cuestiones de fondo se refieren a descubrimientos de vanguardia. Desde hace tiempo se está procediendo a redefinir las unidades básicas que componen el Sistema Internacional de Unidades (SI), asentado en la comunidad científica desde hace bastantes años, con la intención de asignarles valores relacionados con constantes fundamentales. De un modo coloquial, se podría resumir esta labor diciendo que nuestro entrañable kilogramo está cambiando para siempre. No será ya la masa de un prototipo internacional tal como lo hemos conocido, pues este patrón material se puede deteriorar con el tiempo. Un trabajo particularmente instructivo ha examinado la evolución de la metrología química, analizando la relación entre la cantidad de sustancia, cuya unidad es el mol, y las entidades elementales que se tienen que contar para definirla (Brown, *Metrología*, **55**, L25-L33, 2018).

En relación con este problema se encuentra la constante de Avogadro, ya que la magnitud de un mol queda establecida al fijar para ella el valor exacto de  $6,022140857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (digamos “sin error”). No obstante se puede determinar, con la incertidumbre inevitable de cualquier magnitud experimental, contando los átomos que hay en un sistema determinado; por ejemplo, en monocristales enriquecidos de  $^{28}\text{Si}$ . Este método ha dado recientemente el valor

numérico de  $6,022140588 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  con un error de  $1 \times 10^{-8}$  (Fujii y col., *Metrología*, **55**, L1-L4, 2018). Por tanto, la 7ª cifra decimal de este valor ya es significativa, y difiere del número fijado en el sistema SI con pretensiones absolutas.

## NUEVOS MÉTODOS QUÍMICOS DE DETECCIÓN

Dentro de la investigación de sensores químicos se ha ensayado recientemente un nuevo método que permite detectar metales poco frecuentes, como son los elementos lantánidos o “tierras raras”, de modo sensible y rápido. Estos metales, de los que son ejemplos el Praseodimio, Neodimio y Disprobio, están presentes en nuestros teléfonos móviles actuales, bien como componentes de las aleaciones magnéticas necesarias para que funcionen el micrófono y los altavoces, o bien como aditivos necesarios para avivar los colores de las pantallas o para que el dispositivo responda con una vibración al recibir una llamada. En el trabajo se ha utilizado un sensor fluorescente altamente selectivo, en concreto la proteína designada como lanmodulina, que presenta afinidad a nivel picomolar hacia los elementos lantánidos, o sea que la constante de asociación correspondiente es muy elevada, mientras que la respuesta hacia otros iones metálicos más comunes es mucho más débil (Mattocks y col., *JACS*, **141**, 2857-2861). En conclusión, este procedimiento no sólo puede dar valio-

sa información acerca de las propiedades biológicas de los lantánidos, sino que también aporta un método analítico útil para muestras de interés industrial y ambiental (Figura 2).

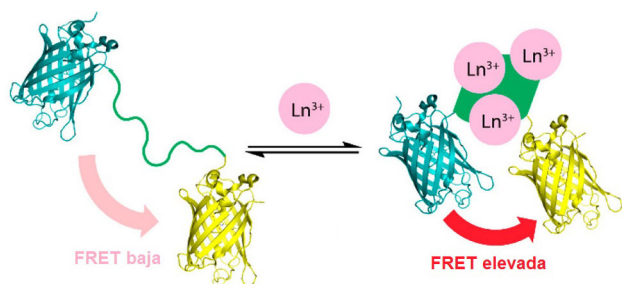


Figura 2. Diseño de un sensor fluorescente para la detección de metales lantánidos basado en la proteína lanmodulina. El sensor presenta una respuesta en forma de pares FRET (acrónimo de Transferencia de Energía de Resonancia de Förster) más o menos intensa, dependiendo de la presencia de iones lantánidos trivalentes. Según Mattocks y col. (2019).

Otros métodos de detección se basan en la transducción de señales mecánicas y químicas. Así, los mecanóforos son compuestos que sufren una reacción química cuando son estimulados por una perturbación mecánica. Se han diseñado mecanóforos basados en rotaxanos que permiten disponer de polímeros con capacidad de fosfoluminiscencia blanca, la cual se activa por medios mecánicos (Sagara y col., ACS Cent. Sci., 5, 874-881). Estos polímeros tienen la utilidad práctica de que nos pueden avisar con antelación ante riesgos de roturas por tensiones mecánicas.

