

NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2014

EN QUÍMICA

Como se ha comentado en otras ocasiones en esta misma sección, la evolución de la Química actual se beneficia tanto de las investigaciones tradicionales que se realizan en las áreas de la estructura molecular y de las reacciones químicas, como del progreso de aplicaciones más multidisciplinares orientadas hacia nuevos materiales, avances biosanitarios y fuentes de energía alternativas a las actuales.

Por tanto, resulta muy informativo explorar las novedades de la Química que se centren en estas líneas de evolución. Algunas de ellas siguen la pista de hallazgos anteriores, en tanto que otras permiten descartar unas conclusiones previas que no se han confirmado. Junto a unas y otras no faltan contribuciones originales, de las que cabe esperar una continuidad futura. En esta ocasión se ha podido constatar que ciertos conceptos básicos de la Química siguen nutriendo la investigación actual, así como que algunos materiales actúan como factor unificador de las aplicaciones más novedosas.

Se comentan a continuación algunas muestras representativas de todas estas tendencias, en las que se citan los autores de las publicaciones correspondientes, con el título abreviado de la revista, el volumen y las páginas, a fin de facilitar su posible consulta a los lectores interesados. El año de publicación es 2014 en todos los casos.

ESTRUCTURA MOLECULAR

El boro es un elemento bien conocido por los estudiantes de Química por su tendencia a formar compuestos de gran diversidad estructural, que ponen en cuestión algunos dogmas de la teoría del enlace químico (Boldyrev y col., *Acc. Chem. Res.*, **47**, 1349-1358). Tomando inspiración de las nanoformas del carbono, tan populares actualmente, se están investigando ejemplos similares que se puedan encontrar dentro de la química del boro y sus compuestos. En este sentido se puede destacar el interés del *cluster* o agrupación B_{25}^- (Piazza y

col., *J. Chem. Phys.*, **141**, 034303), existente como un conjunto de trece estructuras de estabilidad similar. Otra agrupación más compleja es la del B_{40}^- , conocido como “borosfereno”, que se ha conseguido observar por espectroscopía fotoelectrónica (Li, Li, Wang y col., *Nature Chemistry*, **6**, 727-731). Este compuesto se puede considerar como un análogo del fullereno C_{60} , aunque formado exclusivamente por átomos de B en lugar de C. Además su estructura poliédrica contiene detalles propios, tales como caras triangulares y heptagonales, que le diferencian del fullereno (Figura 1).

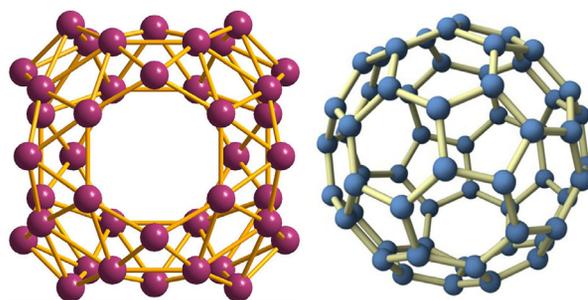


Figura 1. Estructuras espaciales del borosfereno B_{40}^- , formado por átomos de boro (izquierda) y del fullereno C_{60} , formado por átomos de carbono (derecha). Modificado de Li, Li, Wang y col.

Otra de las cuestiones que complica la vida de los estudiantes de Química desde los cursos iniciales es el aprendizaje de las valencias de los elementos, o por decirlo con más precisión, los estados de oxidación de los mismos. Tales estados tienen el significado de una carga eléctrica formal que se asigna a cada átomo dentro de las moléculas de un compuesto, con la condición de que las supuestas cargas, tanto positivas como negativas, se compensen entre sí. El estudio de los estados de oxidación merece todo el esfuerzo porque sustenta uno de los criterios de clasificación más importantes de la Química, que es el de oxidantes y reductores. Por tanto, no debe extrañar que la investigación química dedique gran atención al hallazgo experimental de estados de oxidación poco frecuentes. De ellos, el más alto encontrado hasta ahora es el VIII, que presentan los óxidos RuO_4 y OsO_4 , así como algunos compuestos de xenón tales como el XeO_4 y XeO_3F_2 . Pero la existencia de elementos con un número superior de electrones en sus capas externas, tales como el iridio que puede ceder nueve electrones,

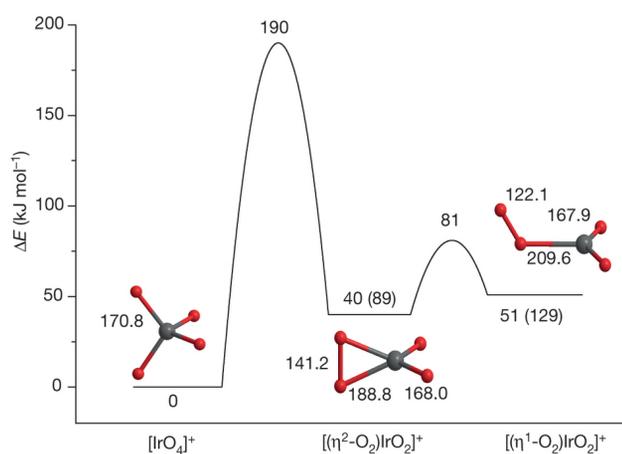


Figura 2. Estructura y estabilidad de los diferentes isómeros del $[\text{IrO}_4]^+$. Según Riedel y col.

hacia presagiar un estado de oxidación aún más alto. En efecto, esta hipótesis se ha confirmado en un compuesto de iridio con un estado de oxidación de IX, en concreto el IrO_4^+ (Riedel y col., *Nature*, 514, 475-477). Éste es el miembro más estable de una familia de tres isómeros con diferentes estados de oxidación, de los que el más alto es el suyo (Figura 2).

En cuanto a las interacciones que rigen la atracción mutua entre las moléculas, destaca por su importancia e interés práctico el enlace de hidrógeno. Al analizar las causas de este tipo de enlace, se ha tenido siempre la duda de cuál es la contribución real de dos de sus posibles causas. Por una parte, se reconoce una componente electrostática, que surge de la atracción entre cargas parciales positivas y negativas de los átomos o grupos interaccionantes. Pero por otra, ha de admitirse también una débil contribución de enlace covalente, que da cuenta de la compartición de electrones entre la pareja de núcleos implicados directamente en el enlace. Estas dos caras de una misma moneda han ocupado largas discusiones entre los químicos teóricos, dentro del largo camino para entender la naturaleza del enlace como un fenómeno general de la Química. Recientemente, la evidencia experimental de complejos estables entre especies con la misma carga eléctrica, ya sea anión-anión o bien catión-catión, desafiando la inevitable repulsión coulombiana, ha apoyado la idea de que la contribución dominante se debe a las interacciones de resonancia típicas de los enlaces covalentes, frente a las cuales la contribución electrostática carecería de importancia (Weinhold y Klein, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53, 11214-11217). Otra opinión sostiene, por el contrario, que la contribución electrostática existe siempre, aunque en algunos casos

especiales tales como los citados, pueda tener un signo contrario a la interacción global detectada. Así las cosas, la interacción resultaría favorecida tan sólo por la porción covalente, que en conjunto es la que debe garantizar la estabilidad del enlace (Thirman y Head-Gordon, *J. Phys. Chem. Lett.*, 5, 1380-1385).

En relación con estos mismos enlaces de hidrógeno intermoleculares, se había indicado la posibilidad de observarlos de modo directo por microscopía de fuerza atómica (AFM), utilizando la misma técnica que permite conseguir imágenes de los enlaces covalentes que mantienen unidos a los átomos dentro de las moléculas. La aplicación de esta nueva metodología abre interesantes perspectivas en un área tal como la Química supramolecular, donde los enlaces de hidrógeno estabilizan muchas estructuras construidas por el ensamblaje de varias moléculas entre sí. No obstante, un reciente estudio ha puesto de manifiesto que al operar con la técnica de AFM al nivel de resolución exigido, se producen contrastes entre la sonda y la muestra que dan falsas señales, las cuales no se pueden identificar de modo inequívoco como pruebas de auténticas uniones entre moléculas. Así se ha demostrado en el sistema modelo de bis (para-piridil) acetileno (Liljeroth y col., *Phys. Rev. Letters*, 113, 186102), donde se han registrado imágenes de aparentes enlaces en regiones donde consta que éstos no existen en absoluto. Por tanto, no deben ser más que artefactos (Figura 3). Se concluye que los resultados experimentales obtenidos a este nivel de resolución tan fino deben ser interpretados con gran precaución, ya que la obtención directa de imágenes de los enlaces no covalentes no está tan al alcance de la mano (o mejor dicho de la sonda) como las de sus análogos covalentes.

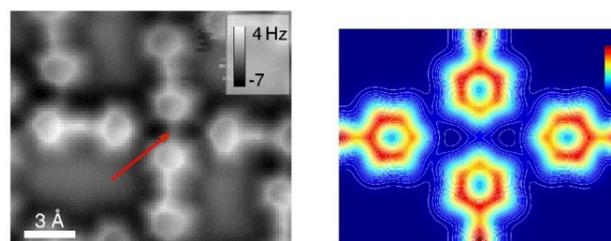


Figura 3. Izquierda: Imagen por AFM del complejo intermolecular de bis (para-piridil) acetileno, tomada con una resolución de 3 Å (0,3 nm), que muestra un aparente enlace de hidrógeno indicado con una flecha. Derecha: El cálculo de la densidad electrónica por encima del plano del complejo, representada mediante diferentes colores, revela la ausencia de enlace en esa región. Según Liljeroth y col.

REACCIONES QUÍMICAS

El estudio experimental de las reacciones químicas es un campo inagotable de investigación, donde se exploran continuamente procedimientos que permitan sintetizar nuevos productos o mejorar de modo selectivo el rendimiento de las preparaciones de unos compuestos frente a otros.

La reacción de Negishi consiste en el acoplamiento de haluros orgánicos con compuestos organometálicos de Zn, proceso en el cual se crean nuevos enlaces carbono-carbono. Por ello se aplica en la síntesis orgánica como un método que permite que se formen selectivamente dichos enlaces entre compuestos intermedios, a fin de utilizarlos como eslabones para arquitecturas complejas. Esta contribución fue reconocida con el Premio Nobel de Química en 2010. Pues bien, se ha puesto de manifiesto que la adición de sales tiene efectos muy diferentes en los compuestos de Zn de carácter alifático respecto de los de carácter aromático (McCann y Organ, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53, 4386-4389). Con este hallazgo se amplían los bloques de construcción disponibles y se podrán seleccionar las condiciones más adecuadas para optimizar sus acoplamientos según las necesidades.

En cuanto a los estudios teóricos, se está trabajando con un método de cálculo designado de forma poco habitual como nano-reactor *ab initio*. Con él se pueden simular reacciones químicas mediante dinámica molecular de alto nivel, especialmente acelerada. Así se han encontrado nuevas rutas para la síntesis del aminoácido glicina a partir de compuestos supuestamente existentes en medios prebióticos, obteniendo una comprensión más profunda del experimento histórico de Miller y Urey (Martínez y col., *Nature Chemistry*, 6, 1044-1048). Con este avance de carácter computacional se dispone de un medio de exploración de nuevas reacciones sin necesidad de realizarlas en la práctica, lo que viene a complementar el papel tradicional de los métodos teóricos en la interpretación de los hechos experimentales descubiertos previamente en el laboratorio.

Dentro del campo más práctico de la producción de los plásticos, se ha logrado la formación de un estereocomplejo polimérico mediante la mezcla de cadenas de poli-(propileno succinato), previamente sintetizadas por copolimerización de anhídridos y epóxidos cíclicos (Coates y col., *J. Am. Chem. Soc.*, 136, 15897-15900). El estereocomplejo así obtenido presenta propiedades térmicas mucho más favorables que los polímeros de los

que se ha formado (Figura 4). Con ello se abre el camino hacia la producción de nuevos plásticos con propiedades especiales, partiendo de unos materiales fácilmente accesibles pero carentes de esas propiedades.

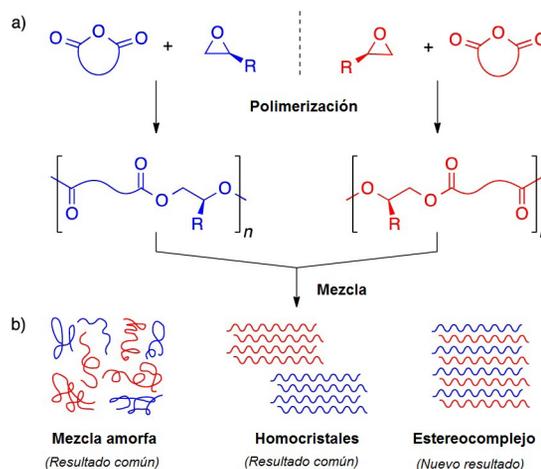


Figura 4. (a) Polimerización de anhídridos y epóxidos cíclicos. (b) Formación del estereocomplejo por cristalización de cadenas poliméricas enantiómeras, frente a otros productos más comunes y menos interesantes. Según Coates y col.

VIDA Y SALUD

Dos de los campos de aplicación de la Química al conocimiento de los procesos vitales se enmarcan en las vertientes de la Biología estructural a nivel molecular y de la Biología sintética. En ambas áreas de investigación se han producido recientes avances que se reseñan a continuación.

Es bien conocido que las mitocondrias son orgánulos de las células eucarióticas que desempeñan un papel importante en el metabolismo, en procesos tales como la síntesis de ATP, las oscilaciones del calcio, etc. A lo largo de la evolución, las mitocondrias han mantenido sus propios ribosomas especializados, con un sistema de traducción en paralelo al del núcleo celular. Es importante disponer de un modelo estereoquímico de estos ribosomas con el suficiente detalle para explicar su función a partir de su estructura. Se ha conseguido resolver la estructura cristalina de una subunidad bastante grande del ribosoma de la mitocondria de la levadura, utilizando la criomicroscopía electrónica de partícula única (Ramakrishnan y col., *Science*, 343, 1485-1489). Esta técnica se puede definir como una microscopía electrónica realizada a temperaturas criogénicas, o sea próximas al cero absoluto, en la cual se computan imágenes individuales de muchas partículas constituyentes de una

muestra, a fin de obtener una imagen combinada que resulta representativa de todas ellas. Los resultados son de calidad comparable a los de la cristalografía de rayos X, pero obtenidos a partir de material más heterogéneo y disponible en cantidades mucho menores. Los detalles estructurales de la subunidad así estudiada revelan características evolutivas propias que la diferencian sustancialmente de las arqueas, bacterias y células eucarióticas (Figura 5).

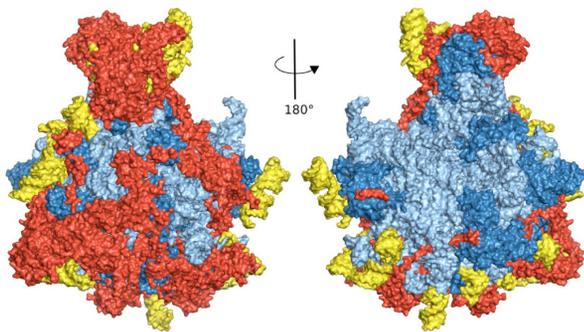


Figura 5. Modelo espacial de la subunidad 54S del ribosoma de la mitocondria de la levadura, obtenido a la resolución de 3,2 Å (0,32 nm), que muestra las regiones conservadas en las bacterias (en azul), en las mitocondrias de la levadura y de los mamíferos (en rojo), y las que están presentes solamente en la levadura (en amarillo). Según Ramakrishnan y col.

En otro interesante estudio se ha conseguido desarrollar una bacteria semi-sintética a partir de un alfabeto genético expandido en el que intervienen pares de nucleobases no naturales, además de los pares canónicos A-T y G-C. Para ello se han tenido que solucionar problemas de naturaleza química, tan esenciales a estos fines como difíciles de resolver en la práctica. El primero de ellos es que los nucleósidos-trifosfato de las nucleobases no naturales han de estar disponibles dentro de la propia célula junto a los compuestos naturales, pero cuidando de que las enzimas polimerasas sean capaces de procesarlos de tal modo que el ADN se pueda replicar con la fidelidad necesaria. También se ha tenido que conseguir que los pares de nucleobases no naturales así resultantes puedan mantenerse estables frente a los mecanismos que defienden la integridad del ADN (Malyshev y col., *Nature*, 509, 385-388).

En relación con fines netamente clínicos, una de las posibles contribuciones de la Química es la de aportar productos que faciliten el diagnóstico de las enfermedades mediante ensayos lo más específicos que sea posible. Por ejemplo, la alquilfosfocolina (APC) es un compuesto fluorescente capaz de adherirse selectivamente a las células tumorales, como consecuencia química de su afinidad

hacia los éteres fosfolípidos que abundan en estas células malignas respecto de las células sanas (Weichert, Kuo y col., *Science Transl. Med.*, 6, 240ra75). La asociación es bastante duradera y permite revelar tumores latentes sin más que utilizar una iluminación adecuada para excitar su fluorescencia. Con ello se facilita mucho transportar hasta las células los tratamientos oportunos, así como controlar sus efectos. Algunos análogos sintéticos de la APC que se han desarrollado en la firma Cellectar Biosciences a partir de relaciones estructura-actividad, designados con las siglas comerciales CLR 1404, CLR 1501 y CLR 1502, han conseguido mejorar la eficacia del procedimiento (Figura 6).

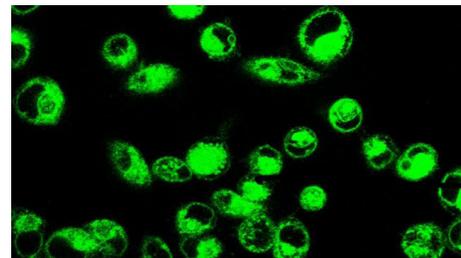


Figura 6. Iluminación de células pancreáticas cancerosas mediante CLR 1501, un análogo de la alquilfosfocolina con propiedades fluorescentes. Según Weichert, Kuo y col.

NANOTECNOLOGÍA Y NUEVOS MATERIALES

Uno de los materiales más conocidos en el campo de la nanotecnología es el grafeno, una forma cristalina bidimensional del carbono que presenta propiedades prometedoras para muchas aplicaciones que requieran un material resistente, flexible, de pequeño espesor y buen conductor de la electricidad, como es su caso. No obstante, el primer requisito para avanzar desde el laboratorio a las aplicaciones comerciales es disponer de métodos capaces de producir a escala industrial grandes cantidades de material libre de defectos. Se ha sugerido que esta producción se puede lograr con facilidad mezclando grafito en polvo, detergente y agua en una batidora de alta potencia, lo que produce la exfoliación del grafito para dar una dispersión de nanoláminas de grafeno, de pureza más que aceptable (Coleman y col., *Nature Materials*, 13, 624-630). Otro método para producir grafeno con buen rendimiento se basa en la exfoliación electroquímica del grafito en disoluciones acuosas de sales inorgánicas tan comunes como el $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, el Na_2SO_4 y el K_2SO_4 (Müllen y col., *J. Am. Chem. Soc.*, 136, 6083-6091).

La capacidad del grafeno para formar monocapas extensas de muy pequeño espesor le sitúan en una posición favorable para aplicaciones diversas. Una de ellas es servir de plataforma para desarrollar nuevas tecnologías de separación. En este sentido se ha sugerido utilizarlo como membrana ultrafina para el transporte selectivo de protones (Geim y col., *Nature*, 516, 227-230). También se ha explorado su utilidad, en la forma de óxido de grafeno, para acoger sobre su superficie partículas nanoestructuradas, ya sea dispersas en disolventes polares o bien sintetizadas directamente para este fin. La transformación posterior a óxido de grafeno reducido (RGO) permite restaurar en gran parte la estructura plana propia del grafeno, pero con las partículas ya incorporadas a su superficie. De este modo, el RGO proporciona una plataforma estable para unos *composites* nanoestructurados, con muchas aplicaciones potenciales en fotocatalisis, pilas de combustible y baterías, donde la eficiencia del soporte para el transporte de electrones resulta muy deseable (Kamat y col., *Chem. Mat.*, 26, 4662-4668).

Los nanotubos de carbono son otras formas de este elemento químico con interesantes posibilidades en el área de la nanoelectrónica, donde son especialmente apreciadas las variedades de pared simple o monocapa (en inglés *single-walled carbon nanotubes*, SWNTs). El motivo es que pequeños cambios en la longitud y orientación espacial de estos nanotubos modifican su conductividad eléctrica, dentro de una gama que va desde el estado metálico hasta el de semiconductor. También aquí se requiere disponer de métodos de preparación capaces de proporcionar, en el mejor de los casos, una especie única de nanotubo de alta pureza. Una posibilidad se basa en el crecimiento de nanotubos orientado hacia una quiralidad específica, lo que permite controlar con rigor su pureza estructural (Li y col., *Nature*, 510, 522-524). Otro procedimiento se basa en la deshidrogenación de hidrocarburos policíclicos utilizados como precursores, seguida del alargamiento de los pequeños nanotubos formados, que actúan como semillas para la formación de segmentos cada vez mayores (Fasel y col., *Nature*, 512, 61-64). Los nanotubos que se obtienen al final están prácticamente libres de defectos y alcanzan longitudes de varios cientos de nanómetros (Figura 7).

Se investiga actualmente una nueva generación de materiales con cambio de fase (en inglés *phase-change materials*, PCMs), así denominados por sufrir un cambio

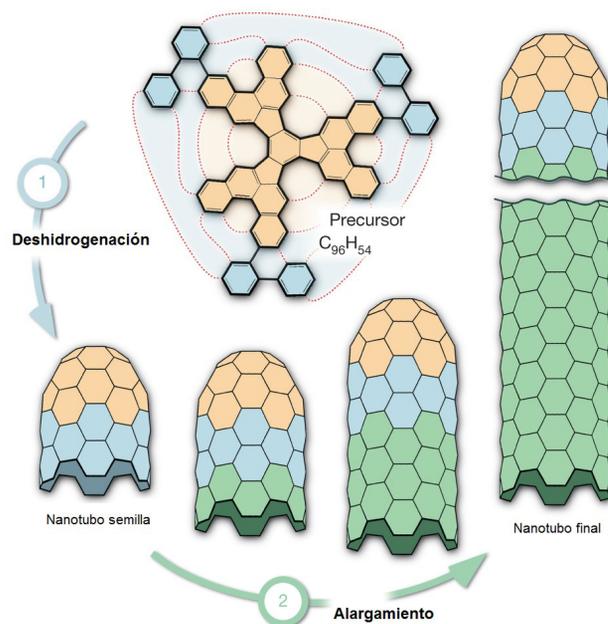


Figura 7. Esquema de la síntesis de nanotubos de carbono de alta pureza en varias etapas, mediante la deshidrogenación de hidrocarburos policíclicos utilizados como precursores y el alargamiento de los pequeños segmentos que se van formando hasta alcanzar el producto final. Según Fasel y col.

de fase reversible entre los estados amorfo y cristalino al responder a determinados estímulos. Este cambio de estado altera sus propiedades físicas. Entre las aplicaciones de más utilidad práctica destaca su capacidad para almacenar información duradera en soportes que sustituyan a los discos magnéticos y memorias *flash* utilizados hasta ahora, y también para visualizar estos datos en nuevos dispositivos optoelectrónicos. Un ejemplo interesante de PCM es el $Ge_2Sb_2Te_5$ (abreviadamente GST), que se intercala entre dos capas transparentes de un óxido de indio y estaño (abreviadamente ITO) capaz de conducir la electricidad, formando un “sandwich” que se deposita sobre una superficie reflectante de platino (Bhaskaran y col., *Nature*, 511, 206-211). Resultan unas láminas ultrafinas, tanto rígidas como flexibles, que pueden mostrar cambios de color inducidos eléctricamente con muy poco consumo de energía (Figura 8), formando imágenes de gran nitidez. Se espera que este tipo de materiales encuentre pronto aplicación en teléfonos móviles y tabletas dotados de pantallas de muy alta resolución, cuyos píxeles sean del tamaño de sólo unos nanómetros, para utilizarlos más adelante en gafas y lentes de contacto inteligentes, e incluso se piensa en la fabricación futura de retinas artificiales.

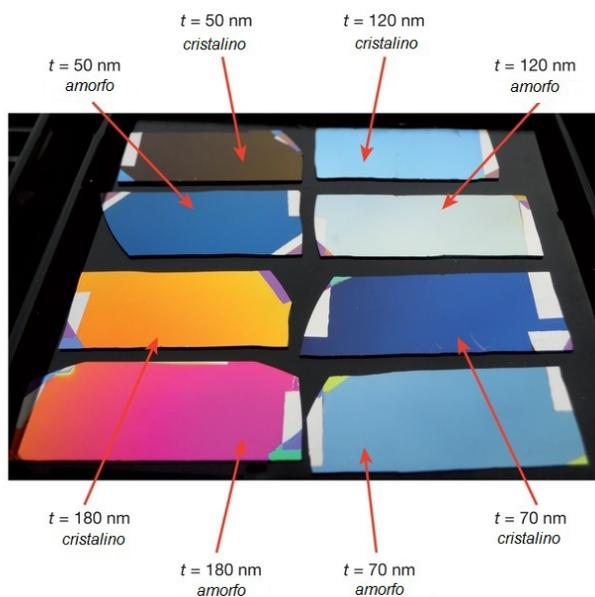


Figura 8. Un material con cambio de fase formado por cuatro láminas de diferentes espesores de: ITO (10 nm), GST (7 nm), ITO ("t" nm, indicados en cada caso) y platino (100 nm). El valor de "t" determina el color reflejado tras un cambio de fase provocado por cambios de temperatura, el cual condiciona que la lámina sea cristalina o amorfa. Según Bhaskaran y col.

FUENTES DE ENERGÍA

Las baterías electroquímicas han llegado a adquirir una importancia crítica en nuestra vida cotidiana como medios de almacenamiento de carga eléctrica. Su fundamento es uno de los principios más básicos de la Química: unos elementos químicos tienden a ceder electrones y otros elementos tienden a aceptarlos. En consecuencia, se genera entre ellos de forma espontánea una corriente eléctrica, caracterizada por una tensión definida y constante. Entre los diversos tipos de baterías, las de iones de litio o Li-ion están muy difundidas actualmente por su buena relación energía/volumen y comodidad de manejo. No obstante, se cree que pueden mejorar mucho en la duración de las recargas, así como en la cantidad de energía que son capaces de proporcionar. Un posible perfeccionamiento está en utilizar nanohilos de silicio como polo negativo o ánodo, en sustitución del grafito habitual, que es más barato, pero adolece de una menor capacidad de carga. Pero ello requiere reforzar la conductividad eléctrica del silicio introduciendo aditivos de material conductor. La solución podría ser sencilla, pues se ha comprobado que al revestir los nanohilos de silicio con una película de carbono, no sólo se favorece la circulación de los iones litio, mejorando la conductividad, sino que además se reduce mucho la dilatación que se produce durante las recargas (Bogart y col., *Nano*, 8,

915-922). Por tanto, el rendimiento de las baterías de litio podría mejorar sustancialmente diseñando una nanoestructura "a la medida" de los componentes basados en el silicio y en el carbono.

Es muy posible que estas mejoras y otras futuras impulsen una revolución en la fabricación de muchos artilugios familiares, tales como dispositivos informáticos y automóviles eléctricos. Conviene recordar que las baterías de litio son también el fundamento de sistemas de más envergadura fabricados por la firma Tesla Motors, que están de actualidad por su posible capacidad para satisfacer de modo autónomo las necesidades domésticas cotidianas, sin tener que depender exclusivamente de las grandes compañías eléctricas.

En el uso de las energías renovables, un deseo largamente perseguido es lograr su almacenamiento a gran escala, de tal modo que se puedan consumir sin intermitencias, como se hizo hasta ahora con los combustibles fósiles tales como el carbón, petróleo y gas natural, pero sin las consecuencias indeseables en la contaminación y el cambio climático que producen estas fuentes convencionales de energía química. Entre las nuevas tecnologías emergentes recomendadas por el Foro Económico Mundial para lograr estos objetivos están las baterías de flujo. Este tipo de baterías funciona mediante la corriente que se establece entre dos disoluciones, las cuales ocupan sendos compartimentos separados por una membrana que permite el intercambio iónico de uno a otro. El dispositivo presenta algunas características ventajosas. En primer lugar, ambos componentes se pueden recargar continuamente, ofreciendo, al menos en teoría, una disponibilidad de energía ilimitada, de modo comparable a las pilas de combustible, de las que un ejemplo popular es la pila de hidrógeno. Otra facilidad adicional es que dichos componentes se pueden almacenar, transportar y dispensar mediante procedimientos de uso común, a los que ya estamos acostumbrados con las fuentes de energía derivadas del petróleo. Además las baterías de flujo tienen una gran flexibilidad, pues se pueden formar con muchas sustancias químicas, abarcando un intervalo de tensiones desde 1 hasta 3 voltios. Los principales inconvenientes que presentan por ahora respecto de otras baterías más comunes, tales como las de litio, son la complejidad de su montaje y su desfavorable relación energía/volumen. Por otra parte, el uso de metales costosos y contaminantes se puede evitar recurriendo a las favorables propiedades electroquímicas de compuestos orgánicos tales como las quinonas, cuyo

carácter aromático se debe precisamente a la existencia de un sistema de electrones de gran movilidad.

Como ejemplo se puede citar la reciente construcción de una batería de flujo que combina el par quinona/hidroquinona con el par Br_2/Br^- y funciona mediante electrodos de carbono de bajo precio. Con este enfoque híbrido orgánico-inorgánico se tiene gran flexibilidad para regular a voluntad el potencial redox y la solubilidad de los componentes, la cual se puede favorecer introduciendo los grupos funcionales adecuados (Huskinson y col., *Nature*, 505, 195-198). Este tipo de baterías puede representar un gran avance para conseguir el almacenamiento de energía eléctrica a gran escala con un coste muy reducido.

Dentro de las fuentes de energía basadas directamente en la luz solar, hace pocos años que se están investigando las células solares construidas con materiales que tienen la estructura de la perovskita, un óxido de calcio y titanio que se encuentra en las rocas del manto terrestre. La perovskita puede captar la luz solar con una eficiencia próxima al 20%, lo que le hace competitiva frente al silicio, considerado como el material fotovoltaico de referencia. Una estructura cristalina análoga se presenta en otras sustancias, tanto naturales como sintéticas, que reciben el nombre genérico de perovskitas y que se recomiendan como materiales de bajo costo para células fotovoltaicas de alto rendimiento. Entre ellas se encuentran algunos semiconductores orgánicos-inorgánicos tales como el triyoduro $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, muy utilizado por sus buenas cualidades en la captación de la luz y el transporte de la carga que produce la corriente eléctrica, pero con el inconveniente de contener plomo, que es un metal muy contaminante. En este sentido se ha estudiado su sustitución por el $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_3$, cuya absorción de luz requiere mucha menos energía (Hao y col., *Nature Photonics*, 8, 489-494) y cuyo comportamiento semicon-

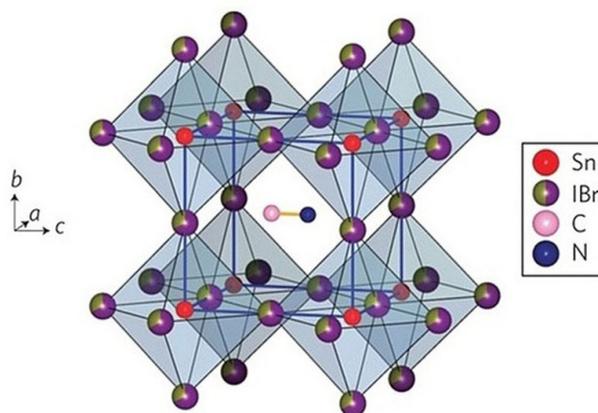


Figura 9. Estructura cristalina tipo perovskita del yoduro de estaño y metilamonio $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_{3-x}\text{Br}_x$, utilizado como material semiconductor para captar la luz solar en células fotovoltaicas. Según Hao y col.

ductor mejora de modo notable al utilizarse en la forma $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnI}_{3-x}\text{Br}_x$ (Figura 9).

Siguiendo la corriente actual de explorar las posibilidades de los nuevos materiales, se ha estudiado también la incorporación de nanotubos de carbono SWNTs, a los que se ha aludido anteriormente, como colectores de la carga eléctrica producida en las células solares de perovskitas. Se ha atendido principalmente a su eficiencia en la conversión de energía, pero también a su comportamiento favorable frente a la degradación térmica y resistencia al agua, factores que incrementan la estabilidad a largo plazo de dichas células solares (Snaith y col., *Nano Lett.*, 14, 5561-5568). Con estas investigaciones y otras similares, tal vez se podría realizar el sueño de disponer de energía ilimitada a partir de principios tan comunes como la luz del sol y los minerales que forman nuestro suelo.

Fernando Peral Fernández
Dpto. de Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas