

LA NUEVA Y SORPRENDENTE QUÍMICA DEL CARBONO: LOS FULLERENOS

José Antonio Guevara García

Maestría en Química,
Universidad Autónoma de Puebla

Aarón Pérez Benítez

Escuela de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de Puebla

Enrique González Vergara

Maestría en Química,
Universidad Autónoma de Puebla

En 1985, un grupo de investigadores de la Universidad de Rice, E.U., y de la Universidad de Sussex, Inglaterra, observaron una señal en el espectrómetro de masas correspondiente a una molécula muy estable de 60 átomos de carbono, C_{60} , producto de la condensación de vapor de carbono sublimado por una descarga de rayos laser. Basándose en un modelo hecho de papel, estos investigadores propusieron que, dada la estabilidad de la molécula, la estructura debería ser la de un cúmulo semejante a un icosaedro truncado con 12 caras pentagonales y 20 caras hexagonales (véase Figura 1), y la denominaron "Buckminsterfullerene" o "Buckyball", debido a su semejanza estructural con un domo geodésico

de igual número de vértices diseñado por el arquitecto Richard Buckminster Fuller. Una estructura análoga más conocida, corresponde a la de un balón de fútbol soccer, por lo que el nombre de "futboleno" ha sido también adoptado, y de hecho así es como se le conoce en español.

Este descubrimiento fue confirmado en mayo de 1990, cuando científicos del Instituto Max Planck, en Alemania, encontraron que calentando una barra de grafito en atmósfera de helio se produce C_{60} en cantidades apreciables. Varios laboratorios de todo el mundo comenzaron a producir futboleno, desatando una explosión de investigación en este nuevo campo. En julio de 1991, la síntesis del C_{60} se hizo de una manera más sencilla por el descubrimiento de que el C_{60} también se encuentra presente en el hollín de la flama que produce el benceno al quemarse.

Simultáneamente con el descubrimiento del futboleno, otros cúmulos de carbono de distintos tamaños producidos en mucho menor cantidad que el C_{60} comenzaron a llamar la atención de los científicos, estableciéndose el nombre genérico de "fullerenos" (fullerenos: léase fulerenos en español) para esta familia (véase Figura 2).

La historia continúa y, para finales de 1991, se había encontrado que el C_{60} dopado¹ apropiadamente es superconductor y magnético, y la familia de los

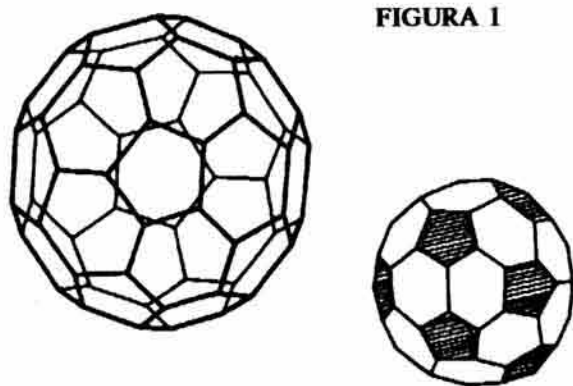


Diagrama esquemático del futboleno junto al dibujo de un balón de fútbol. Ambas son estructuras icosaédricas truncadas.

fullerenos se extendió para incluir formas asimétricas así como fibras cilíndricas denominadas "buckytubes" (tubolenos en español) (véase Figura 3). En un torrente de novedades, el C_{60} fue decorado con radicales orgánicos, con fluoruros, y con complejos de níquel, paladio, osmio y platino (véase Figura 4). Se logró también extenderlo con átomos de carbono adicionales, y sintetizarlo englobando metales como el lantano y el itrio (véase Figura 5).

La versatilidad química del futboleno es increíble: reacciona con reactivos de Grignard, con metales alcalinos tales como potasio y rubidio, y con halógenos como el flúor. La molécula misma, así como muchos de sus derivados son solubles sólo en disolventes orgánicos, pero recientemente se han sintetizado derivados con aminas que son solubles en agua. También se ha reportado que el C_{60} puede actuar como una verdadera esponja de radicales libres, capaz de absorber decenas de estas especies químicas altamente reactivas. Los radicales libres son cruciales en los procesos comerciales de polimerización, y algún día los compuestos de fullerenos pueden ser muy útiles en tales procesos.

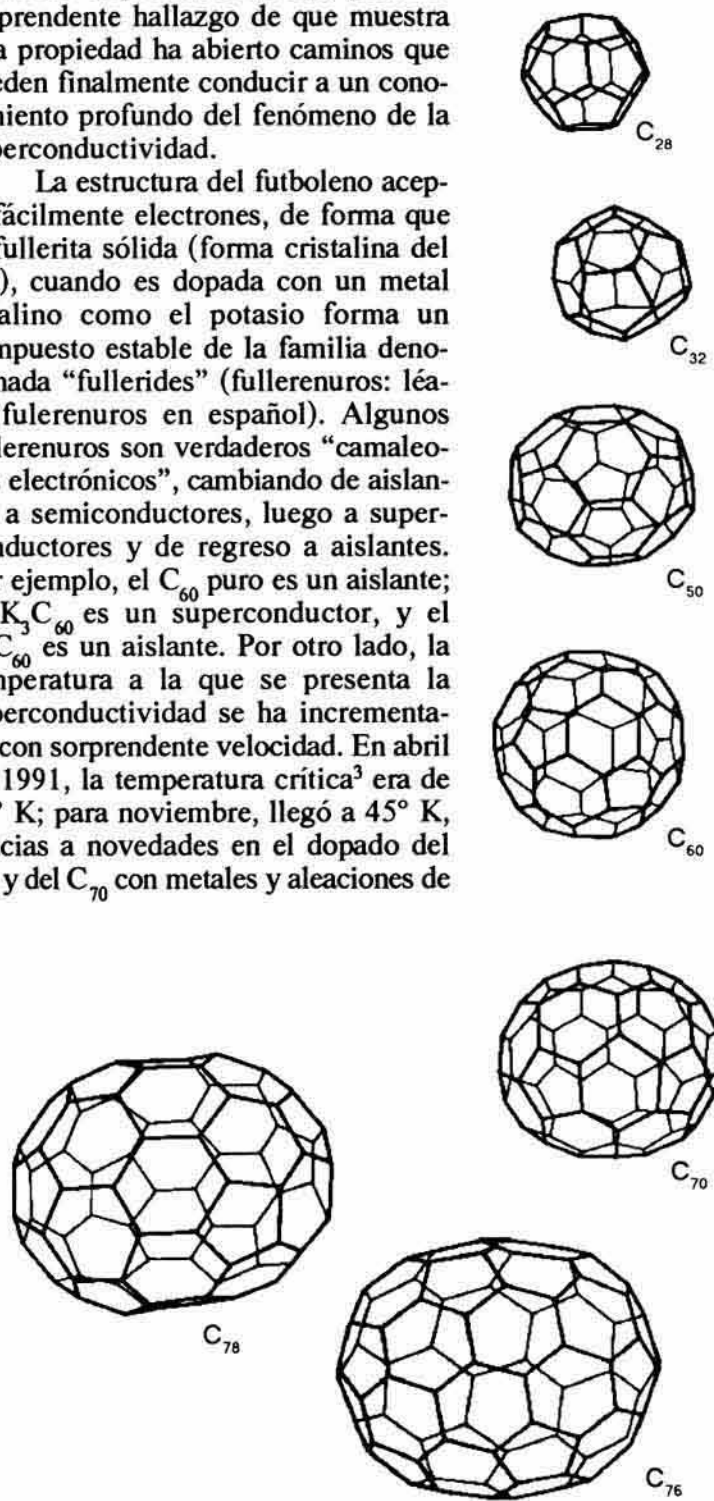
¿Cómo hace el futboleno para realizar sus hazañas químicas? En el C_{60} , los átomos de carbono están organizados formando estructuras hexagonales y pentagonales que se unen de una manera coordinada para formar una molécula esférica hueca con una distribución uniforme en su tensión de enlace sobre todos los átomos de carbono. Algunos electrones se encuentran deslocalizados sobre toda la molécula, de una manera mucho más pronunciada que en el benceno. Pero el benceno es plano, y muchos de sus derivados también lo son; así que el futboleno, esférico por naturaleza, prácticamente añade una nueva dimensión a la química de los compuestos aromáticos y es una nueva forma alotrópica del carbono ².

En adición a la apertura de este nuevo campo de la Química, el C_{60} también muestra propiedades físicas interesantes. Es tan resistente a los impactos que ha sido sugerido como un superlubri-

cante, hay evidencias de superconductividad, y al adicionarse a las películas de diamante, facilita el crecimiento de los cristales de este último. Todavía no hay una aplicación práctica de sus propiedades superconductoras, pero el sorprendente hallazgo de que muestra esta propiedad ha abierto caminos que pueden finalmente conducir a un conocimiento profundo del fenómeno de la superconductividad.

La estructura del futboleno acepta fácilmente electrones, de forma que la fullerita sólida (forma cristalina del C_{60}), cuando es dopada con un metal alcalino como el potasio forma un compuesto estable de la familia denominada "fullerides" (fullerenuros: léase fullerenuros en español). Algunos fullerenuros son verdaderos "camaleones electrónicos", cambiando de aislantes a semiconductores, luego a superconductores y de regreso a aislantes. Por ejemplo, el C_{60} puro es un aislante; el K_3C_{60} es un superconductor, y el K_6C_{60} es un aislante. Por otro lado, la temperatura a la que se presenta la superconductividad se ha incrementado con sorprendente velocidad. En abril de 1991, la temperatura crítica³ era de 18° K; para noviembre, llegó a 45° K, gracias a novedades en el dopado del C_{60} y del C_{70} con metales y aleaciones de

FIGURA 2



Siete de los miembros más estables de la familia de los fullerenos en el rango de 20 a 80 átomos de carbono.

rubidio, cesio y talio. Los fullerenos todavía no están a la par de los tradicionales candidatos de superconductividad a alta temperatura, pues los óxidos mixtos de cobre han alcanzado el récord de 125° K; pero debido a que los fullerenos constituyen un sistema molecular mucho más simple, éstos pueden ofrecer un mejor entendimiento del mecanismo de la superconducción.

El ferromagnetismo, al igual que la superconducción, permanece como una misteriosa propiedad electrónica de ciertos materiales. El año pasado, el futboleno probó que también sabe hacer juegos magnéticos. Al añadir un agente reductor orgánico al futboleno, el compuesto resultante se comporta como un pequeño imán en presencia de un campo magnético, a temperaturas hasta de 16° K. El nuevo material no presenta propiedades magnéticas en ausencia del campo externo, de forma

que por sí mismo puede no tener aplicaciones, pero la búsqueda de materiales ferromagnéticos orgánicos de bajo peso molecular y con habilidad para polimerizar, ha abierto repentinamente su campo para incluir a los fullerenos.

Ningún otro miembro de la familia de los fullerenos tiene la simetría perfecta del futboleno; de hecho el C_{60} , $(I_h)C_{60}$ para ser exactos con su nomenclatura⁴, es la molécula más grande y más simétrica que existe. Sin embargo, las estructuras de más baja simetría pueden ser prometedoras. Se ha encontrado que el C_{76} , el C_{78} y el C_{84} tienen al menos un

isómero con forma de cilindro helicoidal, en el cual se presenta el fenómeno de la quiralidad⁵. Estas estructuras pueden tener aplicaciones fascinantes, tal como la creación de nuevos materiales ópticos.

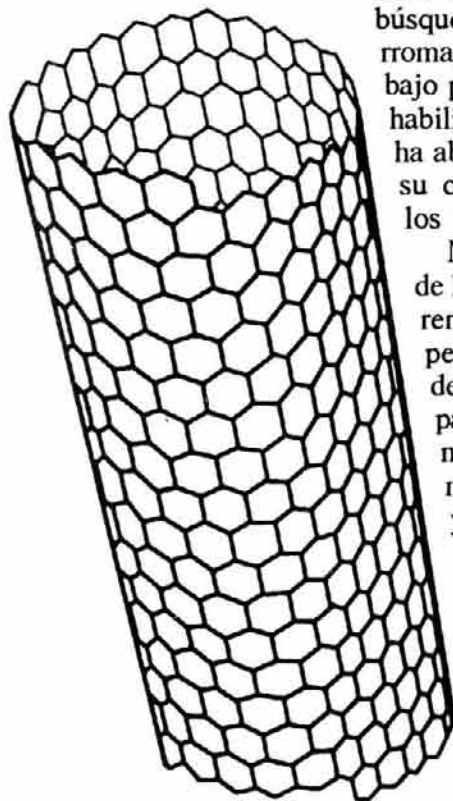
La química de los fullerenos se desarrolla en una forma tan vertiginosa que recuerda el desarrollo de la química del benceno a finales del siglo pasado. Así por ejemplo, a los químicos que por años se han esforzado por sintetizar moléculas con cavidades, y por modificar las propiedades de éstas para atrapar y transferir diferentes iones y/o átomos, ahora, les cae en las manos una molécula hueca por naturaleza. Eventualmente, los químicos podrán confeccionar fullerenos que sirvan como contenedores moleculares, armaduras para compuestos radioactivos, o agentes liberadores de drogas. El año pasado, átomos de lantano pudieron encerrarse dentro del futboleno (véase Figura 5). La próxima meta es abrir una puerta en la estructura de los fullerenos para permitir el libre tránsito de iones y/o átomos.

Otra estructura interesante es la que se encontró en el hollín depositado sobre un electrodo de grafito usado para sintetizar fullerenos, este material contenía agujas de carbón formadas por tubos anidados muy delgados. Las moléculas de fullerenos en forma de tubos (tubolenos), pueden tener una sorprendente mezcla de propiedades, incluyendo gran resistencia, ya que las fibras de las formas convencionales de carbono son ya las más fuertes conocidas. Además, es factible que las moléculas más grandes de fullerenos sean quirales y que tengan incorporados tubolenos en su estructura.

De cara al futuro

Los fullerenos aparecieron en la Química y la Física sólo hace pocos años y han capturado el entusiasmo de experimentalistas y teóricos. Artículos referentes a ellos salen en las revistas científicas importantes cada semana. Toda esta actividad ha justificado que la revista *Science* haya conferido al C_{60} el título

FIGURA 3



Representación esquemática de un tuboleno. La figura presenta los extremos abiertos, aunque se supone que éstos se cierran con la incorporación de una combinación de unidades pentagonales y hexagonales en cada lado. La estructura es espiral.

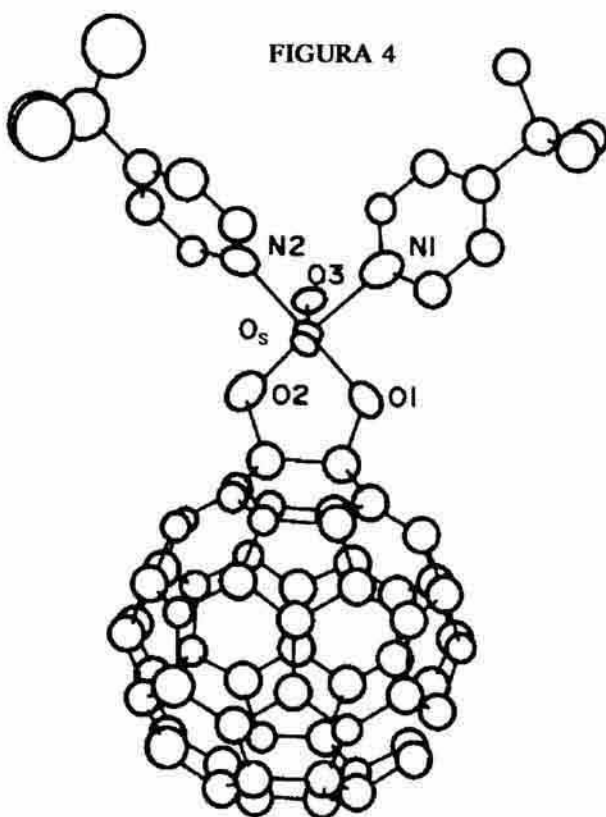


Diagrama de Difracción de Rayos-X del compuesto formado entre el complejo OsO_4 (4-ter-butilpiridina) $_2$ y el C_{60} , mostrando la unión por dos átomos de oxígeno.

de “la molécula del año”, por la contribución científica y tecnológica que pueda tener esta molécula en el futuro (véase Figura 6).

La química de los fullerenos puede convertirse en una rama industrial muy importante, ya que tiene aplicaciones potenciales en catálisis y polimerización, así como en —el más distante— desarrollo de su superconductividad y ferromagnetismo. De entre las propiedades físicas del C_{60} , que destacan por sus posibilidades están: la superconducción en tres dimensiones a 45°K , del C_{60} dopado con Cs y Rb; la facilidad de su crecimiento sobre Arseniuro de Galio (GaAs), para producir dispositivos semiconductores; la posibilidad de atrapar átomos dentro de su estructura; y, la posibilidad de ser el mejor lubricante nunca antes conocido.

Nuevos avances y descubrimientos esperan a los fullerenos en un futuro

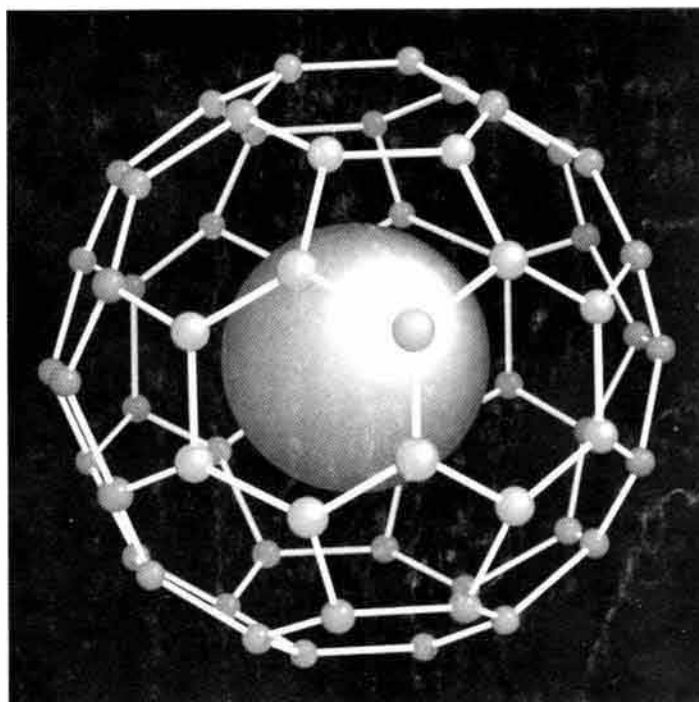
cercano. Primeramente considerados como ejemplos de estabilidad física, se han convertido en una de las clases de moléculas más versátiles conocidas. Continúan asombrando a todos con una propiedad sorprendente tras otra, y es previsible que en un lapso corto las primeras aplicaciones concretas empiecen a darse, demostrando sin lugar a dudas, que los fullerenos son más que curiosidades químicas.

Actualmente es posible conseguir un gramo de C_{60} puro por la módica suma de cuatro mil dólares (E.U.), aunque probablemente sea factible encontrarlo en el hollín acumulado en el calentador de nuestra propia casa.

Agradecimientos

A la SEP por el apoyo otorgado vía el convenio SEP-DGICSA 91-21-001-24. A Andoni Garritz por haber motivado nuestro interés en el desarrollo de este tema.

FIGURA 5



Esquema de la molécula del C_{60} encapsulando a un átomo de lantano.

Notas

¹ La acción de dopar consiste en añadir cantidades no estequiométricas de átomos o iones en la red cristalina de un material para llenar parcialmente sus huecos intersticiales, lo que resulta en una modificación de sus propiedades electrónicas.

² Las tres formas alotrópicas conocidas del carbono son entonces: el diamante, el grafito y la fullerita.

³ La temperatura crítica es la temperatura a la cual se da la transición desde un estado aislante o conductor a un estado superconductor (conducción sin resistencia).

⁴ En la literatura científica empieza a consolidarse la terminología $(S)C_X$, donde S es el grupo puntual y X es el número de átomos de carbono; agregándose un prefijo que designa al isómero óptico cuando es el caso.

⁵ Las moléculas que carecen de ejes impropios de simetría presentan actividad óptica, es decir, desvían el plano de la luz polarizada (como el azúcar, por ejemplo), y se denominan quirales.

Lecturas recomendadas

Kroto, H.W., Heath, J.R., O'Brien, S.C., Curl, R.F., Smalley, R.E. "C₆₀, Buckminsterfullerene", *Nature*, Vol. 318, 1985, p. 162.

Krastchmer, W., Lamb, L.D., Fostiropoulos, K., Huffman, D.R., "Solid C₆₀, A new form of carbon", *Nature*, Vol. 347, 1990, p. 354.

Kroto, H.W., Allaf, A.W., Balm, S.P. "C₆₀, Buckminsterfullerene", *Chem. Rev.*, Vol. 91, 1991, p. 1213.

Pisanty, B., "Futboleno-C₆₀", *Educación Química*, Vol. 2, No. 3, 1991, p. 140.

Taubes, G., "Futbolano: ¿La nueva molécula de carbono?", *Muy Interesante*, Vol. 11, 1991, p. 28.

Koshland, D.E., "Fullerene Isomerism: Isolation of C_{2v}-C₇₈ and D_{3h}-C₇₈", *Science*, Vol. 254, 1991, p. 1768.

Guevara García, J.A. y Pérez Benítez, A., "Acerca del grupo puntual del futboleno", *Educación Química*, Vol 2, No. 3, 1991, p. 109.

FIGURA 6