## NUEVOS MATERIALES

Una interesante línea de estudio de los nuevos materiales se centra en la optimización de dispositivos termoeléctricos, que como tales son capaces de generar energía mediante la interconversión de señales térmicas y eléctricas. Por ello es interesante conocer los efectos de la temperatura y presión en las propiedades ópticas y vibratorias de un material termoeléctrico tal como el seleniuro de estaño SnSe, cuya eficiencia del 25% a temperaturas elevadas es la mayor que se conoce (Figura 3). Este estudio, realizado con radiación de sincrotrón, ha demostrado que el SnSe presenta también buen rendimiento a

temperatura ambiente, pero a condición de que se le aplique una elevada presión (Efthimiopoulos y col., Phys. Chem. Chem. Phys., 21, 8663-8678).

Otra propiedad intrigante, a la que se ha aludido en una edición anterior de esta sección, es la “frustración”, que se puede definir como la incapacidad de un sistema para adoptar un estado en que la energía de todas sus interacciones tome un valor mínimo. Esta situación caracteriza a muchos sistemas desordenados, de los que un ejemplo típico es un triángulo de espines acoplados de tal modo que todas sus interacciones sean antiferromagnéticas. Se ha estudiado un sistema químico de este tipo, la red triangular formada por el  $\text{Cs}_2\text{CuCl}_4$ , con el objetivo de valorar cómo el hamiltoniano cuántico de un sistema de espines resulta afectado por los cambios de presión bajo condiciones de frustración geométrica (Zvyagin y col., Nature Communications, 10:1064, 5 págs.).

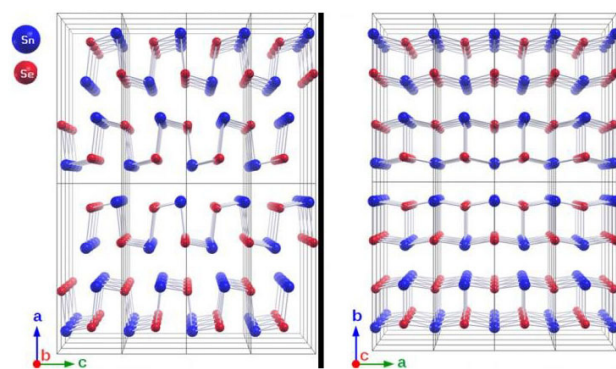


Figura 3. Izquierda: A temperatura ambiente, el SnSe presenta una estructura cristalina ortorrómbica de numerosas capas. Derecha: A la temperatura de 500 °C sufre una transición de fase de segundo orden, a consecuencia de la cual aumenta la simetría cristalina del cristal y surgen excelentes propiedades termoeléctricas. Según Efthimiopoulos y col. (2019).

## NUEVAS FUENTES DE ENERGÍA

En la tecnología de la iluminación se denomina “fósforo” a cualquier sustancia que presente el fenómeno de luminiscencia, tales como las que se incluyen en los diodos emisores de luz o LEDs. En un LED de luz blanca típico, se utilizan “fósforos” de luz roja y amarilla – verde, que son excitados por un diodo de luz azul, de tal modo que la mezcla óptica de todos ellos produce la luz blanca deseada. El diodo azul presenta un comportamiento muy satisfactorio, por lo que la investigación de sustancias con mayor efi-

ciencia luminiscente se centra en conseguir mejores “fósforos”. Así se ha obtenido un nuevo “fósforo” de luz roja, cuya fórmula química es  $\text{Sr}[\text{Li}_2\text{Al}_2\text{O}_2\text{N}_2]:\text{Eu}^{2+}$  y que se designa en forma abreviada como SALON (Hoerder y col., *Nature Communications*, 10:1824, 9 págs.). Aunque el ojo humano es poco sensible a la luz roja, esta sustancia destaca porque su estructura cristalina, que se ha diseñado a propósito (Figura 4), le posibilita emitir luz dentro de los límites del espectro visible. En contraste, otras sustancias utilizadas hasta ahora emiten parte de su luz dentro de la región visible y el resto en la región infrarroja, por lo que sólo se aprovecha una fracción del total. Si la emisión de luz se optimiza dentro de la región visible, se obtiene una iluminación de mayor rendimiento, con el consiguiente ahorro de energía. El hallazgo ha sido patentado y será utilizado por la firma OSRAM.

En esta línea de actuar sobre la estructura química para mejorar la eficiencia energética, se ha comprobado que la simple adición de carbono es capaz de transformar un material semiconductor incrementando su rendimiento. En concreto, el semiconductor disulfuro de wolframio  $\text{WS}_2$ , que se presenta en la forma de monocapas bidimensionales, se ha dopado mediante grupos CH, los cuales ocupan las vacantes de S disponibles hasta alcanzar una proporción del 2% (Zhang y col., *Sci. Adv.*, 5, eaav5003, 8 págs.). Con ello se consigue un sistema extrínseco de tipo p que coexiste con el sistema original, que es de tipo n. Como consecuencia se produce una reducción considerable de la brecha de energía que separa la banda de valencia y la banda de conducción, desde 1,98 a 1,83 eV, lo que favorece la movilidad de los electrones, mejorando así de modo notable la eficiencia del dispositivo (Figura 5).

Al centrar la atención en las fuentes de energía utilizadas en la actualidad, no podía faltar una mirada hacia las baterías de litio. Como es habitual en este campo, las investigaciones se orientan hacia la mejora de los materiales que forman el ánodo o electrodo negativo, que suele ser de grafito, y el cátodo o electrodo positivo, que suele ser un óxido metálico; sin olvidar el electrolito, normalmente una sal de litio disuelta en un compuesto orgánico para evitar el riesgo de una reacción vigorosa con el agua. Las alternativas más populares se basan en sustituir el grafito del ánodo por materiales como el silicio, grafeno, óxidos diversos o incluso el propio litio metá-

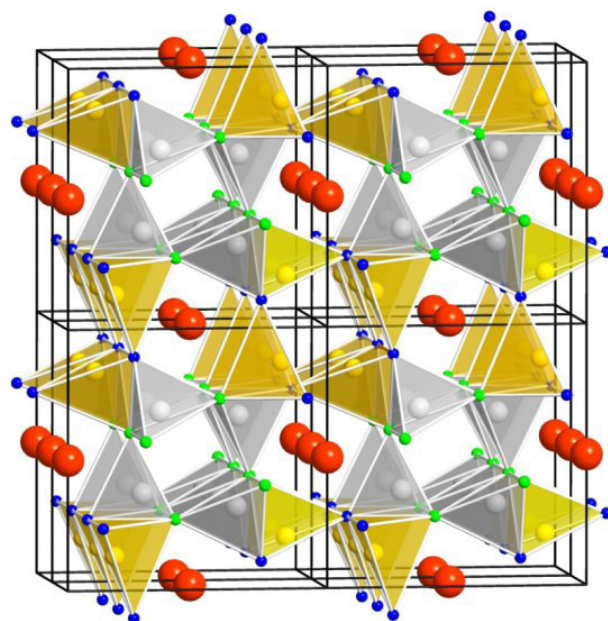


Figura 4. Estructura cristalina del nuevo “fósforo” para luz roja designado como SALON, que origina un excelente comportamiento de luminiscencia en la región visible. Código de colores: rojo = Sr, azul = O, verde = N, tetraedros amarillos =  $[\text{LiO}_3\text{N}]^{8-}$ , tetraedros grises =  $[\text{AlON}_3]^{8-}$ . El activador  $\text{Eu}^{2+}$  sustituye en parte al  $\text{Sr}^{2+}$ . Según Hoerder y col. (2019).

lico; así como en utilizar para el cátodo varios materiales cerámicos compatibles con el ánodo, con o sin litio, pero a poder ser con vacantes en su estructura cristalina. Con estos avances se espera producir baterías con una recarga más rápida y mejor rendimiento en general.

En relación con el uso de litio metálico para el ánodo, se ha conseguido caracterizar por fluorescencia la distribución de litio activo en dicho electrodo (Cheng y col., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 10.1002/anie.201900105), concluyendo que el método permite observar adecuadamente el deterioro progresivo de la célula y así optimizar su fabricación. En lo que respecta a los materiales del cátodo, se ha ensayado el uso de escamas de disulfuro de vanadio ( $\text{VS}_2$ ), revestidas de nanocapas de disulfuro de titanio ( $\text{TiS}_2$ ), que contribuyen a mejorar su estabilidad. Como curiosidad, se puede señalar que por un capricho del destino, los dos primeros autores de este último estudio se apellidan igual que el elemento litio (Li, Li y col., *Nature Communications*, 10:1764, 10 págs.). Y también como curiosidad, merece destacarse la publicación del primer libro científico de investigación pro-

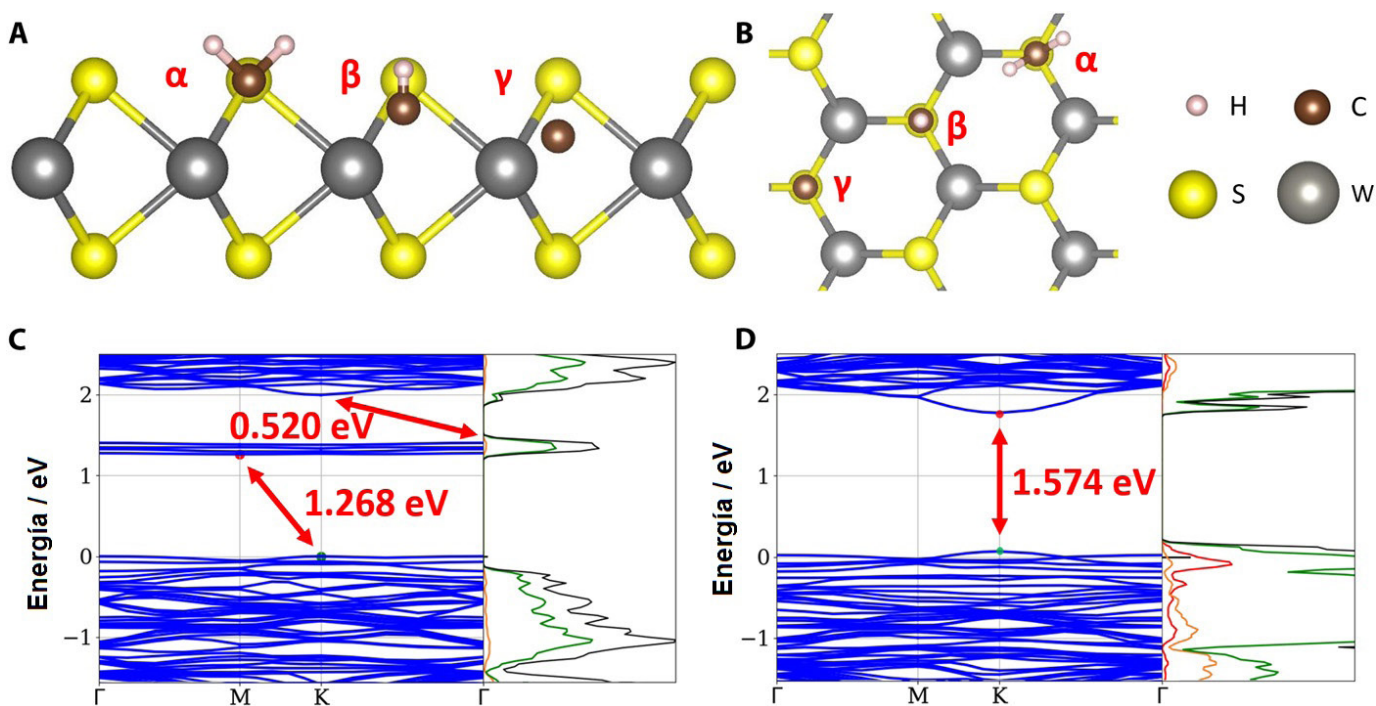


Figura 5. Simulaciones de posibles posiciones de dopado y estructuras de las bandas de energía resultantes. (A) y (B): Modelo de las posiciones de dopado  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  para especies tales como C, CH y CH<sub>2</sub>. (C): Estructura de bandas y densidad de estados del WS<sub>2</sub>. (D): Estructura de bandas y densidad de estados del WS<sub>2</sub> dopado con grupos CH en posición  $\beta$ . Según Zhang y col. (2019).

ducido por una máquina, que se cita aquí por tratarse de una revisión bibliográfica de los últimos avances en baterías de litio. El texto ha sido compuesto mediante un algoritmo de aprendizaje automático que ha conseguido resumir la información reciente de modo bastante aceptable, evitando a los interesados la exploración siempre fatigosa de una bibliografía cada vez más inabarcable (Beta Writer, *Lithium-Ion batteries. A machine-generated summary of current research*, Springer Nature Switzerland AG 2019). Con los continuos avances de la Inteligencia Artificial, no es imposible que las revisiones que deben elaborar continuamente los científicos para estar al día en su trabajo disfruten pronto de estos beneficios.

Otro tema recurrente en el área de las fuentes de energía renovable es la producción de hidrógeno destinado a pilas de combustible. Se ha realizado un paso adelante en esta dirección utilizando un reactor químico capaz de aproximarse a las condiciones de operación termodinámicamente reversibles. Este refinamiento permite superar las pérdidas inevitables que se producen bajo las condiciones ordinarias, que son irreversibles (Metcalf y col., *Nature Chemistry*, DOI 10.1038/s41557-019-0273-2). El re-

actor se ha aplicado a la producción de hidrógeno mediante la conocida reacción del gas de agua, estudiada en todos los textos básicos de Química, la cual constituye un método esencial para la obtención de hidrógeno por vía sostenible.

Un problema de índole similar que se plantea con frecuencia es la conversión del dióxido de carbono para obtener combustibles líquidos. Se pretende cumplir un proceso cíclico que, si bien no reduciría el efecto invernadero, al menos serviría para atenuar su extensión y mantenerlo entre ciertos límites. Un procedimiento ensayado recientemente se basa en la fotosíntesis artificial, a fin de disponer de un método para almacenar la energía solar, la cual es intermitente, en la forma de compuestos químicos estables que se producen mediante ella. Se han obtenido hidrocarburos de reducida longitud de cadena (C<sub>1</sub> a C<sub>3</sub>) a partir de la activación del CO<sub>2</sub>, conseguida mediante la excitación plasmónica de nanopartículas de oro, contando con la asistencia de un líquido iónico para estabilizar los intermedios con carga que se producen durante la reacción (Yu y Jain, *Nature Communications*, 10:2022, 7 págs.).

## QUÍMICA DE LAS SENSACIONES

Los receptores humanos de melatonina MT<sub>1</sub> y MT<sub>2</sub> son un tipo especial de receptores acoplados a proteínas G (cuyas siglas en inglés son GPCR) que actúan como transductores de señales a través de la membrana celular, regulando los patrones que marcan el funcionamiento de los ritmos circadianos y del sueño. En vista de su importancia para nuestras actividades cotidianas, algunas investigaciones del desarrollo de fármacos se centran en ambos receptores para abordar con buenas expectativas el tratamiento del insomnio, de los trastornos de los ritmos circadianos y del estado de ánimo, e incluso de alteraciones tan graves como el cáncer y la diabetes. Como en tantas ocasiones, es evidente que un conocimiento preciso de la estructura molecular se hace necesario para comprender la función que emerge de ella, con lo que se pueden conseguir unas orientaciones muy valiosas para proyectar con buen sentido los estudios enfocados a la salud humana.

Dentro de esta línea de trabajo son destacables dos estudios recientes que han permitido obtener con cierto detalle los primeros mapas moleculares de ambos receptores. El primero de estos estudios ha establecido las bases estructurales del reconocimiento de ligandos en el receptor de melatonina MT<sub>1</sub> (Stauch y col., Nature, DOI 10.1038/s41586-019-1141-3). Por otra parte, en el segundo estudio (Johansson y col., Nature, DOI 10.1038/s41586-019-1144-0) se ha analizado la estructura del receptor MT<sub>2</sub> con una resolución de unos 3 Å, mediante un láser de electrones libres de rayos X (XFEL), encontrando diferencias significativas con respecto al receptor MT<sub>1</sub> (Figura 6). Estos resultados permiten comprender mejor los fundamentos de la selectividad entre ambos tipos de receptores y dilucidar cómo actúan los mecanismos de enlazamiento de ligandos en cada caso, aportando una información esencial para el diseño de agentes terapéuticos más eficaces.

Qué duda cabe que además del sueño, otro factor que condiciona el comportamiento de los seres vivos es el frío. En un estudio reciente se ha comprobado que los canales de sodio Na<sub>v</sub>1.8 y Na<sub>v</sub>1.9 contribuyen a la sensación de frío, al menos en ratones (Luiz y col., PNAS, **116**, 3811-3816). Los mecanismos con que se produce dicha sensación en las neuronas son de gran complejidad, pero se espera extender este es-

tudio para comprender cómo sienten el frío otros seres vivos, incluidos los seres humanos. Así podrían surgir nuevos tratamientos para el alivio de otras sensaciones, como el dolor.

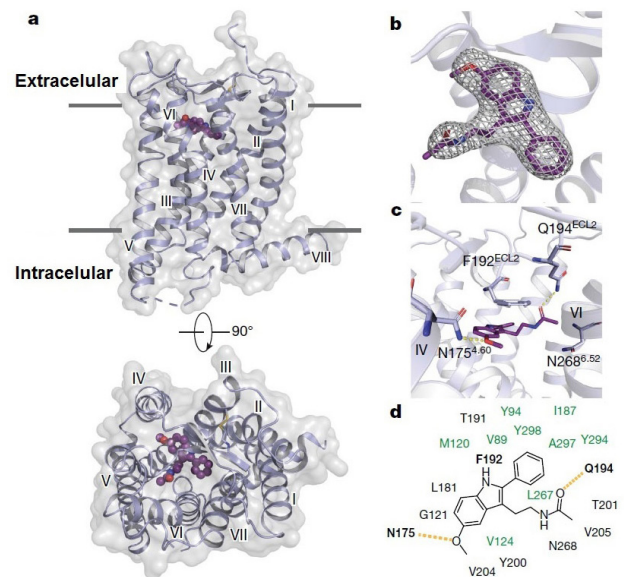


Figura 6. Estructura del receptor de melatonina MT<sub>2</sub>. (a) Estructura canónica (en color violeta), donde se sitúa al ligando 2-fenil melatonina (en púrpura) dentro del bolsillo de enlazamiento y se señalan las fronteras aproximadas de las membranas (en gris). Un giro de 90° muestra al receptor visto desde el lado extracelular. (b) Representación de la densidad electrónica del ligando. (c) Detalle del bolsillo de enlazamiento con los residuos implicados en la interacción con el ligando. (d) Esquema de los residuos que interactúan con el ligando, destacando los que pertenecen al sub-bolsillo hidrofóbico (en verde). Los enlaces de hidrógeno se representan como líneas amarillas discontinuas en (c) y (d). Según Johansson y col. (2019).

## QUÍMICA DE LA EVOLUCIÓN BIOLÓGICA

Los vivos colores que adornan el plumaje de los pájaros no sólo nos alegran la vista, sino que también nos pueden enseñar muchas cosas acerca de los mecanismos químicos que subyacen en la evolución de las especies. Según el célebre paleontólogo George Gaylord Simpson (1902-1984), uno de los principales autores de la teoría evolutiva, la dependencia mutua entre especies determina el progreso de la evolución. Esta hipótesis es muy difícil de probar experimentalmente, porque las interacciones implicadas son extraordinariamente ubicuas y efímeras. No

obstante, se ha encontrado una pista prometedora en las rutas bioquímicas que producen la diversidad de los colores en los pájaros (Badyaev y col., *Nature Communications*, 10:2022, 7 págs.). En efecto, los pájaros convierten los colorantes carotenoides contenidos en su dieta en otras moléculas, necesarias para fines tan diversos como la visión, la inmunidad o la pigmentación de sus plumas (Figura 7). Al analizar la estructura de miles de estas rutas bioquímicas en cerca de 300 especies, se ha encontrado que su evolución sigue ciclos de dependencia externa. Se puede deducir que la interacción entre las especies que forman parte de una comunidad ecológica sería un factor condicionante de la rapidez con que dichas especies se diversifican y evolucionan.

## QUÍMICA AGRÍCOLA

De acuerdo con la sensibilidad actual de nuestra sociedad, la agricultura moderna está orientada hacia la producción de alimentos de calidad, bajo la condición de preservar adecuadamente el medio ambiente y los recursos naturales, entre los que destaca la fertilidad de la tierra. Por tanto se debe garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal o en la mejora de las características del suelo cumplen al menos dos requisitos fundamentales: uno es la eficacia agronómica, y otro es la ausencia de efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente. Se abre así un importante campo para la química aplicada a la agricultura, uno de cuyos objetivos priori-

tarios ha sido siempre la producción de fertilizantes y biocidas; si bien en la actualidad, además de ser tanto o más eficaces que antaño, dichos productos han de ser necesariamente selectivos y respetuosos con nosotros y con el medio ambiente.

En esta línea de actuación sería deseable disponer de fertilizantes amoniacales de producción limpia, o como se suele decir ajustada, así como de bajo costo. Un objetivo importante es la obtención de amoníaco a partir de nitrógeno gaseoso, utilizando otro procedimiento diferente a la síntesis tradicional de Haber – Bosch, la cual consume mucha energía porque transcurre a temperaturas y presiones muy elevadas. Se ha encontrado que la combinación de yoduro de samario ( $\text{SmI}_2$ ) con alcoholes o agua permite que la fijación del nitrógeno sea catalizada por complejos de molibdeno bajo condiciones ambientales mucho más suaves (Ashida y col., *Nature*, **568**, 536–540).

Por otra parte, la tendencia actual de muchas legislaciones es que tanto la aprobación de una sustancia activa para su uso como biocida, como la autorización y puesta en el mercado de los productos que la contengan, han de superar una evaluación previa de los riesgos para la salud y el medio ambiente derivados de su utilización. Por ello el uso de biocidas naturales está adquiriendo una importancia creciente. Dentro de esta tendencia, la firma escocesa Aqualution Systems ha abordado la producción de ácido hipocloroso HOCl en condiciones sostenibles (Niemiec, *Chemistry World*, 12 de abril de 2019).

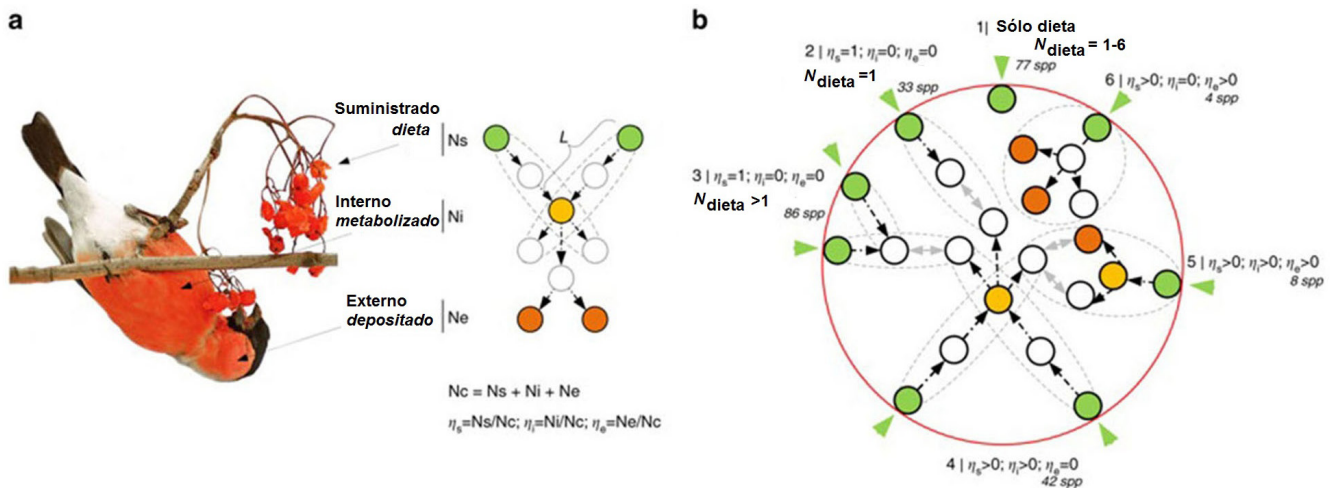


Figura 7. Correspondencia funcional de las estructuras que controlan las redes metabólicas de los carotenoides en las aves. (a) Nodos de control clasificados según los conceptos de dieta (Ns), metabolizados (Ni) y depositados (Ne). (b) Redes metabólicas de las especies estudiadas, agrupadas por sus esquemas de control. Según Badyaev y col. (2019).

Este producto es un biocida natural que resulta unas 300 veces más efectivo que el hipoclorito de sodio NaClO, cuya disolución en agua es bien conocida como la popular lejía. El procedimiento propuesto convierte sal común en HOCl sin impurezas tóxicas y consigue un ahorro del orden del 80% en reactivos, agua y consumo de energía en comparación con la producción industrial seguida hasta ahora (Figura 8).

## QUÍMICA DE LA EXPLORACIÓN DEL ESPACIO EXTERIOR

Una tarea asociada a la investigación espacial en la que la Química puede tener una importante contribución es la de facilitar que respiren las tripulaciones que intervengan en las próximas exploraciones del planeta Marte, quizá no tan lejanas como pue-

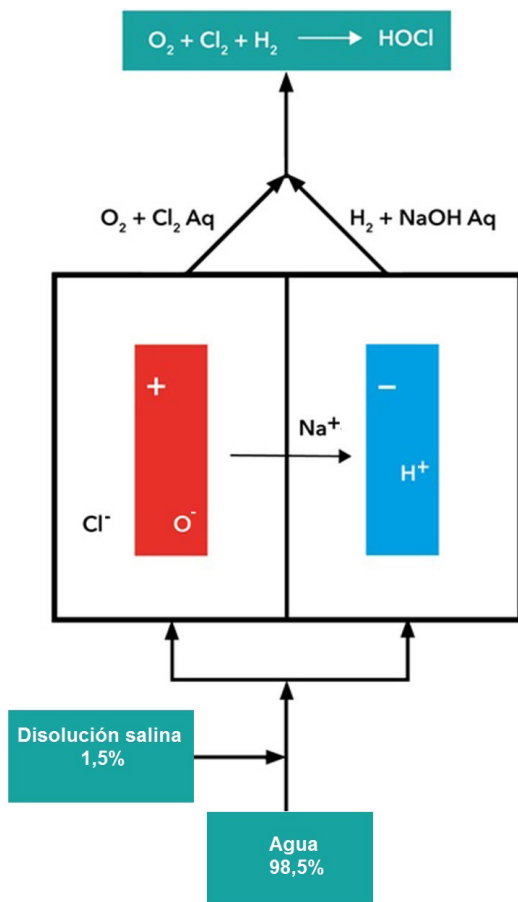


Figura 8. Organigrama del procedimiento de obtención de ácido hipocloroso estable HOCl. Se basa en la inyección de una disolución salina en un flujo de agua que se conduce hacia el interior de una célula de electrodiálisis, donde se generan los reactivos que dan el producto final. Según la firma Aqualution Systems, reproducido por Niemiec (2019).

da parecer, disfrutando de suficiente autonomía. La producción de oxígeno respirable fuera de nuestro planeta se puede inspirar en los cometas, que emiten una cierta cantidad de dióxido de carbono  $CO_2$  que se convierte en oxígeno molecular  $O_2$ . Se supone que la fuerza directriz del proceso es la energía cinética de los choques de las moléculas de  $CO_2$  contra la propia superficie del cometa, donde se disocian para dar  $O_2$ . Para confirmar que la presunta disociación transcurre por vía intramolecular, se ha investigado en el laboratorio cómo se comportan las moléculas de  $CO_2$  al colisionar con superficies de oro exentas de oxígeno (Yao y col., Nature Communications, 10:2294, 7 págs.). En efecto, se rompen para dar directamente moléculas de  $O_2$  (Figura 9).

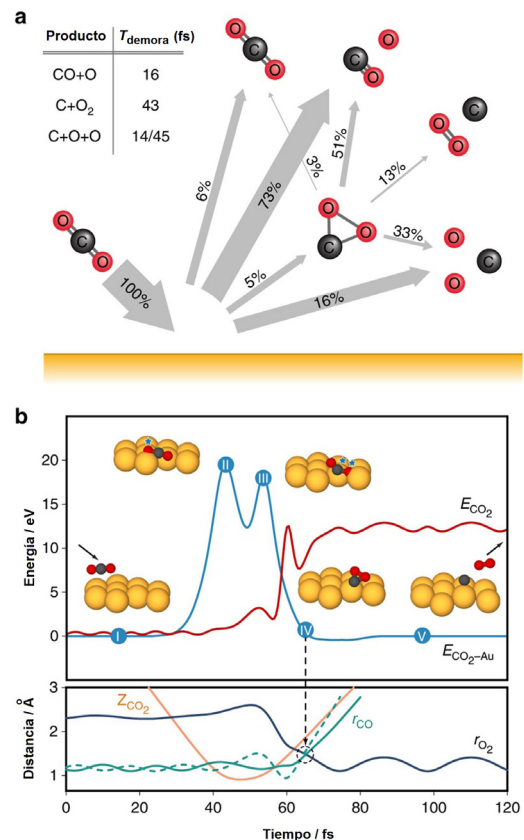


Figura 9. Esquema del proceso de colisiones de moléculas de  $CO_2$  contra una superficie de oro. (a) Rendimientos de los productos de disociación neutra y tiempos promedio de demora de los canales de disociación respecto del punto de mayor aproximación del  $CO_2$  a la superficie. (b) Energética a lo largo de una trayectoria ilustrativa de colisión del  $CO_2$  que lleva a la formación de  $O_2$  sobre la superficie de oro. Según Yao y col. (2019).



Otro problema de interés general es la constitución del Sol: ¿cómo se comporta la materia en las condiciones extremas de la atmósfera solar? Un reciente trabajo aporta información de interés acerca del plasma o “cuarto estado” de agregación de la materia, un fluido similar al estado gaseoso, pero inestable y con cargas eléctricas. De este estado se sabe muy poco ya que no se encuentra naturalmente en nuestro planeta, pero el Sol constituye un laboratorio en condiciones adecuadas para estudiarlo en un medio natural. Con esta orientación se ha conseguido detectar una fuente pulsante de radiofrecuencias durante una tormenta solar, que se puede relacionar con la inestabilidad del plasma (Carley y col., *Nature Communications*, 10:2276, 12 págs.). Además de su interés intrínseco, la información que se obtiene con este tipo de estudios es clave para el futuro desarrollo de generadores de energía eficientes, seguros y

limpios en nuestro propio mundo.

Ya que esta reseña se inició con el gran tema científico de la edad del Universo, puede encontrar un final adecuado con un comentario más químico acerca de las primeras moléculas que aparecieron en el espacio. Merece destacarse la detección por espectroscopía de terahercio del ion hidruro de helio  $\text{HeH}^+$  en la nebulosa planetaria NGC 7027 (Güsten y col., *Nature*, **568**, 357-359). Se cree que este compuesto fue el primero que se formó en el universo y que a su vez dio paso a la molécula de hidrógeno, que es la más sencilla de la Química que estudiamos hoy.

Fernando Peral Fernández

*Dpto. de Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas*