

© Raquel Torralba Torres

Reacción de hidroboración de olefinas: 60 años desde su descubrimiento y 40 años desde la concesión del premio Nobel a Herbert C. Brown, Efraím Reyes

La Química española vista por sus protagonistas, Otilia Mó

Importancia de la química en los vuelos espaciales: En recuerdo de las cinco décadas del Apolo XI, Manuela Martín y Gabriel Pinto

## Entidades colaboradoras



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE  
MADRID

## Socios Corporativos



JANSSEN-CILAG S.A.



# Anales de Química

## Revista de la Real Sociedad Española de Química

### Editor General

Miguel Ángel Sierra  
*Universidad Complutense de Madrid*

### Comité Editorial

Fernando P. Cossío  
*Universidad del País Vasco Ikerbasque*

Silvia Lacorte Bruguera  
*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, CSIC*

Óscar Millet  
*CIC bioGUNE*

Gabriel Pinto  
*Universidad Politécnica de Madrid*

M.<sup>a</sup> Carmen Redondo  
*Colegio Estudio*

Elena Sáez  
*Universidad Complutense de Madrid*

María C. de la Torre  
*Instituto de Química Orgánica General, CSIC*

Gregori Ujaque  
*Universitat Autònoma de Barcelona*

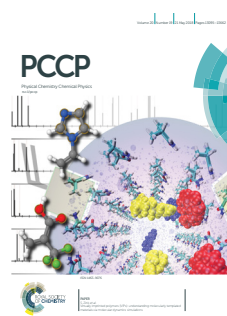
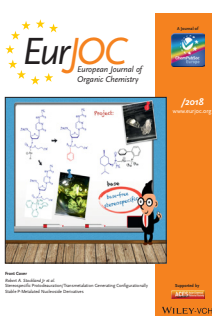
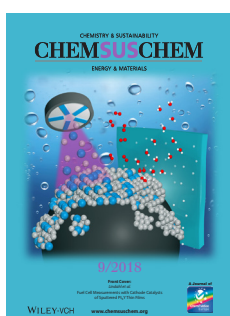
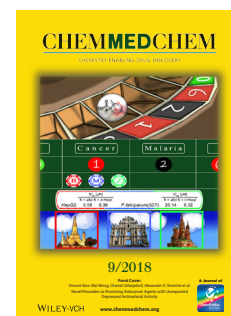
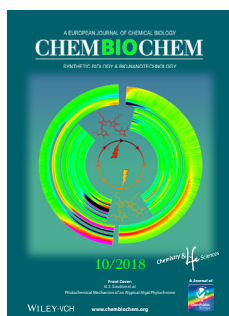
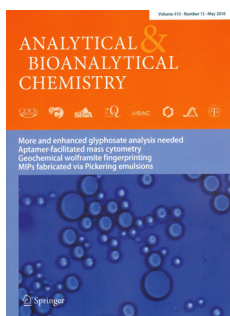
### Secretaría Editorial

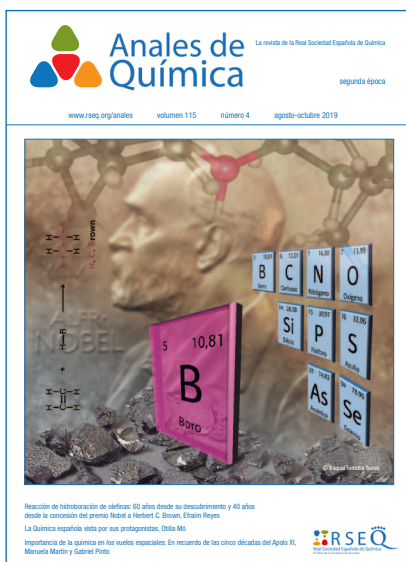
Patricia Yáñez-Sedeño  
*Real Sociedad Española de Química*  
[www.rseq.org](http://www.rseq.org)

Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Complutense Ciudad Universitaria.  
28040 Madrid  
Tel (+34) 913 944 356



## Revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química





Composición y producción:

Moisés Fernández  
Edinova Taller Editorial

<b>Editorial</b> .....	288
<i>Miguel Ángel Sierra</i>	
<b>Carta abierta de la RSEQ. Declaración de la Real Sociedad Española de Química sobre el cambio climático y por un desarrollo sostenible</b> .....	290
<i>Antonio M. Echavarren</i>	
<b>Cartas al editor</b>	
La enseñanza de la Física y Química en la Comunidad Valenciana. Declaraciones institucionales y la realidad escolar .....	291
<i>Juan Quílez Pardo</i>	
<b>La Química española vista por sus protagonistas</b>	
La Química española vista por sus protagonistas .....	293
<i>Otilia Mó</i>	
<b>Investigación Química</b>	
Reacción de hidrobromación de olefinas: 60 años desde su descubrimiento y 40 años desde la concesión del premio Nobel a Herbert C. Brown.....	300
<i>Efraím Reyes</i>	
<b>Historia de la Química</b>	
Importancia de la química en los vuelos espaciales: en recuerdo de las cinco décadas del Apolo XI .....	308
<i>Manuela Martín, Gabriel Pinto</i>	
Richard Allen Andersen: una vida dedicada a la investigación y la enseñanza de la Química Inorgánica y la Química Organometálica .....	315
<i>Ernesto Carmona Guzmán</i>	
Santiago Bonilla Mirat: retrato de un químico olvidado .....	326
<i>Fernando Villafañe</i>	
<b>Enseñanza de la Química</b>	
El concurso escolar “Nuestra tabla periódica”: Una iniciativa para fomentar la motivación de profesorado y alumnado en áreas STEAM .....	332
<i>Gabriel Pinto Cañón</i>	
<b>Noticias</b> .....	345
<b>Obituario</b>	
Dieter Enders (1946-2019) .....	362
<b>Reseñas</b>	
<i>150 Anys de taules periòdiques a la Universitat de Barcelona, Santiago Álvarez y Claudi Mans (Eds.)</i> .....	363
<i>Gabriel Pinto Cañón</i>	
<b>Radicales (muy) libres</b>	
La forma del agua .....	364
<i>Javier de Mendoza</i>	

## Miguel Ángel Sierra

**E**s obvio que me hago viejo y no necesariamente más sabio. Por esto cada vez entiendo menos los nuevos hábitos y costumbres de esta profesión que elegí hace más de cuarenta años. He tenido el privilegio de empezar mi trabajo como científico en un desierto económico e intelectual, para, poco a poco, ir viendo cómo a mi alrededor se alcanzaban cotas científicas cada vez más altas. En su momento nos atrevimos a soñar con parecernos a aquellos países civilizados en los que la ciencia se respeta y se valora. Y eso lo hemos hecho en un sistema que, mejor o peor, ha funcionado: la revisión por pares en las revistas científicas.

Ahora no entiendo nada. Hubo un tiempo (ya hablo como un abuelo) en el que se enviaba un artículo y el resultado, fuese positivo o negativo te ayudaba a seguir adelante. Recuerdo mi primer artículo independiente (¡llevaba yo la estrella!). Era un, hoy en día, pobre *Organometallics* (la revista de referencia en Química Organometálica ya no cuenta en la mayor parte de los sistemas de evaluación y, ni que decir tiene, está muy lejos de la élite de las revistas plus plus, triple star etc., pero con 29 años en 1989 podéis imaginar que me hizo más ilusión que muchos otros artículos que publiqué después). Pero eso no es lo importante. Lo importante eran las críticas razonadas y los comentarios razonables de los *referees*, incluyendo unas correcciones, comentarios y consejos (sí, consejos, no estoy bromeando) de Dietmar Seyferth (fundador y editor de *Organometallics* durante muchos años, además de ser uno de los padres de la Química Organometálica moderna). Nada menos que el editor de *Organometallics* corrigió y comentó un manuscrito de un mindungí. Mi amiga y coautora del artículo, Gema Domínguez (hoy catedrática) lloró de emoción.

Qué diferentes eran las cosas entonces. Hoy en día te devuelven un manuscrito con dos líneas en las que se indica “el manuscrito no contiene química de interés para los lectores de esta revista”. Y eso te lo dicen en menos de una hora desde que mandaste el artículo (me consta que el record del país está en 17 minutos). Las oficinas editoriales deben estar formadas por inteligencias superiores capaces



de leerse 30 páginas de manuscrito y tomar una decisión en menos de 30 minutos.

Fíjate por dónde, yo no lo creo. Echad un vistazo a los editores que reciben y manejan vuestros manuscritos y que deciden si estos pasan a los editores *senior* (en algunas revistas) o a *referees* en otras. Salvando muy honrosas excepciones, ninguno de ellos tiene una experiencia en investigación más allá de un posdoc y, en muchos otros casos ni siquiera son doctores. No hablo por hablar. Los currículos de estos editores junior están en la web a vuestra disposición en muchos casos, y yo por mi trabajo en *Anales de Química* y en *EurJOC* conozco personalmente a muchos de ellos.

No revelo ningún secreto de estado si además digo que muchas de las decisiones a ese nivel se hacen con ayuda de un ordenador con programas “ad hoc”, que buscan perfiles de citas de los autores, palabras clave, etc. (algo que por cierto no se hace con el trabajo de muchos políticos).

¡Vale! Admito que soy un tarra y que no entiendo que esta es la forma más eficiente de manejar la marea de ma-

nuscritos que a diario recibe una revista de calidad (otro día hablaré de la marea roja y de las revistas depredadoras, ahora no es el momento). Para que el presidente de la RSEQ no me abronque otra vez, no voy a usar palabras soeces. Diré solo que mira que escuece que alrededor de tres años de trabajo se resuman en un “no interesa”. ¡Hay que ...!

Pongámonos en el caso fantástico en el que los editores *junior* pasan tu artículo a un editor *senior* y éste decide mandarlo a referenciar. ¡Alegría! Hasta que recibes dos críticas: una dice que el artículo es fantástico, el segundo que es impresionante, pero para un público especializado, y ¡ay amigo! llega el tercer *referee*. En tiempos de San Benito antes de leer esa crítica se diría *vade retro satana*. ¡El tercer *referee*! Qué decir que no se haya dicho ya. Poderoso como un dragón, implacable como la parca, incisivo como el acero toledano al copiar los argumentos del *referee* que duda del interés general del artículo. Recomendando el “meme” en el que Hitler recibe una crítica de un artículo que ha enviado. No voy a hacer spoiler pero es magistral<sup>1</sup>. Lógicamente, lo habitual es que el tercer *referee* se cargue el artículo. Hubo un tiempo en que los editores decidían qué artículos publicaban y cuáles no y solo en contados casos se recurría al tercer *referee*. Hoy son los *referees*, incluyendo el tercero, los que deciden. En mi caso he llegado al absurdo de que el editor *junior* envíe a un *referee* un artículo en el que se había cambiado solo el estilo de una frase. Algo esencial para el contenido científico y la calidad del mismo, eso seguro.

Dicho sea de paso, hubo un tiempo en que una comunicación tenía como mucho 10 ejemplos. Hoy no se publica ninguna comunicación con menos de 25 ejemplos. Eso sí, hemos vuelto al síndrome descrito por primera vez por Hegedus en 1987 (metilo, etilo, isopropilo e inutilo)<sup>2</sup>. Un daño colateral de la marea roja. Que pensarían Sir Robert Robinson y Robert Woodward cuando fundaron Tetrahedron Letters si vieran a los absurdos a los que estamos llegando en las comunicaciones.

Los problemas por los que pasa el sistema de *peer review* son muy serios. Elsevier está inmersa en una investigación sobre la “coercive citation”<sup>3</sup>. La nueva política de *Open-Access* ha llevado a perlas como “no se tendrá en cuenta en las evaluaciones la calidad o el índice de impacto de las revistas”. Este tema apareció en el número de julio de *Anales de Química*. ¿Cuál es el origen de todo esto? ¿La promoción de los investigadores a nivel mundial usando los benditos índices bibliométricos sin más? ¿El beneficio monetario que en algunos países se consigue publicando? ¿El publicar no por la calidad del artículo si no por su impacto mediático (lo que ahora se llama “*altmetrics*”, que dicho sea de paso, además de aco... perdón, atemorizar, nadie ha sabido explicarme muy bien qué es)? No lo sé.

El tener toda la información del mundo a unos pocos clics de ordenador hace que, probablemente, el sistema tradicional de revistas, *peer review*, editores de renombre (no máquinas de manejar artículos), esté tan obsoleto como el papel, las plumas y el panel de expresión vertical (o pizarra para los más viejos). Pero hasta que alguien descubra una forma diferente de garantizar la fiabilidad de los resultados científicos que se publican, solo una petición y un ruego: Cuando hagáis de *referees* no tiréis por la borda un artículo, por muy malo que sea, con un comentario de dos líneas. Es imprescindible comentar, corregir lo que está mal y aconsejar. Por eso el sistema de *peer review* está en crisis. En una semana hay que emitir una opinión sobre algo que merece meditar y eso no es posible. Calidad y prisa solo están permitidos en ciertas ocasiones. Sin duda el sistema de *peer review* no es lo mejor, pero parafraseando a Johnnie Rico en *Starship Troopers* “valdrá hasta que se encuentre algo mejor o muera”.

MIGUEL Á. SIERRA  
Editor General de *Anales de Química*

<sup>1</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=VRBWLpYCPY>

<sup>2</sup> Hegedus, L. S. *Angew. Chem. Int. Ed. Eng.* **1988**, *27*, 1113-1226.

<sup>3</sup> *Nature* **2019**, *573*, 174.

## Declaración de la Real Sociedad Española de Química sobre el cambio climático y por un desarrollo sostenible

---

Con el objetivo de moderar y, en lo posible, revertir el cambio climático, del que existen evidencias científicas suficientes para afirmar que se produce como consecuencia de la acción humana, consideramos urgente concienciar a la sociedad mediante campañas de información y divulgación, abordando científicamente las siguientes acciones:

- i. Desarrollar nuevos catalizadores y materiales para convertir la energía solar en energía química mediante la generación de hidrógeno a partir de agua.
- ii. Desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de energía y de nuevos materiales para electrodos más eficientes, nuevas membranas y nuevos electrolitos.
- iii. Incorporación del metano y dióxido de carbono en productos de alto valor añadido.
- iv. Sustitución de los procedimientos de síntesis de productos energéticamente costosos por nuevos sistemas más selectivos y/o catalíticos.
- v. Empleo de disolventes y reactivos ambientalmente aceptables en procesos y en métodos de análisis.

- vi. Sustitución de elementos químicos escasos por otros abundantes en el planeta y desarrollo de nuevos procedimientos medioambientalmente aceptables para la purificación y recuperación de metales escasos.
- vii. Aprovechamientos de residuos agrícolas e industriales para la fabricación de productos de interés mediante métodos sostenibles en una economía circular.
- viii. Desarrollo de nuevos materiales de construcción.

La Química está en el centro del mayor desafío científico al que la humanidad se enfrenta en los próximos años. Por ello, los miembros de la Real Sociedad Española de Química exigen que se emprendan las acciones estratégicas necesarias a nivel nacional, tanto para incrementar la financiación de la investigación en estas áreas prioritarias, como para mejorar la formación de las nuevas generaciones en Química.

ANTONIO M. ECHAVARREN  
Presidente de la Real Sociedad Española de Química

## La enseñanza de la Física y Química en la Comunidad Valenciana: declaraciones institucionales y la realidad escolar

El president de la Generalitat Valenciana suscribió en 2015 el denominado *Pacte Social per la Ciència* en el que se reconocía y se reivindicaba a la ciencia como un pilar básico de la cultura y de la sociedad. Se trataba de protegerla para garantizar una sociedad más libre en la toma de decisiones y más responsable y comprometida con nuestro planeta. Parecería que este pacto debía ir asociado de forma singular con la mejora de la educación científica de las futuras generaciones de ciudadanos de esta comunidad. Sin embargo, la realidad escolar actual no se corresponde con lo esperado.

Cuando la administración educativa de la Comunidad Valenciana adaptó la LOMCE en el Decreto del año 2015, disminuyó en una hora la ya escasa presencia de Física y Química en el currículo autonómico, de tal forma que en 2.º de ESO el horario semanal se redujo de tres horas lectivas a dos. En este sentido, señalar que esta comunidad es la única autonomía que asigna dos horas lectivas semanales a esta materia en 2.º de ESO, contrastando con la media, que dedica 3 horas semanales y todavía más con otras comunidades, como el Principado de Asturias, La Rioja y Ceuta y Melilla que asignan justo el doble (4 horas/semana).

Dado que una carga horaria de dos horas semanales no permite la continuidad y el seguimiento necesarios para tratar los contenidos (conceptuales, procedimentales y actitudinales) de una disciplina científica en ningún nivel académico, ya antes de realizarse el recorte señalado se venía solicitando la ampliación de 2 a 3 horas semanales el número de horas asignadas a la Física y Química en 3.º de ESO, de forma análoga a lo estipulado en Euskadi, Extremadura, la Comunidad de Madrid, Castilla-La Mancha, La Rioja o Ceuta y Melilla. Otras comunidades como Cataluña o Castilla y León, asignan 2 horas a 3.º de ESO, pero aumentan a 4 las horas de Física y Química en 4.º de ESO, mientras la Comunidad Valenciana sólo dedica 3 horas en este último curso de la ESO.

En el período comprendido entre los años 2015 y 2018, desde distintos ámbitos y entidades se realizaron peticiones fundamentadas, manifestadas bien por escrito o mediante múltiples reuniones con distintos responsables de la Conselleria de d'Educació para intentar corregir la deficiente situación de la enseñanza de la Física y Química en la Comunidad Valenciana. En esas actuaciones participaron varias asociaciones de profesorado de Física y Quími-

ca (AEFiQCurie, Arquímedes y APFQCV), decanos de las Facultades de Química y de Física de esta comunidad, así como los presidentes territoriales de la RSEQ y la RSEF, el presidente de ANQUE y varios científicos premiados por la propia Comunidad Valenciana. A pesar de todo este esfuerzo colectivo, la actual administración educativa desconsideró completamente las propuestas de mejora, manteniendo en el Decreto de 2018 el agravio comparativo que supuso el anterior Decreto de 2015.

En concreto, desde al año 2015 la carga horaria asignada en la Comunidad Valenciana a la asignatura de Física y Química, en cada uno de los cursos de ESO es de: 2 horas en segundo, 2 en tercero y 3 en cuarto, sumando un total de 7 horas, a todas luces insuficiente para desarrollar todo lo establecido por la Ley. Esta distribución horaria sitúa singularmente a la Comunidad Valenciana a la cola del resto de comunidades autónomas en lo que a la enseñanza de la Física y Química se refiere, ya que en las otras comunidades se asignan, en el conjunto de los tres cursos citados, un total de entre ocho y nueve horas a la asignatura de Física y Química, e incluso en algunas, como La Rioja y en Ceuta y Melilla, se llega a las diez horas en total, mientras que la Comunidad Valenciana se queda en siete.

Como consecuencia de lo anterior, en esta comunidad existen mermas horarias, comparadas con otras comunidades, que corresponden al 33% en 2.º de ESO (respecto a todas, menos el Principado de Asturias, La Rioja y Ceuta y Melilla, en donde la reducción asciende al 50%); 33% en 3.º de ESO (Castilla-La Mancha, la Comunidad de Madrid, Extremadura, la Comunidad de Foral de Navarra, Euskadi, La Rioja y Ceuta y Melilla) y 25% en el nivel de 4.º de ESO (Castilla y León y Cataluña).

Esta situación coloca a los estudiantes valencianos en inferioridad de condiciones respecto a los del resto de España en lo que a su formación científica se refiere, particularmente con consecuencias inmediatas a la hora de afrontar con éxito estudios posteriores: bachillerato, universidad, ciclos formativos, e incluso a futuras pruebas selectivas, como las PAU. Específicamente, cuando se compara la asignación horaria de 2.º de ESO (2 h) y 3.º de ESO (2 h) de esta comunidad con las que dedican 3 horas/semana, ello supone que en la práctica en la Comunidad Valenciana se emplean 72 horas anuales de Física y Química en cada uno de estos dos niveles, mientras que en el resto se utilizan 108. Es

Las cartas al editor no requieren invitación y deben enviarse directamente a Miguel Á. Sierra: [sierraor@ucm.es](mailto:sierraor@ucm.es)

como si se hubiese decidido que el curso académico para la Física y Química debe finalizar en el mes de marzo en esta comunidad.

La disminución de la calidad de enseñanza referida no sólo concierne al alumnado de forma directa como se ha señalado en el apartado anterior, sino que también le afecta de forma indirecta al verse obligado el profesorado de Física y Química de la Comunidad Valenciana a tener que atender más grupos de alumnos para completar su horario lectivo. En concreto, si a un profesor se le asignan seis horas en su horario para los cursos de 2.º y 3.º de ESO, necesariamente debe tener un total de tres grupos (3 grupos x 2h/grupo = 6 h), lo que implica un total de 90 alumnos (30 alumnos/grupo x 3 grupos), mientras que en el resto de España, esas seis horas lectivas se concretan en dos grupos (2 grupos x 3 h/grupo = 6 h), lo que supone sólo 60 alumnos (30 alumnos/grupo x 2 grupos). Evidentemente, esta situación se agrava cuanto mayor es el número de horas asignadas de estos dos niveles. Por ello, al tener que atender el profesorado de la Comunidad Valenciana más grupos y poseer, en consecuen-

cia, un considerable mayor número de alumnos, la calidad de enseñanza también se ve reducida por este aspecto.

A lo anterior se une la desaparición de la optativa de Técnicas de Laboratorio, tanto en la ESO como en el bachillerato, lo que teniendo en cuenta las elevadas ratios y la ausencia de desdobles específicos de laboratorio, se imposibilita la realización de las imprescindibles clases prácticas de laboratorio, ya que ni hay tiempo disponible ni se dan las condiciones requeridas.

Este estado resulta incomprensible para el profesorado de Física y Química, que no entiende esta distinción singular para la educación científica del alumnado de la Comunidad Valenciana, lo que le causa una gran preocupación y un enorme desaliento.

Se precisaría una acción estatal que establezca una ponderación horaria adecuada común, mínima y necesaria, para la enseñanza de la Física y Química, que posibilite no sólo corregir la situación discriminatoria descrita, sino que evite también la generación de posibles futuros perjuicios semejantes.

JUAN QUÍLEZ PARDO  
IES Lluís Vives, Valencia



# La química española vista por sus protagonistas

Otilia Mó

F ruto de la amistad que nos une, Miguel Ángel Sierra me ha pedido a mí también que escriba un artículo para esta sección. Evidentemente teniendo en cuenta los autores que me precedieron en la misma José Elguero<sup>[1]</sup> y Manuel Martín-Lomas,<sup>[2]</sup> además del honor que ello supone, me preocupa mucho no estar al nivel, pero espero de la benevolencia de los lectores que me perdonen el atrevimiento. La ventaja es que, con la disculpa de evitar solapamientos, usaré sobre todo los datos de ambos artículos en lo que se refiere a avances normativos que nos afectaron a todos.

Como niña del rural gallego,<sup>[3]</sup> que ilustra bien la fotografía tomada en mi escuela rural a la que acudía cotidianamente, mi primer contacto con la química fue en el bachillerato en Pontevedra, donde tuve la suerte de tener un profesor estupendo que transmitía un entusiasmo enorme por el mundo de la química, aunque, por supuesto, no había laboratorio ni nada parecido.

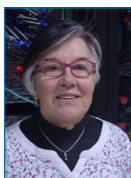
En aquel entonces, sin embargo, el mensaje que más caló en mi ánimo fue que lo realmente importante era entender las razones de los cambios en la naturaleza, convencimiento que hoy por hoy sigue siendo el combustible que alimenta mi pasión por la investigación. Ya en la Universidad de Santiago de Compostela (curso 1965-66) en Selectivo (1.º de la Licenciatura en Químicas) tuve mi primer contacto con la química moderna de la mano de Miguel Ángel Herráez, que sucedía en la cátedra de Química Física a Tomás Batuecas.<sup>[4]</sup> Herráez era poco ordenado en sus exposiciones pero abría ante nuestros ojos un nuevo mundo de orbitales, electrones y spines que hacían interesantísimo el aprendizaje de la materia. Cuando cursábamos 4.º de carrera<sup>[5]</sup> la fundación Barrié de la Maza regaló a la universidad de Santiago un ordenador IBM de 8 kB



Fotografía tomada en la Escuela Unitaria de Lira (Salvatierra de Miño, Pontevedra) en el curso 1954-1955

de memoria e IBM concedía una beca para estudiantes de 4.º o 5.º para hacer un curso de programación FORTRAN. Manuel Yáñez y yo solicitamos y compartimos dicha beca. En ese momento nuestro profesor de Química Física I, era Miguel Ángel Ríos, que además de ser el método andando como profesor, fue el que nos animó a solicitar la beca de IBM porque, en su opinión, ese era el campo más novedoso en el que la química del futuro tenía que avanzar. Esta fue la razón por la que nos inclinamos, Yáñez y yo, a hacer la tesina de licenciatura con Ríos y a desarrollar los programas de cálculo computacional para dicho trabajo.<sup>[6]</sup>

Terminada la carrera (junio de 1970) conseguimos un puesto de profesores de Física y Química en la Universidad Laboral de Cheste (Valencia), con la ventaja que ello nos permitía comenzar (en horario de tarde) nuestro trabajo de Tesis Doctoral en la Universidad de Valencia bajo la dirección de José Ignacio Fernández Alonso.<sup>[7]</sup> La capacidad de cálculo en Valencia un IBM1620 era de 16 kB, que aunque con nuestra visión de hoy supone una capacidad absolutamente ridícula, duplicaba la capacidad del que habíamos usado en Santiago. Al concluir ese curso Fernández Alonso se trasladó a la Universidad Autónoma de Madrid (creada en 1968) para poner en marcha la especialidad de



O. Mó

Profesora Emérita  
Departamento de Química  
Universidad Autónoma de Madrid  
C-e: [otilia.mo@uam.es](mailto:otilia.mo@uam.es)

Recibido: 17/06/2019. Aceptado: 01/07/2019.



Foto de los estudiantes de doctorado y posdoc de J. A. Pople en un congreso organizado por F. Schaefer en Athens (Georgia, EE. UU.) en honor de Pople, en 1989, estábamos convencidos que ese año obtendría el premio Nobel. Sin embargo, habría que esperar a 1998 para que eso sucediera

Química Cuántica y nos ofreció la posibilidad de incorporarnos con su grupo a la misma, para lo cual solicitamos y obtuvimos una beca del Ministerio de Educación para la realización de la tesis doctoral. Empieza nuestra vida de becarios de doctorado en el campus de Cantoblanco de la UAM. Recordar que en ese momento no existían paquetes de programas de cálculo ni nada parecido, así que cada uno desarrollaba su programa en fichas perforadas (el mío llegó a ser de 1600 fichas perforadas que llevábamos en 1 caja de fichas de una capacidad máxima de 2000 a la calle Vitruvio al UNIVAC 1108. En enero de 1974 defendí mi Tesis Doctoral “Contribución al estudio teórico de complejos de transferencia de carga” con la máxima calificación y premio extraordinario. Los resultados fueron publicados<sup>[8]</sup> en el *Journal of Physical Chemistry*.

En septiembre de 1971 había asistido a mi primer congreso internacional “QUITEL” congreso internacional de química teórica de expresión latina celebrado en Granada, organizado por Fernández Alonso en donde conocí a Daudel, Alberte y Bernard Pullman y muchos de los químicos teóricos de Pisa, donde en ese momento había un grupo importante de Químicos Teóricos (Scroco, Moccia, Tomasi, etc.). Este fue, sin duda, mi bautizo científico a nivel internacional. Esta serie de congresos todavía existen a pesar del indudable dominio de la lengua inglesa. Mi segundo congreso internacional fue en 1973 en Menton (Francia) en un congreso auspiciado por la IAQMS (Internacional Academy of Quantum Molecular Sciences) que había sido fundada por Raymon Daudel, Bernard y Alberte Pullman, Pople (que sería premio Nobel de Química en 1998), Mulliken, Parr, etc., y cuyo presidente de honor fue nada menos que De Broglie. Allí presenté los resultados de mi Tesis ante todos esos grandes nombres de la Química Cuántica en ese momento.

Siempre estimulados por Fernández Alonso, en 1974 nos incorporamos como Posdoctoral Research Associate al grupo de John A. Pople en la Carnegie Mellon University en Pittsburgh (Pennsylvania, EE. UU.), Manuel Yáñez con una beca de Intercambio Cultural entre España y los EE. UU.<sup>[9]</sup> y yo con una beca más modesta del Ministerio de Educación. En ese momento ya llevábamos a nuestra hija María de 18 meses con nosotros.

Los dos años de nuestra estancia fue muy rica desde el punto de vista científico, aprendimos mucho y tuvimos una participación directa en lo que sería más tarde el programa GAUSSIAN 70. El grupo de Pople era muy activo, coincidimos con muchos jóvenes científicos llamados a ser grandes figuras como Martin Head-Gordon, Saru Vishveswara, Krishnan Raghavachari, Rolf Seeger que junto con Steve Binkley desarrollaba en esos momentos los primeros códigos capaces de dar cuenta de la correlación electrónica mediante el método de perturbaciones de segundo orden de Möller y Plesset, acabaría por ello siendo mundialmente conocido como método MP2.

A nuestro regreso de EE. UU. y ya como profesores adjuntos interinos continuamos nuestra carrera como profesores, ya que antes de irnos habíamos participado en clases prácticas de diferentes laboratorios. Por lo que se refiere a la investigación en la Universidad en ese momento (1976) y a pesar de los planes de desarrollo que, de acuerdo con los datos de Martín-Lomas,<sup>[2]</sup> recibía una financiación equivalente al 0,24% del PIB, no se establecieron convocatorias reguladas y continuadas hasta la aprobación de la LRU en 1983. Fueron sin embargo unos años de movilización y discusión importantes que propiciaron la gran transformación social que estaba teniendo lugar en todo el país, pasando de una dictadura (Franco murió cuando nosotros estábamos en EE. UU.) a una incipiente democracia que



Foto de la primera reunión en Pitlochry (Escocia) del grupo COST D26 en 2005

la mayoría creíamos podía mejorar la situación de todos los españoles en todos los ámbitos. Conviene aquí recordar que el profesor Pedro Martínez Montávez en 1978 en la UAM fue nuestro primer rector democráticamente elegido. En ese mismo año obtuvimos por oposición nuestra plaza de Profesores Adjuntos.

La LRU establecía definitivamente el doble carácter docente-investigador de los profesores universitarios y es a partir de ese momento que comenzaron las convocatorias regulares de proyectos. Nosotros participamos en dichas convocatorias por primera vez en 1984 con un proyecto de la CAICYT. A partir de entonces y hasta ahora hemos mantenido nuestra financiación de proyectos de I+D del plan nacional, así como el becario de FPI asignado a cada uno de ellos.

Con proyecto propio se regularizó nuestra asistencia anual a diferentes congresos internacionales. A ello contribuyeron positivamente dos factores, la posibilidad de hacer en España cálculos *ab initio* con la versión del Gaussian-70, no comercializado a la sazón, pero que el profesor Pople nos autorizó a traer para ser instalado primero en el Univac de Vitrubio y luego en el IBM 360/65 de la UAM,<sup>[10]</sup> y la gran ventaja de tener estudiantes becados a los que dirigir la Tesis Doctoral. Todo ello nos llevó automáticamente al establecimiento de colaboraciones internacionales con otros grupos teóricos, pero también con grupos experimentales de espectrometría de masas, campo en el que los cálculos teóricos juegan un papel crucial a la hora de conocer los mecanismos de reacción que ocurren en fase gas.<sup>[11]</sup> Una sólida colaboración se consolidó, de hecho, con el grupo de los profesores J. P. Morizur y Jeanine Tortajada en la Universidad Pierre et Marie Curie con un primer proyecto de Acción Integrada Hispano-Francesa en 1994, que se repetirían periódicamente hasta 2004 con visitas anuales a París de gente de

nuestro grupo y del grupo de París a Madrid. Esta colaboración sigue estando en plena vigencia y un número significativo de nuestros estudiantes hicieron diferentes estancias en la Universidad P. et M. Curie primero y en la Université d'Evry val d'Essonne después, a la vez que nosotros recibíamos un número parecido de estudiantes franceses en nuestro grupo. Igualmente fructífera fue y es la colaboración mixta con la Université de Nice Antipolis, profesores J. F. Gal y P. C. Maria, y la Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes, profesor J. C. Guillemain, que al igual que las anteriores continúa activa.

Colaboraciones similares, aunque más cortas, se establecieron con la Universidade Nova de Lisboa, profesor M. A. Almoester-Ferreira, con la Universidad de California Irvine, profesor R. W. Taft, con la Universidad de la Sapienza de Roma, profesor F. Cacace, entre otros.

Simultáneamente y a nivel nacional nuestras colaboraciones han sido muy intensas con el grupo del profesor Abboud y el grupo de los profesores Elguero y Alkorta, ambos del CSIC, además de otras, mas puntuales, con diferentes grupos del Departamento de Química Orgánica e Inorgánica de la UAM y el de Química Orgánica de la Complutense.

Un punto de inflexión importante se produce en 2004 con la obtención del primer proyecto europeo, una Acción Cost D26, que involucraba a los grupos de Niza, Evry, Ecole Polytechnique de París, University of New Castle upon Tyne, el Ruder Boskovic Institute de Zagreb y la Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Rennes. Con todos los grupos involucrados hemos tenido colaboraciones fructíferas que se han extendido en el tiempo largamente.<sup>[12]</sup>

Después de esta primera Acción Cost hemos participado en dos más en diferentes períodos.

En 1998 el Ministerio de Educación publica un nuevo decreto de doctorado en donde se exige un mínimo de 10

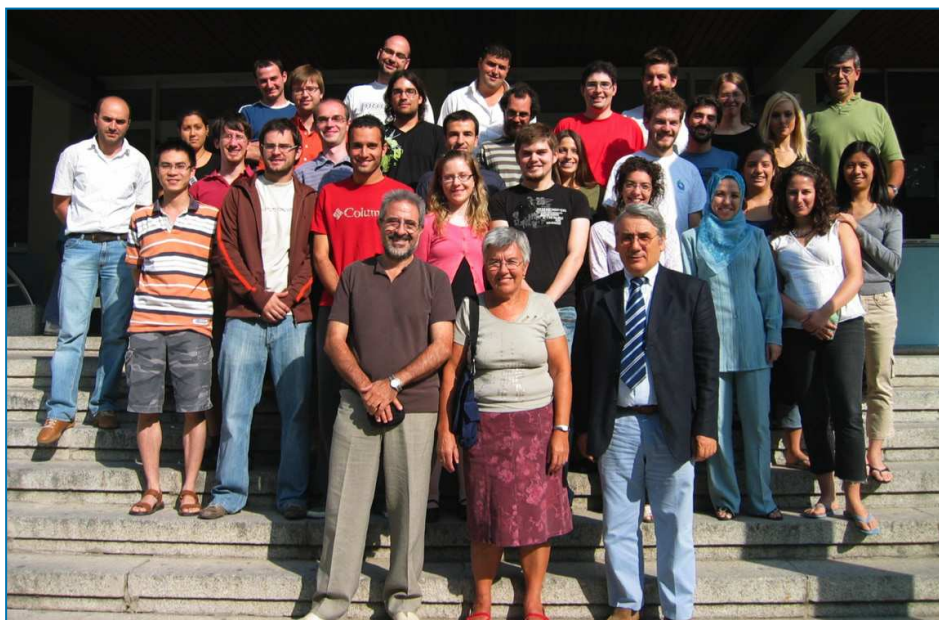
estudiantes/año por programa. Desde la perspectiva de la química teórica ese requerimiento sería inalcanzable en la mayoría de las universidades no sólo españolas, sino europeas, lo que planteaba un serio problema para el futuro inmediato de esta disciplina. A este hecho la constatación de que la formación matemática y física requerida en esta disciplina es muy alta exigía de los graduados que la tomaran un plus de formación en tales áreas, que no siempre es posible cubrir a nivel local. Con este decorado de fondo y aprovechando la estancia como catedrático visitante BBVA del Profesor australiano Leo Radom, la estancia en San Sebastián del profesor canadiense Russell Boyd, y de los profesores Ian Cooper (Reino Unido) y Jeanine Tortajada (Francia), en nuestro grupo, organizamos en La Cristalera (Residencia que la UAM tiene en las montañas de Madrid, cerca de Miraflores de la Sierra) un simposio al que invitamos a todos los grupos de químicos teóricos españoles, y en el que inevitablemente abordamos con seriedad el reto que se nos planteaba. El resultado de esa reunión no solamente fue la decisión del colectivo de químicos teóricos españoles de solicitar un doctorado interuniversitario, sino prácticamente toda la estructura y el programa del mismo. Pasados unos años surge la normativa de los máster y el programa de doctorado se convierte en un máster a nivel europeo, que con la denominación Master in Theoretical Chemistry and Computational Modelling (TCCM) y con un total de 7 universidades involucradas, que coordinadas por la UAM, incluían Perugia, Toulouse, Leuven, Groningen, Oporto y Valencia, sería el primer máster europeo con Eurolabel de la European Chemistry Thematic Network (ECTN) y que en 2009 recibiría el marchamo Erasmus Mundus por 5 ediciones, y posteriormente prorrogado por 3 ediciones más, dentro del nuevo marco Erasmus+. Aunque el Master Erasmus Mundus TCCM solo incluía por parte de Es-

paña las Universidades Autónoma de Madrid y Valencia, era seguido por los estudiantes de los demás grupos teóricos de otras universidades que participan en este mismo máster como instituciones asociadas al mismo.

Este mismo consorcio ampliado con la Universidad del País Vasco, Barcelona, Viena y Pierre et Marie Curie puso en marcha un Doctorado Europeo para el que se consiguió un proyecto ITN EJD en 2013. Ambos proyectos, Master y Doctorado, en este momento están a punto de finalizar, pero nuestro colectivo ya ha elaborado propuestas avanzadas a ambos niveles para seguir concurriendo a las convocatorias europeas.

Una consecuencia adicional de nuestra reunión de 1998 en Miraflores ha sido que a partir de ese primer evento y con una periodicidad bianual la comunidad española de químicos teóricos ha venido organizando la serie de congresos internacionales "Electronic Structure. Principles and Applications" (ESPA) especialmente pensado para que nuestros estudiantes de doctorado tengan un foro internacional para presentar sus resultados. El ESPA 2018 se ha celebrado en Toledo y hacía el número 11 de la serie, el siguiente se celebrará en Vigo en 2020.

El colectivo español de químicos teóricos participa además en diversos foros internacionales, ya sea a nivel personal o como representantes de nuestras instituciones o de nuestro país. Sin ir más lejos, he sido, por ejemplo, la primera representante española en la ECTN. El profesor Joan Bertrán lo fue en el EUCCO (European Comision on Computational Chemistry), y le sucedería el profesor Manuel Yáñez, que también lo es en la World Association on Theoretical Oriented Chemists (WATOC), cuya actividad fundamental, además de otorgar las Dirac y Shrödinger Medals para investigadores junior y senior, respectivamente, es la organización trianual del Congreso mundial más importante en este campo. En julio de 2011 la organiza-



Grupo de estudiantes y profesores de la primera promoción del máster europeo "Theoretical Chemistry and Computational Modelling", en el curso intensivo 2010 celebrado en la UAM



Anuncio en la Facultad de Medicina de la Universidad de Santiago del WATOC 2011

ción de dicho Congreso nos fue concedida y el congreso se celebró en Santiago de Compostela con una asistencia de 1350 congresistas de 62 nacionalidades, lo que suponía un record absoluto en toda la historia de estos eventos.

En ese mismo período de tiempo, a nivel español se ponían en marcha los proyectos Consolider 2010. Esta iniciativa abrió las puertas a la cooperación entre grupos de investigación de todo el país, lo que permitía potenciar una de las características más definitorias de la ciencia moderna, la interdisciplinaridad, permitiendo que grupos de química teórica como el nuestro trabajaran coordinadamente con grupos experimentales en muy diversas áreas, que a su vez contribuyó a la creación de redes científicas eficaces no solo a nivel nacional sino también a nivel internacional.

El 1 de mayo de 2008 fui nombrada Directora General de Programas y Transferencia de Conocimiento de la Secretaría de Estado de Universidades del Ministerio de Ciencia e Innovación. Durante el corto tiempo que trabajé en ese puesto fui responsable de los programas del plan nacional de I+D, Consolider, y becas FPI, pero también de la política de parques científicos y tecnológicos cuya financiación experimentó una gran expansión en ese período. Pero si de algo me siento especialmente orgullosa fue de la puesta en marcha del programa de Campus de Excelencia, que propició el que las Universidades públicas hiciesen un examen crítico de su actividad y de su potencial, que les llevó a definir con realismo sus áreas de

especialización y que fomentó una colaboración planificada con los distintos Organismos Públicos de Investigación (OPIS). Esto dio una nueva dimensión a la investigación científica en nuestro país.

A nivel de los investigadores jóvenes, los contratos Juan de la Cierva y Ramón y Cajal han supuesto una manera eficaz de reincorporar a los investigadores posdoctorales más brillantes a las instituciones españolas. También apuntar que a nivel de las diferentes Comunidades Autónomas han surgido distintas iniciativas para promover la generación de conocimiento. Destacaría especialmente el caso de las Comunidades de Cataluña (Programa ICREA) y País Vasco (Programa Ikerbasque), aunque en todas las comunidades se ha hecho un esfuerzo en esta dirección, si bien con diferente presupuesto.

Lamentablemente, al llegar a este punto, me resulta doloroso constatar que debido a la crisis económica de 2009-2010 o usándola como justificación, ha habido un claro recorte en la financiación de proyectos I+D+i, de contratos de personal, tasa de reposición 0, etc. que han afectado muy negativamente a la ciencia española en general y a la química en particular.<sup>[13]</sup>

Como hemos indicado anteriormente, a lo largo de este período nuestro grupo de investigación ha centrado sus esfuerzos en el estudio teórico de las propiedades intrínsecas de diferentes sistemas de interés químico y bioquímico, así como a la interacción de los mismos con cationes metálicos y más recientemente al estudio de interacciones no-covalentes como origen y motor de un gran número de fenómenos en química. Como no puede ser de otra manera en el marco de la investigación moderna, este esfuerzo se ha realizado en colaboración con diferentes grupos tanto nacionales como internacionales<sup>[14]</sup>. La lista de publicaciones puede encontrarse además de en las plataformas de Google scholar y web of Science en el número especial de *J. Phys. Chem. A* **2018**, *122*, 5681-5697, que esta revista nos ha dedicado, al profesor Yáñez y a mí, con motivo de nuestra jubilación.

Creo que puede ser un perfecto reflejo de la evolución de la química en general, y de la química teórica en particular a lo largo de estos años, el seguimiento de las carreras de nuestros doctores, de los doctores egresados de las diferentes instituciones españolas. Permítanme que particularice esta afirmación en el colectivo que mejor conozco, el de los doctores en Química Teórica y Computacional de mi entorno más inmediato, que además de tener una fuerte base en Física y Matemáticas desarrollan importantes habilidades en informática y desarrollo de software, lo que les ha abierto, en muchos casos, las puertas en el mercado laboral de la informática aplicada. Así nuestro primer doctor (1982) después de sus estancias posdoctorales ha terminado siendo un alto responsable en una empresa de servicios informáticos; los tres siguientes (1985, 1986 y 1990) después de brillantes carreras científicas son profesores universitarios; el siguiente (1994) es director de un centro de Supercomputación; la siguiente (1998) se habilitó en la Freie Univ. de Berlín y en la actualidad es Full professor de la Universidad de Viena; la siguiente (1998), a la sazón profesora de bachillerato, hizo su tesis con dedicación par-



Foto de nuestro grupo de investigación en 2013

cial y ahora ya Doctora, continúa siendo profesora de bachillerato; la siguiente (1999) después de una gran carrera en empresas informáticas es empresaria en nuestro país. El siguiente (2002) es de nuevo profesor universitario. A este le sigue (2003) un director técnico en un centro de Supercomputación y una contratada Ramón y Cajal (2005).

Y estamos en los albores de la crisis. A partir de ahí empezamos a encontrarnos con harta frecuencia con casos en los que después de una o varias estancias posdoctorales en centros internacionales nuestros postdocs se encuentran totalmente abandonados. Con la disculpa de la crisis económica se rebajan claramente las aportaciones a los servicios públicos y en particular a la investigación, y volviendo a los doctores egresados de nuestro grupo, los postdocs de ese período no tienen cabida en nuestro sistema. Afortunadamente para ellos, pero no para nuestro país, uno se encuentra desarrollando su trabajo de investigación en un College en Irlanda, otro como director de Laboratorio de Modelización de reciente creación en una empresa alemana, y el tercero como coordinador de un laboratorio científico en Dinamarca. En aras de la ecuanimidad, debo reconocer que en estos últimos meses hay indicios que conducen a la esperanza, pero sin demasiadas alharacas. Los dos últimos doctores que leyeron sus Tesis en 2014 y 2017, se encuentra un panorama ligeramente más positivo, y la primera regresa a la UAM dentro del programa de la CAM de captación de talento y la segunda se encuentra como postdoc en Estocolmo.

Creo que es evidente que nuestros doctores han hecho toda una carrera homologada a nivel internacional y demostrado su excelente formación, lo que claramente contrasta con las épocas de nuestro inicio de carrera profesional, pero no siempre nuestro país les ofrece oportunidades para que puedan invertir su *saber hacer* dentro de sus fronteras. Es urgente por tanto entender que la inversión en I+D+I es una inversión de futuro de la que depende

nuestro devenir en una sociedad cada vez más avanzada científica y tecnológicamente, es impensable volver al “que investiguen ellos”. Todos hemos de hacer un gran esfuerzo para conseguir que nuestra sociedad así lo comprenda y se pueda establecer una política científica coherente y a largo plazo.

A modo de conclusión creo que solo me queda resaltar que nuestra generación ha vivido la expansión e internacionalización de la Química española, con un discurrir difícil, pero que nos permitió alumbrar varias generaciones de científicos punteros a nivel mundial, lo que llevó a la ciencia española desde las catacumbas en las que se encontraba a principios del pasado siglo, salvo honradísimas excepciones, hasta puestos preeminentes en los albores del actual. Ojalá que esta etapa más reciente en la que los fondos destinados a la I+D a nivel nacional ha descendido notoriamente a pesar de los esfuerzos hechos por distintas organizaciones en contra de este hecho, sea solo un mal sueño, y que de nuevo reine la sensatez a la hora de mirar hacia el futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Elguero . *An. Quím.* **2015**, *111*, 25-28.
- [2] Manuel Martín-Lomas. *An. Quím.* **2015**, *111*, 77-82.
- [3] Más detalles pueden encontrarse en *J. Phys. Chem. A* **2018**, *122*, 5673-5678.
- [4] Tomás Batuecas era un ilustre catedrático de Química Física, bajo cuya dirección se obtuvieron los valores numéricos, con la mas alta precisión posible en esos momentos, de un gran número de masas atómicas (todavía cuando nosotros llegamos seguía dirigiendo una tesis doctoral en el tema). Además fue el gran defensor de que la unidad de masas atómicas fuera 1/12 la masa atómica del isótopo 12 del Carbono consiguiendo así que dicho valor fuese el adoptado por físicos y químicos.

- [5] En ese curso nuestro profesor de Química Orgánica I era Ignacio Ribas Marqués, uno de los participantes en el primer GEQOR que cita Elguero y que en ese momento ya era muy conocido por el descubrimiento de nuevos productos naturales y de hecho el que atraía a más estudiantes para hacer la Tesis Doctoral.
- [6] M. A. Herráez, O. Mó y M. A. Ríos. Estudio Teórico de la Reactividad de Cresoles. Cloración. *Afinidad* **1971**, *28*, 1135-1137.
- [7] Fernández Alonso había hecho la Tesis Doctoral en Santiago de Compostela bajo la dirección de Tomás Batuecas, aunque, como todo el mundo en aquellos años, la tuvo que presentar en la Universidad Central de Madrid, ya que era en la única universidad donde estaba permitido. Había hecho estancias posdoctorales en CALTECH y en París.
- [8] O. Mó, M. Yáñez y J. I. Fernández Alonso. Theoretical study of charge-transfer complexes. *J. Phys. Chem.* **1975**, *79*, 137-142.
- [9] Las becas de Intercambio cultural entre España y los EE. UU. estaban gestionadas por la Fundación Fulbright servían a modo de pago de los EE. UU. por el uso de las bases militares que se les había permitido instalar en España. Con esas becas muchos futuros científicos españoles tuvieron la oportunidad de formarse en los mejores grupos de investigación de EE. UU. Nosotros tuvimos la suerte de hacerlo en el grupo de J. A. Pople que sería premio Nobel de Química en 1998.
- [10] Al poco tiempo de regresar de EE. UU. IBM suscribió un acuerdo con la UAM por el que instaló un centro de cálculo propio en la UAM con el compromiso que permitirían a los investigadores de la UAM parte de su uso. El primer Centro de Computación de la UAM se instalaría años más tarde siendo Cayetano López rector (1985-1994).
- [11] M. Alcamí, O. Mó, O. y M. Yáñez, Computational Chemistry. A useful (some times mandatory) tool in mass spectrometry studies. *Mass Spectrom. Rev.* **2001**, *20*, 195-245.
- [12] Detrás de este tipo de proyectos europeos aparecerían los financiados por la ERC (European Research Council, 2007) organismo que tiene como misión financiar proyectos de excelencia y punteros en su actualidad y enfoque, y además fortalecer el sistema europeo de investigación. Este hecho ha ayudado a cambiar también en España el panorama científico. Es importante indicar que esta financiación está diseñada para ser una financiación extraordinaria y por tanto no se debe tomar como sustitutiva de la financiación de cada país a su sistema de I+D+i.
- [13] Durante años, con mayor o menor regularidad el presupuesto para I+D dedicado al plan nacional se fue incrementando, lo cual supuso que un gran número de grupos con una producción científica razonable consiguieran financiación. Una de las peores consecuencias de la última crisis económica fue la reducción notable (ver los informes de la COSCE) del presupuesto dedicado a I+D. En mi opinión este es un error gravísimo ya que esa es la mejor inversión para el futuro del país ([http://www.cosce.org/pdf/informe\\_COSCE\\_DECIDES\\_2018\\_politicas\\_cientificas.pdf](http://www.cosce.org/pdf/informe_COSCE_DECIDES_2018_politicas_cientificas.pdf)).
- [14] la lista de colaboradores puede consultarse en la publicación de *J. Phys. Chem. A* **122**, 5679-5680 (2018) que aparece en el número especial que dicha revista nos ha dedicado con motivo de nuestra jubilación.



EuChemS  
European Chemical Society

**IYPT2019**

**International Year of the Periodic Table  
of Chemical Elements**

IUPAC  
INTERNATIONAL UNION OF  
PURE AND APPLIED CHEMISTRY

UNESCO  
United Nations  
Educational, Scientific and  
Cultural Organization

2019 IYPT  
International Year  
of the Periodic Table  
of Chemical Elements

# Reacción de hidroboración de olefinas: 60 años desde su descubrimiento y 40 años desde la concesión del premio Nobel a Herbert C. Brown

Efraim Reyes

**Resumen:** En 2019 se cumplen 40 años desde que se otorgó el premio Nobel al Profesor de química Herbert C. Brown (1912-2004) quien centró gran parte de sus investigaciones en la química del boro (B). Concretamente dedicó sus esfuerzos al estudio de las reacciones de hidroboración de sistemas olefinicos, transformaciones que han demostrado su eficacia y utilidad desde su descubrimiento. En la siguiente comunicación se resumen los avances más importantes desde 1959 (hace 60 años) y se realiza un análisis de las perspectivas de futuro de esta reacción.

**Palabras clave:** Hidroboración, Alquenos, Borano, Boro, Boronato.

**Abstract:** 2019 marks 40 years since the Nobel Prize was awarded to chemistry Professor Herbert C. Brown (1912-2004), who focused much of his research on boron (B) chemistry. Specifically, he made many efforts in the study of hydroboration reactions of olefins, transformations that have proven their effectiveness and usefulness since its discovery. The following communication summarizes the most important advances since 1959 (60 years ago) and future perspectives of this reaction are analyzed.

**Keywords:** Hydroboration, Alkenes, Borane, Boron, Boronate.

## INTRODUCCIÓN

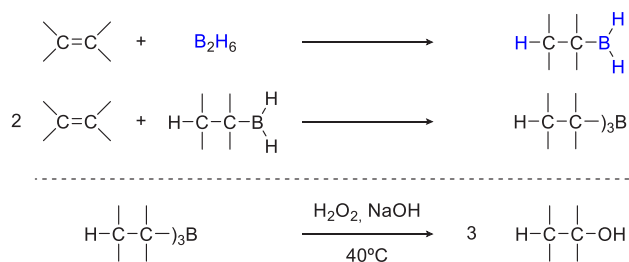
En 1959 el profesor de Química de la Universidad de Purdue (USA) Herbert C. Brown (Londres, 22 de mayo de 1912; Lafayette, Indiana, 19 de diciembre de 2004) junto con uno de sus colaboradores Dr. B. C. Subba Rao (Mysore, India, 8 de diciembre de 1923; Mysore, India, 9 de agosto de 2017) descubrieron que el diborano  $B_2H_6$  (dímero del borano,  $BH_3$ ) era capaz de adicionarse de manera eficaz a los extremos del sistema  $\pi$  de una olefina en lo que hoy conocemos como reacción de hidroboración.<sup>[1]</sup> Fue también de suma importancia observar que el trialkilborano generado tras la adición podía transformarse en el correspondiente alcohol por tratamiento básico en medio oxidante (Esquema 1).



E. Reyes

Departamento de Química Orgánica II.  
Universidad del País Vasco (UPV/EHU).  
Barrio Sarriena s/n, Leioa 48940, Bizkaia (España).  
C-e: [efraim.reyes@ehu.es](mailto:efraim.reyes@ehu.es)

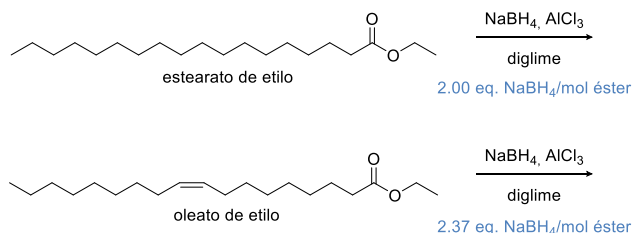
Recibido: 16/07/2019. Aceptado: 10/09/2019.



**Esquema 1.** Reacción de hidroboración y elaboración oxidante en medio básico para obtención de alcoholes

En los años siguientes al descubrimiento de esta reacción, se llevaron a cabo investigaciones dirigidas principalmente a la elucidación del mecanismo y a la comprensión de la selectividad observada en las reacciones de hidroboración, así como a la mejora de la regio- y diastereoselectividad de algunas hidroboraciones. Fue también de suma importancia el descubrimiento y desarrollo de reactivos quirales para la preparación de alcoholes de manera enantioenriquecida. Por éstas y otras investigaciones en torno a la “química del boro” H. C. Brown obtuvo el premio Nobel de Química en 1979.<sup>[2]</sup> En la presente revisión se destacan los descubrimientos más importantes en torno a la reacción de hidroboración de alquenos desde su origen hasta la obtención del premio Nobel otorgado a H. C. Brown, y se resumen los avances más significativos observados desde entonces, incluyendo las reacciones catalíticas de hidroboración, así como la versatilidad sintética de los compuestos organoborados.





**Esquema 2.** Reacción de reducción de ésteres de ácidos grasos llevada a cabo por H. C. Brown y B. C. Subba Rao

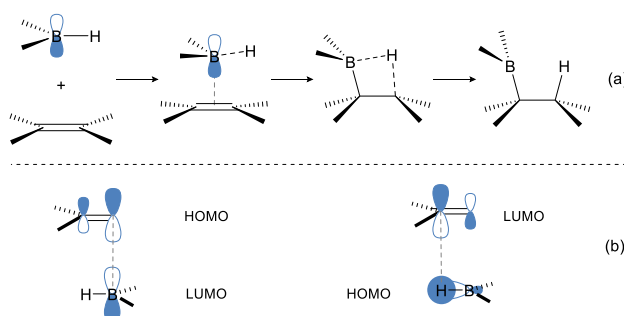
## DESCUBRIMIENTO DE LA REACCIÓN

A finales de la década de 1950, durante el estudio de reducciones de diferentes compuestos orgánicos frente a reactivos tanto electrófilos como nucleófilos, H. C. Brown descubrió que dos compuestos orgánicos muy similares, el estearato de etilo y el oleato de etilo, eran capaces de adicionar 2.00 y 2.37 equivalentes respecto de agente reductor (borohidruro sódico,  $\text{NaBH}_4$ ) por cada mol de éster, respectivamente (Esquema 2).<sup>[3]</sup> El segundo de los ésteres de ácidos grasos, el oleato de etilo, es un derivado de ácido graso monoinsaturado y es dicha insaturación u olefina la que adicionaba parte del reactivo reductor.

Este hecho marcó el inicio de un área hasta entonces casi inexplorada, que abrió las puertas a la transformación de alquenos a través del empleo de reactivos suaves como son los derivados organoborados. Tan pronto se dio esta observación, se iniciaron las tareas investigadoras conducentes al descubrimiento de que el reactivo de boro más simple, el diborano ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ), era capaz de adicionarse a olefinas de manera eficaz en una reacción que cursaba cuantitativamente hasta la formación del correspondiente trialquilborano. Si bien no fue ésta la primera vez que se describía la adición de este reactivo a olefinas (o alquinos),<sup>[4]</sup> sí era pionera dado que, realizada en presencia de disolventes etéreos, permitía que dicha hidroboration pudiera conducirse a bajas temperaturas (*c.a.* 25°C). De hecho, tal y como describía el propio Brown “la reacción de diborano con olefinas es de hecho algo lenta, siendo la adición de meras trazas de éter la que cambia la reacción lenta inicial a una reacción rápida”.

## MECANISMO DE LA REACCIÓN

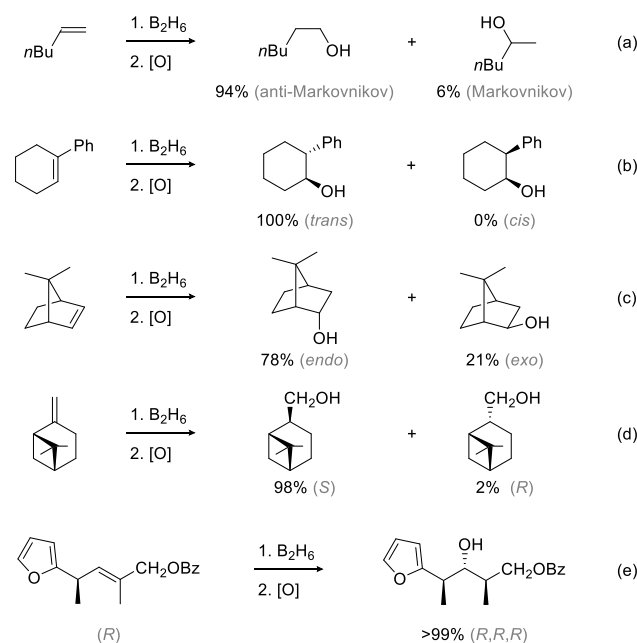
Los resultados obtenidos con los primeros ensayos realizados empleando diversos alquenos en reacciones de hidroboration permitieron ya proponer un mecanismo simplificado que justificaba la reactividad y selectividad observada al utilizar alquenos de diferente naturaleza. De manera sencilla, se sabe que el átomo de boro en el reactivo borano ( $\text{BH}_3$ ) es electrofílico dada su electronegatividad Pauling y que la reacción ocurre siguiendo una adición de tipo *sin* (aproximación suprafacial) de manera más o menos concertada a través de un estado de transición de



**Esquema 3.** (a) Mecanismo simplificado de la reacción de hidroboration de alquenos y (b) interacciones entre los OM de los reactivos implicados

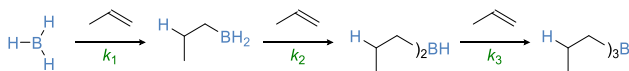
cuatro miembros, tras una primera coordinación de dicho átomo de boro con el sistema  $\pi$  del alqueno (Esquema 3a). Acudiendo al modelo de orbitales moleculares, en esta reacción se establecen interacciones HOMO/LUMO entre las especies implicadas (Esquema 3b). Este mecanismo simplificado justifica la reactividad observada en reacciones de hidroboration así como la selectividad obtenida cuando se emplean alquenos no simétricos.

La velocidad de reacción sigue una cinética de segundo orden (primer orden en alqueno y en diborano) y presenta efecto isotópico primario al emplear diborano deuterado ( $\text{B}_2\text{D}_6$ ). Más importante es el hecho de que este mecanismo sencillo puede predecir la regio- y diastereoselectividad de la hidroboration de alquenos estando ésta gobernada principalmente por repulsiones estéricas (Esquema 4). Así, la adición del átomo de boro durante la reacción ocurre sobre el átomo de carbono menos impedido formando, en última instancia, los alcoholes anti-Markovnikov (Esquema 4a); dicha adición es *sin* selectiva formando los alcoholes *trans*

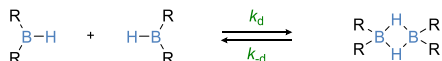


**Esquema 4.** Selectividad observada en diferentes hidroborationes de alquenos: (a) regioselectividad anti-Markovnikov; (b) selectividad *sin*; (c) selectividad *endo*; (d) selectividad facial (inducción asimétrica) en moléculas cíclicas y (e) acíclicas

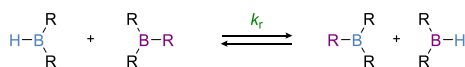
Reacciones de hidroboração



Reacciones de dimerización



Reacciones de redistribución



Esquema 5. Reacciones que toman parte en la reacción global de hidroboração de alquenos

al emplear cicloalquenos trisustituídos (Esquema 4b); la aproximación ocurre por la cara menos impedida formando el aducto *endo* (Esquema 4c) con completa diastereoselectividad al emplear moléculas quirales cíclicas (Esquema 4d) y estando la diastereoselectividad facial gobernada por la conformación más estable de los alquenos de partida al emplear moléculas acíclicas (Esquema 4e).

Sin embargo, la hidroboração de olefinas empleando diborano cursa a través de un mecanismo complejo debido al número de especies diferentes que entran en juego en la propia reacción: además de la etapa inicial de adición de borano al alqueno, este alquilborano puede actuar como reactivo de hidroboração con una segunda unidad de alqueno, y lo mismo sucede con el dialquilborano así generado (Esquema 5). Asimismo, existen reacciones de dimerización entre las diferentes especies organoboradas y de redistribución.<sup>[5]</sup> Todas estas reacciones son determinantes no sólo de la velocidad de reacción sino también de la regio- y estereoquímica del producto final.

En lo referente a la velocidad de reacción, al emplear alquenos impedidos la cinética de la hidroboração viene determinada por  $k_1$  ( $k_2$  y  $k_3 = 0$ ) lo que puede justificarse por la disminución de la acidez de Lewis del átomo de B en las especies organoboradas con respecto al diborano. Análogamente, al emplear alquenos no impedidos la cinética viene determinada indirectamente por  $k_1$  ( $k_1 \ll k_2, k_3$ ) hecho que puede justificarse al comprobar que las reacciones de dimerización y retrodimerización ( $k_d$  y  $k_d$ ) de las especies borano y diborano son las limitantes de la velocidad de reacción. Por otra parte, la regio- y la estereoquímica de la reacción global viene determinada por el conjunto de las reacciones de hidroboração siendo la primera etapa la menos selectiva al emplear diborano como reactivo de hidroboração.

### REACTIVOS DE HIDROBORACION

Hoy en día la reacción de hidroboração de alquenos se encuentra bien establecida siendo una herramienta muy útil para la transformación de olefinas con altos rendimientos y elevada selectividad. Sin embargo, esto no hubiera sido posible sin el diseño de nuevos y más eficaces reactivos de

hidroboração.<sup>[6]</sup> Si se atiende al mecanismo general de la reacción, puede observarse que sustratos mono- y dialquilborados pueden tomar parte en una segunda y tercera adición a una olefina. De hecho, esta reacción suele ser en general más rápida y selectiva, lo que justifica el empleo de éstos como reactivos iniciales de hidroboração de alquenos.

Los primeros reactivos en ser empleados fueron aquellos que se obtenían por hidroboração de alquenos impedidos: al utilizar estos alquenos en reacciones de hidroboração, ésta se detenía en la primera o segunda etapa generando el correspondiente mono- o dialquilborano, el cual podía emplearse en una nueva reacción de hidroboração con otra unidad diferente de alqueno. Estos alquilboranos demostraron ser muy útiles dados los altos valores de regioselectividad observada al ser empleados, en especial, en aquellos casos en los cuales el diborano resultaba inefectivo. Así, por ejemplo, el empleo de éstos en reacciones de hidroboração de estirenos o de alquenos 1,2-disustituídos (sustratos que muestran baja o nula selectividad al emplear diborano como reactivo de hidroboração) mejora la regioselectividad observada hasta la obtención de valores excelentes. De manera análoga, pueden emplearse para la mejora de la diastereoselectividad *endo* de la reacción de hidroboração al emplear algunos bicicloalquenos (Tabla 1).<sup>[7]</sup>

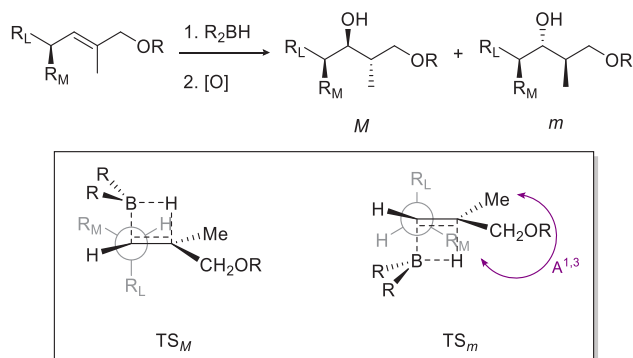
Tabla 1. Mejora de la selectividad en reacciones de hidroboração empleando mono- y dialquilboranos

	$B_2H_6$	ThexBH <sub>2</sub>	Sia <sub>2</sub> BH	9-BBN
	80:20 <sup>[a]</sup>	95:5 <sup>[a]</sup>	98:2 <sup>[a]</sup>	98.5:1.5 <sup>[a]</sup>
	57:43 <sup>[a]</sup>	66:34 <sup>[a]</sup>	97:3 <sup>[a]</sup>	99.8:0.2 <sup>[a]</sup>
				97:3 <sup>[b]</sup>

<sup>[a]</sup> Se obtiene el alcohol anti-Markovnikov como regioisómero mayoritario.

<sup>[b]</sup> Se obtiene el producto *endo* como isómero mayoritario.

En el caso de emplear como sustratos alquenos quirales, la reacción de hidroboração resulta ser altamente diastereoselectiva al utilizar diborano como agente de hidroboração (véase, por ejemplo, Esquema 4d-e). Este hecho ha quedado demostrado en multitud de ejemplos tanto para alquenos cíclicos como acíclicos pudiéndose además predecir la diastereoselectividad de manera sencilla

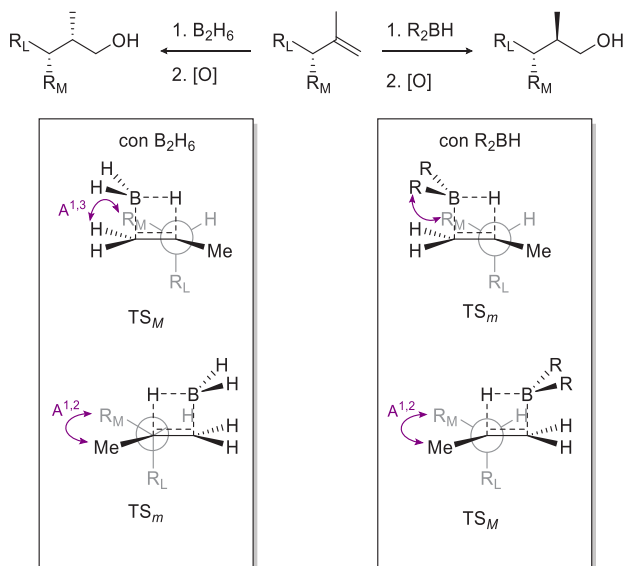


**Esquema 6.** Diastereoselectividad de la reacción de hidrobromación empleando alquenos trisustituidos

tras analizar las conformaciones de los sustratos de partida. En estos casos, el empleo de otros reactivos de hidrobromación diferentes al diborano puede justificarse por las condiciones de reacción a utilizar y no tanto por la mejora de la selectividad observada. De hecho, tanto la regioselectividad como la diastereoselectividad suelen alcanzar los mismos valores independientemente que reactivo se emplee. Así, por ejemplo, la hidrobromación de alquenos trisustituidos ocurre de manera satisfactoria con diborano (u otros alquilboranos) pudiéndose además explicar la selectividad observada a través de un modelo estereoquímico cuyo estado de transición minimiza las tensiones 1,3-alílicas ( $A^{1,3}$ ) en el alqueno de partida y donde ocurre la aproximación del borano o alquilborano por la cara menos impedida (Esquema 6).<sup>[8]</sup>

Mucho más interesante resulta ser la reacción de hidrobromación llevada a cabo sobre compuestos acíclicos quirales que contienen olefinas 1,1-disustituidas: empleando este tipo de sustratos se observa diastereodivergencia al utilizar diborano y dialquilboranos. Como ocurre en el caso de olefinas trisustituidas, la formación de uno u otro diastereoisómero viene gobernada por la minimización de las repulsiones estéricas: en este caso particular compiten las tensiones alílicas-1,2 y 1,3 en el alqueno junto con la interacción de los grupos R unidos al átomo de boro con los sustituyentes del alqueno (Esquema 7). Así, con  $B_2H_6$  se formará preferentemente el diastereoisómero generado a través de un estado de transición donde se minimizan tensiones alílicas-1,2; sin embargo, empleando dialquilboranos se observan interacciones más desestabilizantes a través de un estado de transición similar entre los sustituyentes del alqueno ( $R_M$ ) y el borano (R).<sup>[8,9]</sup>








En la década de 1960 la hidrobromación/oxidación de alquenos centró su atención en la síntesis asimétrica, es decir, en la construcción de los alcoholes de manera enantioselectiva. Para ello, inicialmente se exploraron reactivos de hidrobromación derivados de productos naturales, en especial derivados monoterpénicos, reactivos que eran sintetizados mediante una hidrobromación hasta el correspondiente mono- o dialquilborano. Así, se exploraron reactivos de hidrobromación derivados del ( $\alpha$ )-pineno, (+)-limoneno, (+)-longifoleno, (+)-2-careno y (+)-3-careno.<sup>[10]</sup> De todos



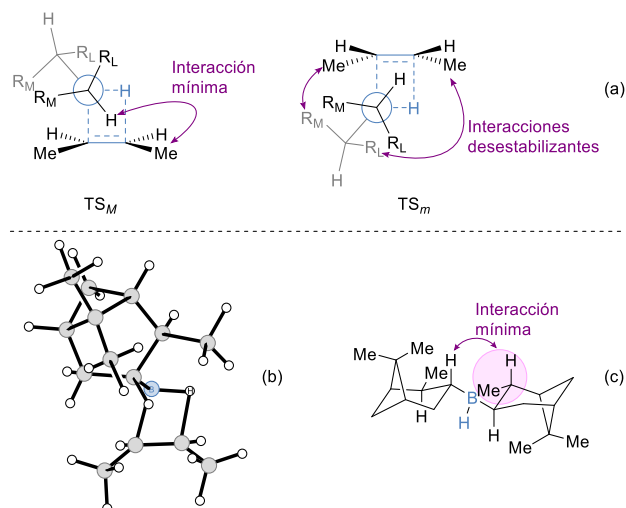
**Esquema 7.** Reacción diastereodivergente de hidrobromación sobre alquenos 1,1-disustituidos empleando diborano o dialquilboranos

ellos, los mono- y dialquilboranos derivados del primero fueron los que mejores resultados ofrecieron en reacciones enantioselectivas de hidrobromación para multitud de alquenos.<sup>[11]</sup> En concreto, el diisopinocampfeilborano ha demostrado su eficacia en la hidrobromación/oxidación de alquenos disustituidos de configuración *Z*, mientras que su homólogo monoisopinocampfeilborano ha resultado ser útil en la reacción análoga de alquenos de configuración *E* y de alquenos trisustituidos (Tabla 2).

**Tabla 2.** Reactivos de hidrobromación en síntesis asimétrica<sup>[a]</sup>

	1. $RR'BH$ 2. [O]	$R^1$ $R^2$ $R^3$	$R^1$ $R^2$ $R^3$
			
(+)-lpc <sub>2</sub> BH	(+)-lpcBH <sub>2</sub>		
	98% e.e. ( <i>R</i> )	24% e.e. ( <i>S</i> )	
	13% e.e. ( <i>S</i> )	73% e.e. ( <i>S</i> )	
	14% e.e. ( <i>S</i> )	53% e.e. ( <i>R</i> )	
	22% e.e. (1 <i>S</i> ,2 <i>S</i> )	66% e.e. (1 <i>R</i> ,2 <i>R</i> )	
	21% e.e. ( <i>R</i> )	–	

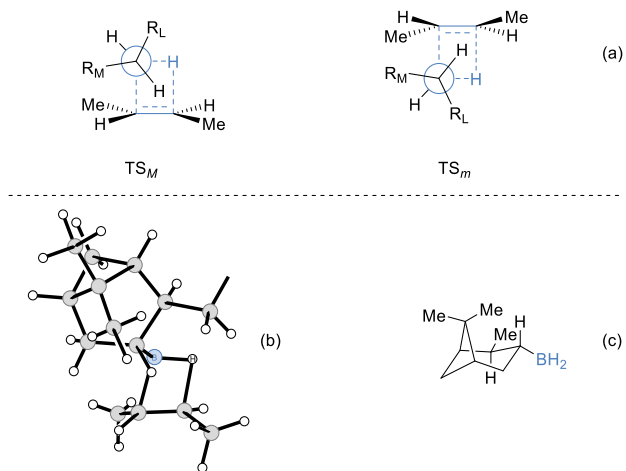
<sup>[a]</sup> Se obtiene el alcohol de la configuración indicada en cada caso.



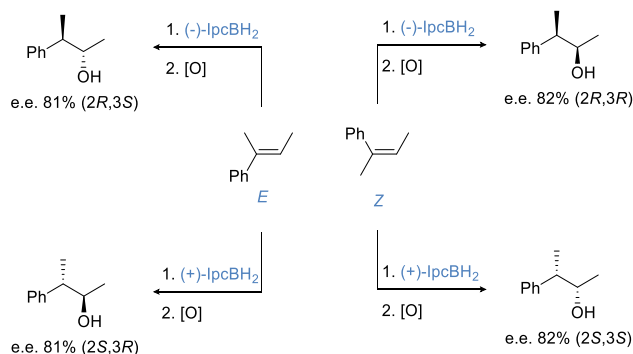
**Figura 1.** Modelo estereoquímico de la reacción de hidrobioración empleando (+)-lpc<sub>2</sub>BH: (a) diagrama de los estados de transición  $TS_M$  y  $TS_m$  que conducen a ambos alcoholes enantioméricos *R* y *S*, respectivamente; (b) estado de transición de mínima energía (una unidad de ( $\alpha$ )-pineno se ha omitido por claridad); (c) conformación preferente del reactivo de hidrobioración (+)-lpc<sub>2</sub>BH

La estereoquímica observada puede razonarse acudiendo a un modelo estereoquímico sencillo.<sup>[8]</sup> En el primero de los casos, la reacción con diisopinocampfeilborano, ocurre preferentemente a través de un estado de transición  $TS_M$  donde se minimizan interacciones entre el reactivo de hidrobioración y los sustituyentes del alqueno (Figura 1a-b). Además, hay que tener en cuenta que el reactivo adopta una conformación donde se dan mínimas interacciones entre los sustituyentes de las dos unidades de ( $\alpha$ )-pineno (Figura 1c).

Un estudio idéntico llevado a cabo en la reacción de hidrobioración de (2*E*)-but-2-eno permite establecer de nuevo que en el estado de transición que conduce al enantiómero mayoritario se minimizan tensiones estéricas entre



**Figura 2.** Modelo estereoquímico de la reacción de hidrobioración empleando (+)-lpcBH<sub>2</sub>: (a) diagrama de los estados de transición  $TS_M$  y  $TS_m$  que conducen a ambos alcoholes enantioméricos *R* y *S*, respectivamente; (b) estado de transición de mínima energía (un H unido al átomo de B se ha omitido por claridad); (c) conformación preferente del reactivo de hidrobioración (+)-lpcBH<sub>2</sub>



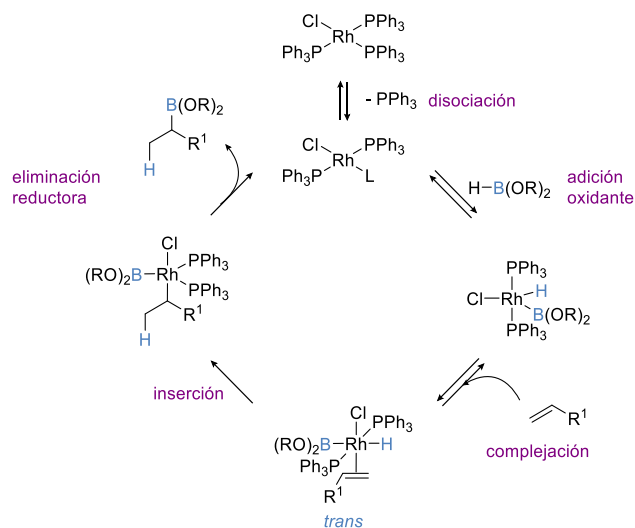
**Esquema 8.** Formación de los cuatro posibles isómeros del 3-fenilbutan-2-ol empleando lpcBH<sub>2</sub> como reactivo de hidrobioración

los sustituyentes del alqueno y los del reactivo de hidrobioración (Figura 2). En este caso, la diferencia energética de ambos estados de transición es de  $\Delta\Delta G^\ddagger=1.3$  Kcal/mol la cual justifica la enantioselectividad observada en los alcoholes finales (73% e.e.).

Estos reactivos son los más empleados para llevar a cabo la síntesis asimétrica de alcoholes u otros compuestos orgánicos. De hecho, dado que ambos enantiómeros del ( $\alpha$ )-pineno son comercialmente accesibles es posible obtener los correspondientes reactivos de hidrobioración enantiopuros de manera sencilla, se pueden sintetizar los cuatro posibles isómeros de alcoholes que contienen dos estereocentros contiguos partiendo de los alquenos trisustituídos de geometría *Z* o *E* (Esquema 8).<sup>[9]</sup> Aunque existen otros reactivos de hidrobioración quirales, el empleo de los derivados de pineno resulta ser ventajoso debido a su fácil preparación y a su pureza enantiomérica.

## HIDROBORACIÓN CATALÍTICA

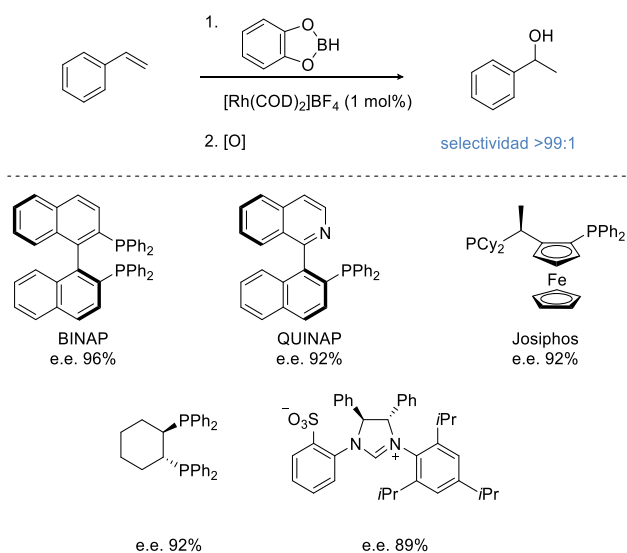
Uno de los grandes avances en la reacción de hidrobioración se consiguió al poder llevar a cabo la transformación de una olefina en el correspondiente alcohol empleando cantidades catalíticas de una especie metálica. La reacción de hidrobioración, hasta la fecha del descubrimiento de la variante catalítica, se había conseguido con éxito empleando diferentes especies de boro tales como diborano, alquilboranos, haloboranos y boronatos. Si bien se realizaron intentos previos de llevar a cabo hidrobioraciones catalíticas con dichas especies, no fue hasta que se emplearon boronatos como reactivos de hidrobioración cuando se pudo desarrollar la variante catalítica. Sorprendentemente éstos no son muy reactivos en ausencia de metales de transición, aunque bien es sabido que son más estables y fáciles de manejar, así como mucho más versátiles. Así, la primera hidrobioración catalítica se llevó a cabo usando catecolborano como reactivo de hidrobioración en presencia del catalizador de Wilkinson, RhCl(PPh<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.<sup>[13]</sup> Seguidamente se realizó la variante asimétrica empleando BINAP como ligando quiral,<sup>[14]</sup> el cual condujo a excelentes valores de enantioselectividad durante la hidrobioración de estirenos.<sup>[15]</sup>



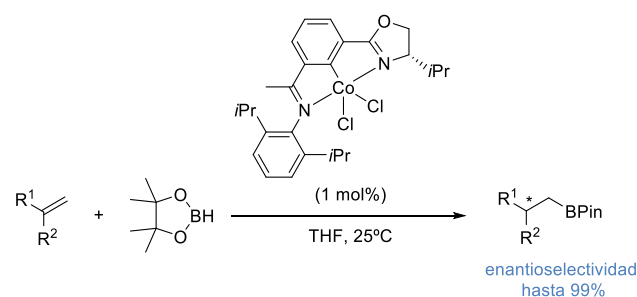
**Esquema 9.** Ciclo catalítico propuesto para la reacción de hidrobtoración mediada por rodio

Para este tipo de sustratos concretamente se observó la formación preferente del alcohol Markovnikov, lo cual puede explicarse acudiendo al mecanismo básico propuesto para esta reacción catalítica.<sup>[16]</sup> Ésta comienza con la disociación de una molécula de fosfano seguido de la adición oxidante del boronato. A continuación, se produce la complejación con el alqueno formándose una especie de rodio hexacoordinada en la cual se produce la inserción de la olefina. El paso final de eliminación reductora produce el correspondiente alquilboronato y regenera la especie metálica que entra en un nuevo ciclo catalítico (Esquema 9).

Como se ha comentado anteriormente, la variante asimétrica de esta reacción se realizó inicialmente empleando BINAP como ligando de tipo fosfano, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado multitud de ligandos quirales de diferente naturaleza que han procurado muy



**Esquema 10.** Hidrobtoración catalítica asimétrica empleando diferentes ligandos quirales



**Esquema 11.** Hidrobtoración catalítica asimétrica empleando catálisis mediada por cobalto

buenos resultados en lo referente a la selectividad de la misma (Esquema 10).

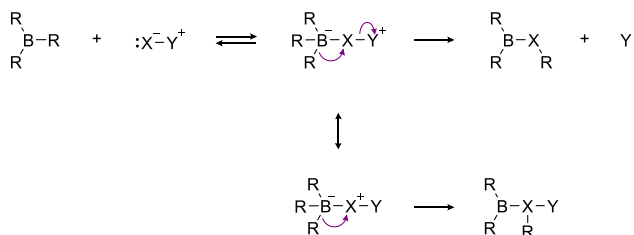
Recientemente, la reacción de hidrobtoración catalítica se ha desarrollado empleando otros metales diferentes al rodio, en especial con los denominados “metales de transición abundantes en la tierra”.<sup>[17]</sup> Éstos se encuentran hoy en día en pleno desarrollo encontrándose un número limitado de variantes catalíticas (en especial con catálisis mediada por Co) siendo la mayor limitación la tolerancia a ciertos grupos funcionales, así como la selectividad en olefinas 1,2-disustituidas. El primer ejemplo de este tipo describe el empleo de un catalizador quiral de cobalto derivado de una iminopiridina-oxazolona (Esquema 11).<sup>[18]</sup>

Esta metodología permite alcanzar enantioselectividades elevadas siempre que se utilicen alquenos 1,1-disustituidos con grupos R<sup>1</sup> y R<sup>2</sup> estéricamente bien diferenciados entre sí, en especial derivados de estireno.

## APLICACIONES SINTÉTICAS

La gran versatilidad de los compuestos organoborados ha hecho que en numerosos procesos de síntesis se recurra a éstos como intermedios sintéticos. Como se ha comentado anteriormente, ya desde el descubrimiento de la reacción pudo llevarse a cabo la transformación de los alquilboranos en los correspondientes alcoholes anti-Markovnikov. Sin embargo, no son éstos los únicos derivados posibles de obtener con este tipo de compuestos; como se ha demostrado desde el descubrimiento de la reacción, a partir de los compuestos organoborados pueden obtenerse directamente alcanos, haluros de alquilo, alcoholes, aminas, cetonas, aldehídos, ácidos, etc., y pueden realizarse isomerizaciones, transmetalaciones y acoplamientos, entre otros. En general, todas estas transformaciones transcurren por formación del compuesto “ato” el cual puede evolucionar al producto deseado a través de dos rutas diferentes: (a) durante la migración de la cadena carbonada puede ocurrir la eliminación del grupo Y; (b) durante la migración de dicha cadena no ocurre eliminación del grupo Y (Esquema 12).<sup>[19]</sup>

La primera reacción de transformación descrita para los alquilboranos consistía en la oxidación del mismo hasta el correspondiente alcohol y ácido bórico, en presencia de peróxido de hidrógeno en medio básico. Ésta resulta

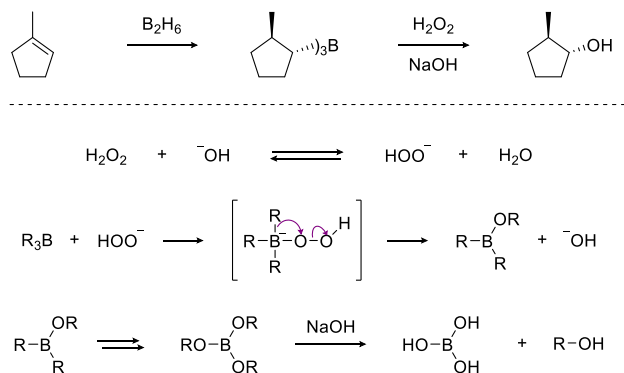


Esquema 12. Mecanismo general de transformaciones vía organoboratos tetracoordinados

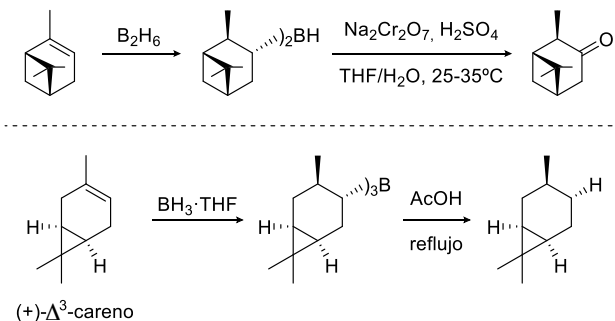
una metodología eficaz y una de las transformaciones más empleadas que cursa a través de un mecanismo de tipo iónico y con retención de la configuración tal y como se muestra en el Esquema 13.<sup>[20]</sup>

La versatilidad de los alquilboranos no se limita a esta oxidación, sino que también puede sobreoxidarse a la correspondiente cetona o reducirse al correspondiente alcano a través de una reacción de protonólisis. Esta última ha de realizarse con ácido acético a reflujo y cursa con retención de la configuración (Esquema 14).<sup>[21]</sup>

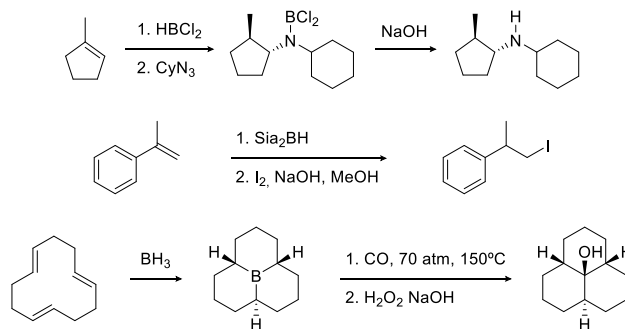
Otras transformaciones interesantes que pueden llevarse a cabo desde los compuestos organoborados incluyen reacciones de aminación, halogenólisis o carbonilación; algunos ejemplos pioneros se muestran en el Esquema 15).<sup>[22]</sup>



Esquema 13. Reacción de hidrobromación/oxidación de olefinas. La configuración mostrada hace referencia a configuración relativa



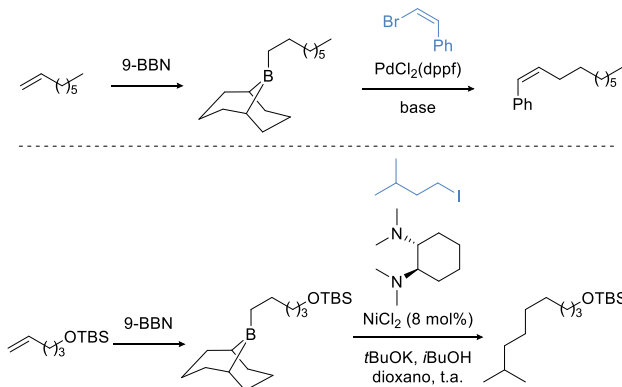
Esquema 14. Reacción de hidrobromación/oxidación e hidrobromación/protonólisis de olefinas



Esquema 15. Reacción de hidrobromación, hidroidodación e hidrocobromación de olefinas

Pero es sin duda la reacción de Suzuki la que más versatilidad sintética ha demostrado para este tipo de compuestos.<sup>[23]</sup> Empleando compuestos organoborados (o ácidos borónicos) pueden realizarse reacciones de alquienilación y arilación en presencia de cantidades catalíticas de paladio y el correspondiente haluro de alqueno o arilo (Esquema 16).<sup>[19]</sup> Complementariamente, la catálisis mediada por níquel permite llevar a cabo reacciones de acoplamiento con haluros de alquilo.<sup>[24]</sup>

Estas reacciones de acoplamiento, aunque bien establecidas, siguen hoy en día en pleno desarrollo.



Esquema 16. Reacción de hidrobromación de olefinas seguida de acoplamiento empleando haluros de alqueno (catálisis de Pd) y haluros de alquilo (catálisis de Ni)

## CONCLUSIONES

La reacción de hidrobromación ha demostrado ser una herramienta sintética eficaz y versátil para la preparación de multitud de productos orgánicos. La elección del reactivo de hidrobromación permite además llevar a cabo la transformación de manera regio-, diastereo- y enantioselectiva, lo que hace que esta metodología haya sido empleada con éxito en multitud de ocasiones. Este hecho, sin duda, contribuyó a la concesión del premio Nobel a H. C. Brown en 1979. Sin embargo, desde la concesión del mismo, la reacción de hidrobromación ha seguido

desarrollándose a través diversas metodologías sintéticas, en especial empleando la versión catalítica enantioselectiva. La fácil elaboración de los productos obtenidos tras la reacción de hidrobtoración, así como su utilidad en reacciones de acoplamiento, han contribuido a establecer la química de los compuestos de boro como un área prioritaria dentro de la química orgánica.

Aunque esta metodología de transformación de olefinas se encuentra bien establecida y son multitud las oportunidades que ofrece, aún hoy en día existe un amplio campo de investigación que puede resumirse si se observan las limitaciones de esta reacción: (1) la hidrobtoración no catalítica aún hoy presenta limitaciones cuando se realiza sobre alquenos acíclico tri- y tetrasustituidos, en concreto en lo referente a la estereoselectividad de la misma; (2) la variante catalítica (y catalítica asimétrica) se limita principalmente al uso de boronatos como reactivos de hidrobtoración sobre sustratos de tipo estireno; (3) el empleo metales de transición tales como Ru, Rh, Pd e Ir está bien establecido, sin embargo, metales abundantes en la tierra tales como Mn, Fe, Co, Ni, Cu y Zn se encuentran aún en desarrollo y (4) los diferentes métodos de hidrobtoración son, en muchos casos, complementarios en lo referente a la selectividad, sin embargo, no hay estudios que permitan llevar a cabo la reacción catalítica de manera diastereodivergente empleando un mismo complejo metálico.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la financiación recibida del Ministerio de Economía y Competitividad (FEDER-CTQ2017-83633-P), el Gobierno Vasco (IT908-16) y la UPV/EHU.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. C. Brown, B. C. Subba Rao, *J. Am. Chem. Soc.* **1959**, *81*, 6423; (b) H. C. Brown, B. C. Subba Rao, *J. Am. Chem. Soc.* **1959**, *81*, 6428.
- [2] H. C. Brown, *Nobel Lecture* **1979**.
- [3] H. C. Brown *Hydroboration*, W. A. Benjamin, Nueva York, 1962.
- [4] En 1923 A. Stock junto con E. Kuss descubrieron que la reacción entre acetileno y diborano a 100°C era explosiva; en 1948 D. T. Hurd describió la reacción de hidrobtoración de alquenos a 100°C.
- [5] D. J. Pasto, B. Lepeska, V. Balasubramanian, *J. Am. Chem. Soc.* **1972**, *94*, 6090.
- [6] C. F. Lane, *Aldrichim. Acta* **1973**, *6*, 21.
- [7] (a) G. Zweifel, H. C. Brown, *Org. React.* **1963**, *13*, 1. (b) H. C. Brown, E. F. Knights, C. G. Scouten, *J. Am. Chem. Soc.* **1974**, *96*, 7765. (c) H. C. Brown, J. A. Sikorski, S. U. Kulkarni, H. D. Lee, *J. Org. Chem.* **1980**, *45*, 4540. (d) H. C. Brown, J. H. Kawakami *J. Am. Chem. Soc.* **1970**, *93*, 201.
- [8] K. N. Houk, N. G. Rondan, Y.-D. Wu, J. T. Metz, M. N. Paddon-Row, *Tetrahedron*, **1984**, *40*, 2257.
- [9] W. C. Still, J. C. Barrish *J. Am. Chem. Soc.* **1983**, *105*, 2487.
- [10] H. C. Brown, J. V. N. V. Prasad, M. Zaidlewicz *J. Org. Chem.* **1988**, *53*, 2911.
- [11] (a) H. C. Brown, G. Zweifel, *J. Am. Chem. Soc.* **1961**, *83*, 486. (b) A. K. Mandal, P. K. Jadhav, H. C. Brown, *J. Org. Chem.* **1980**, *45*, 3543.
- [12] H. C. Brown, P. K. Jadhav, A. K. Mandal, *J. Org. Chem.* **1982**, *47*, 5074.
- [13] (a) D. Mannig, H. Noth, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1985**, *24*, 878. Para un precedentes de hidrobtoraciones catalíticas de alquinos véase: (b) R. Wilczynski, L. G. Sneddon, *J. Am. Chem. Soc.* **1980**, *102*, 2857.
- [14] K.; Burgess, M. J. Ohlmeyer, *J. Org. Chem.* **1988**, *53*, 5178.
- [15] T. Hayashi, Y. Matsumoto, Y. Ito, *J. Am. Chem. Soc.* **1990**, *111*, 3426.
- [16] C. M. Crudden, D. Edwards, *Eur. J. Org. Chem.* **2003**, 4695.
- [17] J. V. Obligación, P. J. Chirik, *Nat. Rev.* **2018**, *2*, 15.
- [18] L. Zhang, Z. Zuo, X. Wan, Z. Huang, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 15501.
- [19] A. Suzuki, *Heterocycles* **2010**, *80*, 15.
- [20] H. C. Brown, G. Zweifel, *J. Am. Chem. Soc.* **1960**, *83*, 2544.
- [21] (a) H. C. Brown, C. P. Garg, *J. Am. Chem. Soc.* **1961**, *83*, 2952. (b) H. C. Brown, K. J. Murray, *J. Org. Chem.* **1961**, *26*, 361.
- [22] (a) H. C. Brown, M. M. Midland, A. B. Levy, *J. Am. Chem. Soc.* **1973**, *95*, 2394. (b) H. C. Brown, M. W. Rathke, M. M. Rogic, *J. Am. Chem. Soc.* **1968**, *90*, 5038. (c) H. C. Brown, E. Negishi, *J. Am. Chem. Soc.* **1967**, *89*, 5478.
- [23] S. R. Chemler, D. Trauner, S. J. Danishefsky, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 4544. (b) N. Miyaura, A. Suzuki, *Chem. Rev.* **1995**, *95*, 2457.
- [24] B. Saito, G. C. Fu, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 9602.

# Importancia de la química en los vuelos espaciales: En recuerdo de las cinco décadas del Apolo XI

Manuela Martín y Gabriel Pinto

**Resumen:** Con objeto de conmemorar el cincuenta aniversario de la llegada del hombre a la Luna queremos resaltar la importancia que tuvo la química para que aquel viaje fuera un éxito y cómo ha sido y sigue siendo una ciencia importante en los trabajos de la NASA. Los químicos y los ingenieros químicos han jugado, y siguen jugando, un papel esencial en los viajes espaciales. A su vez, la búsqueda de soluciones para poner a punto estos viajes ha supuesto un gran desarrollo de la industria química en todos sus aspectos, lo que ha mejorado la vida diaria en múltiples campos por sus aplicaciones.

**Palabras clave:** Química, viajes espaciales, materiales químicos, generadores de energía, propulsores de cohetes.

**Abstract:** In order to commemorate the fiftieth anniversary of the arrival of man on the Moon, we want to highlight the importance of chemistry for making this trip a success and how chemistry has been, and continues to be, an important science in the work of NASA. Chemists and chemical engineers have played and, continue to play, an essential role in space travel, and in turn, the search for solutions to fine-tune these trips has meant a great development of the chemical industry in all its aspects, improving daily life in multiple fields for its applications.

**Keywords:** Chemistry, space travel, chemical materials, energy generators, rocket propellants.

## INTRODUCCIÓN

El presidente Dwight David Eisenhower (1890-1969) fundó en 1958 la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA quitándole el carácter militar, y dándole una orientación que sirviera para fomentar las aplicaciones pacíficas de la ciencia espacial. El 29 de julio de 1958 se aprobó la Ley Nacional del Espacio y la Aeronáutica y el 1 de octubre de ese año comenzó a funcionar la nueva agencia.<sup>[1]</sup> Por tanto, en 2018, se celebraron las seis décadas de funcionamiento de la NASA y, con ese motivo, la revista Chemistry

World de la Royal Society of Chemistry publicaba un artículo de Gege Li<sup>[2]</sup> que lleva el título “NASA has contributed to Chemistry”, que es un interesante resumen sobre lo que ha supuesto la química para los viajes espaciales, por lo que creemos que sería más correcto que el título fuera “Cómo la química ha sido la base de los trabajos de la NASA”. Teniendo en cuenta que este año se cumplen los cincuenta años de la llegada del hombre a la Luna, el 16 de julio de 1969, queremos resaltar la importancia que tuvo la química en el éxito de esta hazaña haciendo un resumen de en qué sentido ha intervenido y cuáles son las aportaciones que, como indica Gege Li, van desde el descubrimiento de nuevos materiales de todo tipo, hasta la explicación de por qué falló el transbordador lanzado en 1986 que desapareció en 73 segundos muriendo todos sus ocupantes, o cómo se superaron los problemas del Apolo XIII.

Los químicos de la NASA son los inventores de materiales como adhesivos, polímeros plásticos y propelentes que han permitido tener los productos necesarios para estos viajes. También han sido los estudiosos del universo y su composición por lo que han actuado como asesores para misiones espaciales. Ingenieros químicos en la NASA desarrollan, entre otras, tecnologías de control térmico vitales para cualquier nave espacial y prototipos para poder estudiar y conocer la superficie y la atmósfera de la Luna y Marte.

Nuestro trabajo pretende ser un resumen de algunos de los descubrimientos más importantes al respecto.<sup>[1-3]</sup>



M. Martín<sup>1</sup>



G. Pinto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química, Reales Sociedades Españolas de Química y de Física, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

<sup>2</sup> E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 28006 Madrid.

C-e: [mmartins@ucm.es](mailto:mmartins@ucm.es)

Recibido: 10/07/2019. Aceptado: 23/09/2019.



## PROPULSORES QUÍMICOS DE COHETES

Para lanzar los satélites al espacio se necesitan reacciones altamente exotérmicas, tener en cuenta la forma de la cámara de combustión y considerar si las sustancias utilizadas son sólidas o líquidas para elegir el propelente. A esas mezclas que no necesitan del aire atmosférico se les conoce como propergoles. Los sólidos son mezclas heterogéneas de un material elastomérico, generalmente polvo de metales como magnesio, aluminio o circonio y un oxidante como el preclorato amónico, o bien homogéneas como mezclas coloidales de nitrocelulosa, nitroglicerina o dinitrato de etilenglicol.

A estas mezclas se le suelen añadir otros aditivos que mejoren la combustión, necesitando un dispositivo que la inicie. Tienen el inconveniente de que, una vez encendidos, no se puede parar la reacción y, además, se deben almacenar a temperaturas bajas para impedir que de forma espontánea o por un choque o golpe comiencen a reaccionar de forma inesperada.

Los propulsores líquidos son más fáciles de usar porque es mejor el sistema de alimentación y más fácil de controlar la reacción, pero tiene el inconveniente de que se deben almacenar y manejar a temperaturas muy bajas. En algunos casos, como sucede con la hidracina y el tetróxido de dinitrógeno, la ignición se produce nada más mezclarlos, y se conoce como hipergólica. Sin embargo, en el caso del oxígeno con el hidrógeno se necesita un dispositivo bujía, encendedor o una mezcla hipergólica para que se inicie. En el lanzamiento de los satélites Gemini se usaron tetróxido de dinitrógeno líquido como oxidante y una mezcla de hidracina y dimetilhidracina como combustible. Para el Saturno V, lanzador del Apolo XI, se utilizaron oxígeno como oxidante con hidrógeno líquido o keroseno refinado como combustible en las máquinas F1 (Figura 1) en la segunda y tercera etapa (Figura 2). Los propulsores hipergólicos se emplearon en el programa Apolo, en particular en los motores del Módulo Lunar, que debía trabajar de forma absolutamente fiable, y en el motor F-1 del Saturno V se utilizaron propergoles hipergólicos para arrancar.<sup>[3,4]</sup>

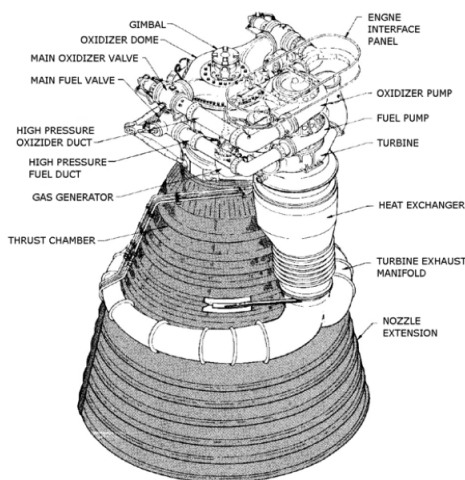


Figura 1. Esquema de la cámara de combustión del Saturno V. 3



Figura 2. Fotografía del Saturno V, cohete de lanzamiento de la misión Apolo XI (tomada de la NASA)

## BATERÍAS ELÉCTRICAS

Para que funcionen una gran variedad de dispositivos: cámaras fotográficas, relojes, dispositivos de propulsión, radios, reguladores de temperatura y muchos otros, se necesita electricidad. Esta electricidad se puede generar por diversos métodos nucleares, solares o químicos. Nos limitamos al estudio de estos últimos por ser los más relacionados con la química.

El uso de las baterías eléctricas es imprescindible en los vuelos espaciales por su eficiencia porque mientras que una reacción química a veces se realiza muy despacio, sin embargo, esos mismos reactivos en una batería reaccionan con solo mezclarlos. Un ejemplo podría ser la reacción entre el oxígeno y el hidrógeno cuya velocidad es prácticamente cero a temperatura ambiente y, sin embargo, en una célula electroquímica montada adecuadamente reaccionan rápidamente.

En las células electroquímicas que se utilizan para dispositivos en el espacio, además de su eficiencia, se deben tener en cuenta otras muchas características como peso, tamaño, temperatura a la que operan, si pueden funcionar en gravedad cero y en vacío y, si son recargables, cuánto tiempo es necesario para esta operación.<sup>[5]</sup>

Entre las más utilizadas están las baterías de plata cadmio,  $\text{AgO}/\text{KOH}/\text{Cd}$ , níquel cadmio  $\text{NiOOH}/\text{KOH}/\text{Cd}$  o plata zinc,  $\text{Zn}/\text{KOH}/\text{AgO}$ , que pueden ser primarias o se-

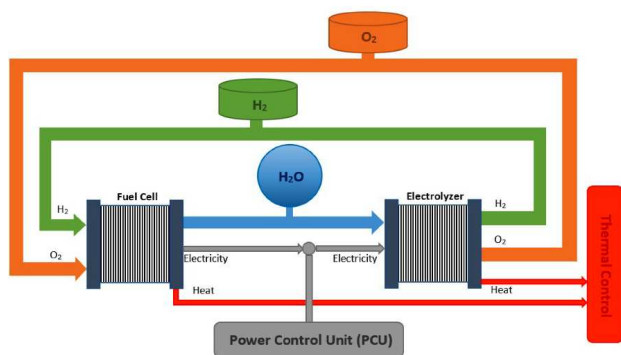


Figura 3. Esquema de una pila de combustible para aplicaciones especiales, tomada de Brey<sup>[6]</sup>

cundarias. Las secundarias se recargan con células solares que funcionan directamente con energía solar y la recarga se produce con cierta periodicidad en cada proyecto.

También se buscan baterías capaces de funcionar a 500°C con electrodos de magnesio y una mezcla de los óxidos de cobre (I) y cobre (II) en una mezcla de los cloruros de litio y de potasio fundidos. Se almacenan a baja temperatura y para ponerlas en funcionamiento se funden las sales mediante un dispositivo pirotécnico que se dispara mediante uno eléctrico.

Las mejores son las “pilas de combustible” funcionando con hidrógeno y oxígeno porque es fácil suministrar los reactivos cuando se van gastando, convierten directamente la energía química en eléctrica, el subproducto es agua, que se puede reciclar para otros usos, y los reactivos se combinan rápidamente y no hay pérdidas por polarización. Para su funcionamiento deben ir acopladas a generadores de estos gases que van suministrando las cantidades necesaria como se puede ver en la Figura 3 tomada de Brey.<sup>[6]</sup> Se usaron por primera vez en 1960 cuando General Electric desarrolló la primera membrana cambiadora de protones para las misiones Géminis de la NASA.

Los gases hidrógeno y oxígeno llegan a los electrodos por difusión y entran en contacto con el electrolito en la zona interior del electrodo. En el cátodo, el oxígeno se reduce a  $-2$  se combina con el electrolito y es transportado como  $\text{OH}^-$ . En el ánodo, el hidrógeno es oxidado a  $\text{H}^+$  que se combina con el  $\text{OH}^-$ , produciendo agua. Los electrodos suelen ser de grafito, que es conductor y bastante poroso. El ánodo está impregnado de un catalizador que normalmente es platino. El agua que se forma se saca de la célula y después de purificada se utiliza con otros fines que pueden ser hasta para lavarse los astronautas.

Las pilas de combustible, que pueden trabajar hasta temperaturas del orden de 1.000°C, están hechas de cerámicas especiales mezclas de óxido de circonio (IV) y óxido de calcio o bien óxido de itrio(III). Los electrodos son en forma de tubos y están recubiertos por dentro y por fuera de una capa porosa de platino. En estos tubos se produce la reacción, por eso, la longitud del tubo se ajusta para que

teniendo en cuenta la presión de los gases, la mayor parte del hidrógeno al pasar por el tubo se convierta en agua y el rendimiento sea mayor.

El método más utilizado para la obtención del hidrógeno es la electrólisis.<sup>[5,6]</sup>

## LUBRICANTES EN EL ESPACIO

Los lubricantes utilizados en la Tierra no sirven para el espacio porque las temperaturas, presiones, tiempo de utilización y velocidad a la que van a estar sometidos no se parecen en nada; estarán sometidos a presiones muy bajas en las que se pueden evaporar y a temperaturas muy altas que se pueden descomponer. Por otra parte, se necesitan unos lubricantes diferentes en el exterior donde estarán sometidos a temperaturas mucho más bajas que las más frías de la Tierra y mucho más altas cuando regresen a la atmósfera, y otros para el interior de la cápsula, donde las temperaturas serán normales. También se necesitan lubricantes para las cámaras de combustión que resistan altas temperaturas.<sup>[7,8]</sup>

Se usan dos tipos de lubricación: de película gruesa y límite o de película delgada. Los lubricantes de película gruesa son para las superficies de apoyo suficientemente alejadas y pueden ser hidrodinámicos o hidrostáticos según que el mecanismo se mantenga por sí mismo o por medios externos. En este tipo de lubricación son muy importantes las propiedades de los lubricantes porque es el que lleva la carga y condiciona la viscosidad, si el fluido es líquido, la temperatura de tolerancia, y la posible reactividad con los materiales de los rodamientos. Es esencial que el lubricante de película gruesa sea suficientemente viscoso como para garantizar que no entren en contacto las superficies de apoyo. Los lubricantes más utilizados son gases como aire o nitrógeno o líquidos como los metales sodio, galio o mercurio. Como su viscosidad es pequeña, es necesario tener en cuenta otras características como una mayor distancia entre las piezas para mantener una amplia temperatura. En los artefactos nucleares estos lubricantes pueden a su vez actuar como refrigerantes. Es importante que a la temperatura que adquiere no exista descomposición de las sustancias, esta limitación se puede evitar si el lubricante se desecha después de pasar por los rodamientos, método que está bien conseguido en la lubricación de las bombas de los propulsores líquidos de los motores de los cohetes. Tiene el inconveniente que reduce el recubrimiento de los óxidos de los metales que recubren los materiales, por lo que se pueden producir daños, sobre todo en el arranque y parada. También puede ser un problema utilizar lubricantes líquidos como el  $\text{N}_2\text{O}_4$  y el  $\text{O}_2$  que pueden oxidar los rodamientos provocando defectos en ellos. A pesar de todo es la lubricación más recomendable por la distancia que se mantiene entre las zonas de fricción.

En el caso de la lubricación de película delgada, como el contacto entre las superficies es mayor el rozamiento también lo es. Para los cojinetes se utiliza un material más blando y con un revestimiento. Los lubricantes utilizados

pueden ser fluidos o sólidos, estos últimos siempre que tengan estructura laminar: metales, plásticos, cerámica y cermets (materiales compuesto de cerámica y metales). También pueden ser óxidos, cloruros y sulfuros si tienen una estructura laminar. A veces incluso se le añaden azufre o cloro que reacciona con ellos dando lugar a una lámina más resistente.

Los lubricantes que se utilizan normalmente en la Tierra derivados del petróleo no se pueden utilizar en el espacio por el efecto del vacío, las altas temperaturas y la fuerte radiación a que pueden estar sometidos. Se han utilizado siliconas, metales alcalinos fundidos y mercurio. El poder lubricante del mercurio mejora añadiéndole disulfuro de molibdeno. Las sales fundidas tienen el inconveniente de ser muy corrosivas. Se puede utilizar el grafito pero su poder lubricante varía si lleva pequeñas cantidades de otras sustancias como agua o amoníaco. Como dice Feder: “el disulfuro de molibdeno, consiste en una capa de átomos de molibdeno entre las capas de azufre, estas tres capas forman láminas que se adhieren libremente a otras para formar cristales. Bajo presión, las láminas se deslizan unas sobre otras con relativa facilidad mientras proporcionan un escudo resistente que mantiene las superficies en movimiento, como un eje de vagón y una rueda, separados”.<sup>[9]</sup> El disulfuro de molibdeno tiene una gran variedad de propiedades, un bajo coeficiente de rozamiento que lo mantiene en un amplio rango de temperaturas, desde  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $340^{\circ}\text{C}$  y, además, es estable en condiciones de alta radiación y alto vacío. No obstante, puede ocurrir que se produzcan retenciones de calor en determinados puntos que den lugar a su descomposición y sea necesario utilizar otros sólidos laminares que son estables a temperaturas más altas como el PbO y el PbS.

Como lubricantes se pueden usar metales como plata, oro, zinc, cadmio, plomo y estaño, pero solo los dos primeros permanecen sin evaporarse en alto vacío. Además, la plata y el oro son lubricantes hasta  $540^{\circ}\text{C}$  y estables a radiaciones penetrantes. Se pueden conseguir plásticos con propiedades similares a los metales y tiene la ventaja de tener una densidad muy baja, característica que es muy a tener en cuenta en los vuelos espaciales por problemas de peso. Por sus características, uno de los más apropiados es el teflón. Algunos carburos, aleaciones, cermets y cerámicas son los lubricantes ideales a temperaturas muy altas. Los carburos de wolframio, titanio y cromo pueden servir hasta  $800^{\circ}\text{C}$ . Los silicatos con aleaciones especiales de níquel y cobre, grafito y determinadas cerámicas tienen poder lubricante hasta  $1.100\text{-}1.600^{\circ}\text{C}$ .

#### COMPONENTES DE LA ATMÓSFERA DE LA CABINA

Según los datos fisiológicos conocidos sobre la respiración en la atmósfera a una altura próxima a los 4.000 metros donde la presión es de unos 480 mm de mercurio y la presión parcial del oxígeno del orden de 100 mm de mercurio, ya no se puede producir la inhalación del oxígeno. En

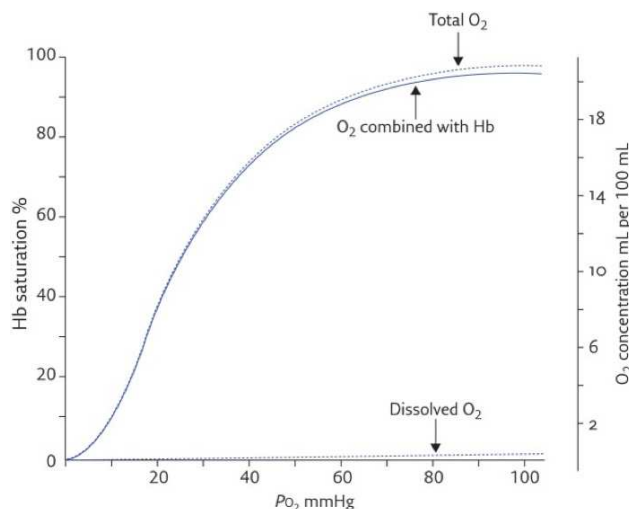


Figura 4. Saturación de la hemoglobina y concentración de oxígeno en función de la presión de esta sustancia<sup>[10]</sup>

la inhalación, el aire entra en los pulmones hasta que la presión es del mismo orden que la atmosférica. Es necesario tener en cuenta en ese cómputo que también ejercen presión el dióxido de carbono y el vapor de agua, cuyas presiones parciales son del orden de 40 y 47 mm Hg, por lo que para una presión externa de 760 mm Hg la del aire inhalado solo sería del orden de 673 mm Hg. Por otra parte, como solo el 21% es de oxígeno su presión parcial en los pulmones sería de 141 mm Hg. Por la ley de Henry, el oxígeno se disuelve en la sangre con una presión parcial aún menor.

Cuando el oxígeno se disuelve en la sangre, rápidamente es absorbido por la hemoglobina por lo que una nueva dosis de oxígeno puede llegar al pulmón y pasar a la sangre. Como se puede ver en la Figura 4,<sup>[10]</sup> cuando la sangre deja los pulmones la presión del oxígeno es del orden de 108 mm Hg, suficiente para producir una saturación de la hemoglobina próxima al 98%. En definitiva, sería suficiente mantener una presión parcial del 108 mm Hg de oxígeno, 40 mm Hg de dióxido de carbono y 47 mm Hg de vapor de agua, es decir, de 195 mm Hg para asegurar la oxigenación de la sangre.

Por otra parte, los estudios aseguran que se puede vivir durante largo tiempo sin necesidad de que el oxígeno vaya mezclado con nitrógeno siempre que se respeten unos límites de presión máxima de oxígeno. Teniendo en cuenta todas esas consideraciones la atmósfera de la cabina tiene solo oxígeno a una presión aproximada de un tercio de atmósfera y de esta forma el metabolismo es correcto.

La cabina tiene que ir provista de un sistema para eliminar el  $\text{CO}_2$  producido mediante un hidróxido de un metal alcalino. Se usa hidróxido de litio por problemas de peso, pero tiene el inconveniente de que se trata de una reacción irreversible y no se puede recuperar el  $\text{CO}_2$ . Por eso, se pensó en usar un óxido metálico como el óxido de plata que forma carbonato de plata que, por calentamiento, se convierte de nuevo en  $\text{CO}_2$  y  $\text{Ag}_2\text{O}$ . Otro sistema es con

una resina cambiadora de aniones que contiene iones hidróxidos intercambiables que reaccionan con el dióxido de carbono. Bajo la influencia de un campo eléctrico los iones carbonato emigran para ser regenerados en otra resina intercambiadora de cationes, dando el dióxido de carbono que se desplaza hacia un sistema de recuperación de oxígeno. En la actualidad el dióxido de carbono se absorbe directamente en una zeolita.

El oxígeno se proporciona a la cabina mediante tanques de oxígeno líquido y también recuperándolo de otros productos de desecho. Como ya hemos indicado, se utiliza el CO<sub>2</sub> mediante reacción con hidrógeno, siguiendo el método de hidrogenación catalítica de Paul Sabatier (1854-1941), premio Nobel de Química (1912):



El agua, por electrolisis, da de nuevo oxígeno e hidrógeno y, el metano, por pirolisis, produce también hidrógeno.

El agua en la cabina procede de depósitos, pero también de las pilas de combustible; incluso es posible obtenerla por destilación de la orina.

También se barajó la posibilidad de obtener metanol a partir del dióxido de carbono, oxidarlo a formaldehído y transformarlo después en hidratos de carbono o, siguiendo las ideas de Sabatier, pasar el dióxido de carbono a metano y este a formaldehído.<sup>[11,12]</sup>

## MATERIALES PARA LOS VEHÍCULOS ESPACIALES

Los viajes espaciales han supuesto un gran avance en el descubrimiento de nuevos materiales por las necesidades de buscar soluciones para situaciones que antes no existían. Entre estos tenemos los que recubren a las naves espaciales para que no sufran del calor a que se ven sometidos al entrar en la atmósfera por el rozamiento con el aire y la velocidad que llevan y que se conocen como ablativos. También se necesitan materiales que no se fundan al quemarse los gases propelentes que llegan a temperaturas entre 3.000 y 4.000°C, motivo por el que las paredes de la cámara de combustión deben de estar protegidas. Son necesarios recipientes criogénicos para gases como hidrógeno y oxígeno líquido con un rango de temperaturas entre -200°C y + 200°C y materiales con determinadas características para el control de las temperaturas.

Por otra parte, todos estos materiales deben de tener una serie de características como ser fáciles de soldar, de laminar, de manejar para hacer piezas, de ensamblar con adhesivos, sujetadores o mediante fusión, etc.

Se llama ablación el sacrificio del material mediante un proceso endotérmico, que puede ser por sublimación o descomposición que, de esta forma, absorbe el calor que podría deteriorar el vehículo o su estructura. Un material ablativo será interesante cuando se pierda poco

material con gran cantidad de calor. La temperatura del material va aumentando a medida que le llega el calor y si es mal conductor se concentrará en la superficie donde tendrán lugar los procesos de descomposición sin que sufran las partes interiores. Debe de ser un material que tenga gran capacidad para absorber el calor o rechazarlo, con baja conductividad térmica y baja densidad.

En el caso de los plásticos orgánicos se forma una capa de carbono y, en la pirolisis, los gases producen una espuma que, al escapar, dejan una capa carbonosa y porosa. Es más importante que sea un material termoestable que termoplástico porque de esta forma se elimina la cadena macromolecular en lugar de romperse. El sistema de protección térmica (SPT) empleado en la cápsula Apolo en 1962 estaba compuesto de fibras de sílice impregnadas de un metacrilato como base refrigerante. Un material típico puede ser una matriz resinosa que lleva una sustancia generadora de gas como el nylon (polímero del ácido adípico y la hexametildiamina) con un material de refuerzo como grafito o sílice. Entre las resinas termoestables está el *novolac* (producto de condensación del fenol y formaldehído) que se convierten en un polímero entrecruzado por adición de una fuente de grupos metileno como la hexametilentetramina. Después de curado se le puede añadir nylon que actúa como generador de gas. Tienen el inconveniente de no ser recuperables y además ser demasiado pesadas. Tampoco se podían sustituir por metales por el peso y por eso, en 1965, se comenzaron a fabricar unas plaquetas de fibra de sílice que se mejoraron posteriormente al añadirle un agente de alta emisión térmica para facilitar la emisión de calor; por eso se recubrió con una base de vidrio de borosilicato al que se añadió Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con intención de mejorarlo, pero perdía capacidad de emisión por lo que se sustituyó por CSi. Como materiales silíceos inicialmente se usaron mullita (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) o SiO<sub>2</sub>. En la actualidad, en lugar de esas plaquetas se utilizan fibras cerámicas de borosilicato de aluminio con una composición de 62 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>· 14 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>· 24 SiO<sub>2</sub> junto con fibras de sílice, porque son resistentes a temperaturas más altas, y se les añade CSi para mejorar las propiedades ópticas.

Los materiales utilizados en el morro y en la parte delantera de las alas se hicieron en 1958 de fibra de carbono compuestas por grafito que se impregnaba con una resina fenólica y se sometía a varios procesos de pirolisis. A partir de ese momento, a lo largo de los años, se han ido mejorando todas sus propiedades con diferentes tratamientos.

El material de los vehículos es el mismo que en las aeronaves: aleaciones de aluminio, aceros de alta resistencia, compuestos laminados o de titanio que se mejoran con la adición de otros metales. Las más utilizadas han sido las de aluminio mejorado con litio. Pueden ser aleaciones de aluminio con cobre en las que se forma el compuesto intermetálico CuAl<sub>2</sub> como principal ingrediente. Se agregan silicio y litio para hacerlas más duras y cantidades pequeñas de manganeso, magnesio y titanio

para que el grano sea más fino y se impida la corrosión. Posteriormente se le han añadido otros metales con objeto de conseguir mejores propiedades.

En las carcasas de los motores fue en uno de los primeros lugares donde se sustituyeron las aleaciones de acero al titanio por *composites*, resinas compuestas de sustancias de especies muy diferentes (resinas de poliéster, fibra de vidrio, etc.) que forman estructuras muy resistentes y de poca densidad mediante pultrusion (de “pull” y “extrusión”, proceso para conseguir materiales plásticos termorrígidos sometiendo las materias de distintos procesos de devanado, impregnado, curado y corte). Se sigue investigando sobre su composición y el tratamiento para mejorar sus propiedades. Se tiene esperanza de conseguir una importante mejora con los nanotubos de carbono y las láminas de grafeno cuyas propiedades térmicas, eléctricas, rigidez y facilidad de ensamblar son muy prometedoras.<sup>[12-14]</sup>

### MATERIALES DE PROTECCIÓN SOLAR

La astronave en el sistema solar está sometida a una radiación electromagnética recibida directamente del Sol y otra reflejada por los planetas próximos.<sup>[13-15]</sup> La fracción absorbida depende, sin duda, de la naturaleza de la superficie y de la naturaleza de la radiación incidente. A lo largo del viaje, la naturaleza de esta última puede variar según dónde esté situada en un momento determinado. Se puede conseguir que la radiación se refleje mediante pinturas blancas o espejos. La pintura se puede alterar en el trayecto, las pinturas con siliconas y óxidos de zinc o dióxido de titanio son estables a temperaturas altas pero poco estables frente a radiaciones de corta longitud de onda y además son difíciles de unir a la nave. Las cerámicas son más fáciles de unir al material de la nave y son más estables frente a la radiación, están hechas con pigmentos como silicatos de aluminio y litio en polvo, sílice, alúmina y óxido de zinc en agua o disoluciones de silicatos o de fosfatos alcalinos. Los espejos se hacen con un recubrimiento de un metal brillante. Un recubrimiento utilizado ha sido una película de aluminio sobre una capa de silicona.

La protección se puede hacer con reflectores planos que reflejan la radiación solar, pero emiten solo una pequeña parte de la infrarroja y se consiguen con metales muy pulimentados como plata o aluminio o pinturas con hojuelas metálicas, cuya capacidad puede variar por la corrosión de los metales. Otra posibilidad son los absorbentes planos, que tienen alta capacidad de absorción y de emisión, que se pueden hacer con pigmentos negros, como una mezcla de óxidos se usan  $\text{Cr}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , o bien  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ - $\text{NiO}$ . Estos pigmentos se dispersan en elastómeros de silicona o en un silicato alcalino que se aplica en la estructura a pintar. Se pueden sustituir por metales como cobre o níquel seguidos de una oxidación o bien una anodización, porque suelen ir sobre una base

de aluminio o magnesio, lo que permite obtener una superficie de buenas propiedades ópticas resistente a la corrosión que se puede montar sobre una superficie oscura.

Existe otra posibilidad, que son los conocidos como absorbentes solares, cuyas características son que absorben la energía solar y emiten una pequeña proporción de radiación infrarroja. Los primeros que se utilizaron eran de acero inoxidable con óxido de aluminio oxidados a un color pajizo. Posteriormente, el aluminio se salpicó con pintura blanca. Concretamente en el Mariner IV (1965) se fueron utilizando protecciones más sofisticadas y con un gran número de capas, a veces hasta 30. Para cubrir la parte superior, se utilizó el plástico conocido como mylar que es tereftalato de polietileno (teflón), película fuerte y transparente con apariencia similar al aluminio recubierta con dracon negro (plástico del mismo tipo que el mylar pero impregnado por ambas caras de una resina). La parte inferior se cubría con teflón aluminizado. Los paneles de las células solares eran negros y pintados de negro para disipar la energía solar. El disco donde se sujeta la antena estaba pintado de verde y algunos componentes estaban recubiertos de oro.

Cada misión llevaba una serie de componentes específicos pero todos con un control de la temperatura externo mediante termopares.<sup>[16]</sup>

### MATERIALES PARA LA VESTIMENTA DE LOS ASTRONAUTAS

Los trajes de los astronautas del Apolo XI debían de cumplir una serie de características para poder pasear por la luna y soportar las condiciones de cambios presión y temperaturas (desde muy bajas a muy altas). Estaban hechos de varias capas con distintos objetivos, empezaron siendo once, en la actualidad ese número es mucho mayor. Varias son para evitar el impacto del polvo espacial conocido como micrometeoroides o micrometeoritos, son restos de rocas que se mueven a gran velocidad y que producen un enorme impacto sobre las naves espaciales y los trajes de los astronautas. Debajo llevan un traje conocido como LCVG (Liquid Cooling and Ventilation Garment) traje de enfriamiento y ventilación para mantener la temperatura y la respiración, entre otras cosas, para impedir que los líquidos interiores de los astronautas lleguen a hervir.<sup>[17]</sup> Para la confección de estas capas se usan distintos materiales como nylon, neopreno, teflón, mylar (resistente al desgaste y la corrosión y reflectante) o nomex (familia de las poliamidas aromáticas, que protege del fuego). La capa más interior es de algodón.

Sobre la espalda llevan una especie de mochila que se conoce como sistema de soporte vital primario (PLSS: *primary life support system*). Conservaba el oxígeno y eliminaba el dióxido de carbono producido en la respiración con recipientes con hidróxido de litio (Figura 5).

No cabe duda que muchos de estos materiales tienen aplicaciones importantes en la industria alimentaria, textil, deportes, automóvil, medicina y muchos otros sectores.

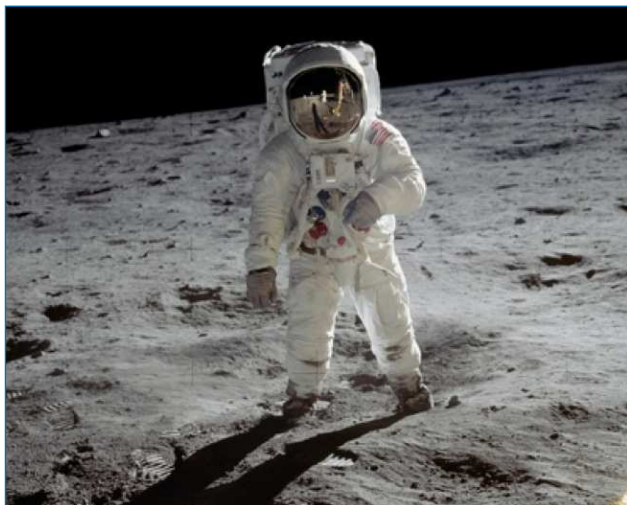


Figura 5. Astronauta sobre la superficie lunar<sup>[18]</sup>

Ante esta variedad de materiales, estamos de acuerdo con la idea de Teilhard de Chardin, cuando en 1961, en El Himno del Universo decía: “no digas nunca, como hacen algunos: la materia esta gastada, la materia está hasta el último instante de los siglos, la materia será joven y exuberante, resplandeciente y nueva para el que sepa entenderla”, según recogen Rincón y Romero.<sup>[15]</sup>

## CONCLUSIONES

Cuando se cumplen los cincuenta años de la llegada a la Luna, el 16 de julio de 1969, es importante recordar el papel de la química para que esta hazaña llegara a buen término.

El Apolo XI, los anteriores y los siguientes viajes espaciales, han sido posibles gracias a los conocimientos científicos de química, de física y de ingeniería y el trabajo en este campo ha supuesto un avance que ha llevado a conseguir gran diversidad de materiales y dispositivos que han mejorado de forma significativa la vida diaria. La relación de tecnologías que benefician nuestras vidas va desde las válvulas que se utilizan en las intervenciones de corazón, los LED, prótesis, material deportivo, purificación del agua, alimentos enriquecidos, y un largo etc.<sup>[19]</sup>

Gracias a la química se consiguieron reacciones de combustión capaces de lanzar los satélites al espacio, se llegó a las pilas de combustión (el generador electroquímico más importante), se obtuvieron materiales adecuados para proteger la cápsula durante su entrada en la atmósfera y para reflejar los rayos solares y para los equipos de los astronautas.

También la química fue capaz de diseñar una atmósfera adecuada en el interior de la cápsula y al mismo tiempo hacer todo un programa para recoger y recuperar todas las sustancias que se generaban por la vida de los astronautas consiguiendo un rendimiento máximo y disminuyendo de

esta forma el peso en el momento del lanzamiento. Podríamos citar varios ejemplos quizás el más llamativo es recoger el dióxido de carbono para volver a producir oxígeno.

Y, por supuesto, no cabe duda que, gracias a la química y otras ciencias, un ser humano pondrá su pie en Marte en un futuro no muy lejano.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la ayuda recibida de la Fundación Obra Social “La Caixa” a través del proyecto “La tabla periódica: un icono de la ciencia que merece conocerse”.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://bit.ly/2ketv1J> (visitada el 25/5/ 2019).
- [2] G. Li, How NASA has contributed to chemistry, *Chemistry World*, **2018**, 15(10).
- [3] <https://go.nasa.gov/2kp9OYC> (visitada el 15/5/2019).
- [4] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, Chemical Rocket Propellants, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(5), 335-337.
- [5] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, Electrochemical Cells for Space Power, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(6), 359-361.
- [6] J. Brey, D. Muñoz, V. Mesa, T. Guerrero, Use of Fuel Cells and Electrolyzers in Space Applications: From Energy Storage To Propulsion/Deorbitation. E3S Web of Conferences. 2017. 16. <https://bit.ly/2kFp0kF> (visitada el 28/5/2019).
- [7] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, Lubrication in Space, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(8) 526-528.
- [8] R. L. Fusaro, Lubrication of Space Systems <https://go.nasa.gov/2IYAEaq> (visitada el 2/6/2019).
- [9] B. J. Feder, Lubrication in Space Age, *The New York Times*, **1981**, 25 June, 2.
- [10] D. El Sherif, J. C. Knox, International Space Station Carbon Dioxide Removal. Concepts and Advancements. NASA Marshall Space Flight Center. <https://go.nasa.gov/2kU9zoy> (visitada el 2/6/2019).
- [11] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, The Cabin Atmosphere in Manned Space Vehicles, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(3), 152-153.
- [12] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, The Life Support Systems for Manned Space Flights, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(4), 260-262.
- [13] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, Ablative Materials for High-Temperature. Thermal Protection of Space Vehicles, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(10) 690-691.
- [14] G. Henson, Materials for Launch Vehicle Structure. <https://go.nasa.gov/2T2fGCN> (visitada el 3 /6/2019).
- [15] J. M. Rincón, M. Romero, Revestimientos Cerámicos y Vítreos para Vehículos Transbordadores Espaciales. <https://bit.ly/2kpm63b> (visitada el 4/6/2019).
- [16] W. H. Bowman, R. M. Lawrence, Optical Surfaces for Temperature Control of Spacecraft, *J. Chem. Educ.* **1971**, 48(9) 605-607.
- [17] D. P. Gon, Complex Garment Systems to Survive in Outer Space, *Journal of Textile and Apparel Technology and Management* **2011**, 7(2). <https://bit.ly/2mkWTaI> (visitada el 6/6/2019).
- [18] <https://go.nasa.gov/2m3wMos> (visitada el 1/7/2019).
- [19] <https://go.nasa.gov/1JUyTLI> (visitada el 1/7/2019).

# Richard Allen Andersen: una vida dedicada a la investigación y la enseñanza de la Química Inorgánica y la Química Organometálica

Ernesto Carmona Guzmán

**Resumen:** Este artículo glosa la personalidad científica del profesor Richard A. Andersen (1942-2019) y describe algunas de sus contribuciones más relevantes a la química de coordinación y organometálica de los elementos lantánidos y actínidos. Se ilustran en él las colaboraciones científicas que mantuvo con afamados investigadores europeos, así como su relación con químicos organometálicos españoles, entre los que figura el autor de este trabajo.

**Palabras clave:** Lantánidos, Actínidos, Compuestos Organometálicos, Compuestos de Coordinación.

**Abstract:** This article glosses the scientific personality of Professor Richard A. Andersen (1942-2019) and describes some of his most relevant contributions to the inorganic and organometallic chemistry of the lanthanide and actinide elements. The paper also illustrates the scientific collaborations that Andersen developed with renowned European researchers, and in particular his personal and professional links with Spanish organometallic chemists, including the author.

**Keywords:** Lanthanides, Actinides, Coordination Compounds, Organometallic Compounds.

## INTRODUCCIÓN

Richard (“Dick” para sus colegas y amigos) Andersen (1942-2019) falleció con paz y sosiego el pasado 16 de junio de 2019. Sin incurrir en tópicos, su muerte, dolorosa pérdida personal para sus amigos y colegas, supone un serio quebranto para la química, en particular para sus áreas inorgánica y organometálica, cuyos miembros añoraremos su entusiasmo, creatividad y originalidad, así como su irrefrenable empeño por la búsqueda del conocimiento. Científico ejemplar, de excepcional visión crítica, dedicó la mayor parte de su vida a la Química, ciencia por la que sentía una pasión incontenible. Fue además un mentor modélico en el que encontraron inspiración numerosos jóvenes investigadores que hoy ocupan posiciones de responsabilidad en universidades y centros de investigación de todo el mundo, sobre todo de América y Europa.

Dick Andersen era natural de Oklahoma, aunque creció y se educó en Dakota del Sur, en cuya Universidad se graduó en Química en 1965. En 1973 alcanzó el grado de



Richard Allen Andersen

Doctor por la Universidad Wyoming, en la que había realizado su Tesis Doctoral (Figura 1) bajo la supervisión del profesor Geoffrey Coates, legendario químico organometálico. Además de reconocido investigador, Coates fue autor, junto con los entonces jóvenes investigadores Malcolm L. H. Green y Kenneth Wade, del primer libro de texto que aportó una visión moderna de esta disciplina. La tercera edición de *Organometallic Compounds* se publicó en 1967-68 en dos volúmenes, dedicado el primero a los elementos de los grupos principales (Coates y Wade), y el segundo a los metales de transición (Green). Andersen fue el último doctorando de Coates, y como han señalado en fechas recientes Arnold y Tilley en el artículo editorial<sup>[1]</sup> de un volumen virtual de *ChemComm* y *Dalton Transactions* conmemorativo del 75 cumpleaños de Andersen, su tiempo con Coates fue un período muy formativo que le proporcionó la base sobre la que edificó su carrera académica. Fue asimismo muy



E. Carmona

Instituto de Investigaciones Químicas (IQ) y Departamento de Química Inorgánica (CSIC - Universidad de Sevilla)  
Avenida Américo Vespucio 49, 41092, Sevilla.  
C-e: [guzman@us.es](mailto:guzman@us.es)

Recibido: 13/09/2019. Aceptado: 16/09/2019.

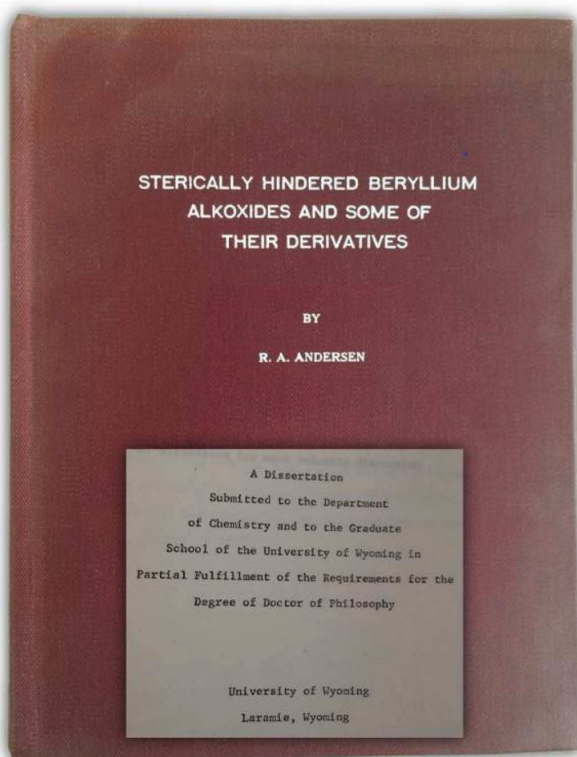


Figura 1. Tesis Doctoral de Dick Andersen, University of Wyoming, April 1973. Gentileza del professor Gerard Parkin, Columbia University

productivo, puesto que originó varias contribuciones fundamentales sobre alcóxidos, alquilos y otros compuestos de berilio, que se publicaron entre 1972 y 1975 en seis artículos en *Dalton Transactions*.

Tras un año como investigador posdoctoral en Oslo (*Centre for Industrial Research*), en 1974 Andersen se unió al grupo del profesor Sir Geoffrey Wilkinson en Londres (*Imperial College of Science and Technology*), solo unos meses después de la concesión del premio Nobel de Química de 1973, que como es bien sabido Wilkinson compartió con el profesor alemán Ernst O. Fischer en reconocimiento a sus respectivas contribuciones a la química de los compuestos organometálicos de tipo *sandwich*, es decir, los denominados *metallocenos*. Pocos meses después se produjo mi propia incorporación al grupo, y en los casi dos años que coincidimos, se inició una relación personal que con el paso de los años fraguó en la sólida amistad que ha perdurado hasta su muerte. Recuerdo con claridad mis dificultades al comienzo de la estancia posdoctoral, consecuencia de mi desconocimiento de la lengua inglesa y de mi inexperiencia en la nueva línea de trabajo -Química Organometálica- a la que me enfrentaba por vez primera. En esta situación, tanto la ayuda de Dick Andersen como la de nuestro común amigo Roberto Sánchez Delgado (Figura 2), por desgracia también desaparecido, facilitaron sobremanera mi asentamiento en los laboratorios de Wilkinson.



Figura 2. Dick Andersen en el centro, rodeado (en el sentido de las agujas del reloj) por imágenes de Roberto Sánchez Delgado (arriba a la derecha), Richard A. Jones, Peter G. Edwards y Ernesto Carmona (en el fondo de esta última imagen aparece un retrato del profesor Sir Geoffrey Wilkinson)

Aprendí mucho de Dick, no solo sobre la síntesis y manipulación de sustancias muy reactivas, sino también sobre la organización y la gestión del trabajo de investigación. Con su ayuda me atreví a preparar casi un mol de  $\text{PMe}_3$ , y poco a poco fui adquiriendo una destreza sintética que facilitó sobremanera el posterior desarrollo del grupo de organometálicos de Sevilla. Dick me introdujo también en la práctica del soplado del vidrio, en la que perseveré hasta alcanzar la experiencia necesaria para desenvolverme con soltura en operaciones no demasiado complejas. Nuestros más tempranos trabajos científicos con Wilkinson fueron conjuntos, y en ellos se describieron los primeros alquilos binarios de manganeso,  $\text{MnR}_2$ , para  $\text{R} = \text{CH}_2\text{SiMe}_3$ ,  $\text{CH}_2\text{CMe}_3$  y  $\text{CH}_2\text{CMe}_2\text{Ph}$ , así como algunos de sus aductos con bases nitrogenadas.<sup>[2]</sup> En muchas de las conversaciones que hemos mantenido con posterioridad, ambos hemos recordado con añoranza este tiempo con Wilkinson (1974-1976 en su caso y 1974-1977 en el mío), y coincidido en que fue una época trascendental en nuestras vidas, de influencia decisiva en nuestras carreras profesionales. Como recordaré más tarde, él ha dejado escrito<sup>[3]</sup> "...the dye for my career was set in room 635 at Imperial College."

El citado artículo de Arnold y Tilley recoge con rigor los rasgos más notables de su personalidad y sus logros científicos.<sup>[1]</sup> En los apartados siguientes trataré de complementar dicha información, aunque sin pretensión de hacer una relación exhaustiva de sus contribuciones científicas. Por razones de espacio, apenas haré referencia a las destacadas contribuciones que Andersen hizo a la química de los elementos de transición, sino que focalizaré la discusión en sus trabajos sobre lantánidos y actínidos. No faltará una mención expresa a su notabilísima capacidad docente y a su compromiso irrenunciable con la enseñanza de la química inorgánica y organometálica, que mantuvo intacto hasta el final de su vida.

Antes de entrar en esta discusión, y para concluir la referencia a sus años en el Imperial College, querría señalar que Andersen impartió diversos cursos de química organometálica en el último año del Grado en Química. Sus amplios conocimientos de la materia, su gran capacidad docente y su entusiasmo por la química, signos caracterís-



ticos de su personalidad científica, causaron una profunda impresión en sus alumnos. Dos de ellos, Peter G. Edwards y Richard A. Jones (Figura 2), decidieron en 1975 realizar sus trabajos de fin de grado con Andersen y se unieron al grupo de Wilkinson, bajo cuya dirección comenzaron en 1976 sus Tesis Doctorales, y con ellas su andadura en el campo de la química organometálica, disciplina que siguieron en su trabajo en las Universidades de *Cardiff* (P. G. Edwards) y *Texas at Austin* (R. A. Jones). Como mencionaré más adelante, Peter Edwards hizo además una estancia posdoctoral con Andersen durante los primeros años de éste en Berkeley. Peter y Richard han mantenido en todo momento una estrecha relación personal con Dick, y tienen a orgullo su ascendencia científica y la gran influencia que Dick ejerció en sus trayectorias profesionales.

### LOS PRIMEROS AÑOS DE ANDERSEN EN BERKELEY

En 1976, Dick comenzó su carrera independiente como *tenure-track Assistant Professor* en el *College of Chemistry, the University of California at Berkeley*. Sus convicciones científicas y el consejo de Wilkinson que muchas veces me recordó: “don’t repeat your PhD Thesis”, le motivaron a estudiar la síntesis, estructura electrónica y molecular, y reactividad de complejos de muy diversos metales de la Tabla Periódica, desde los alcalinos hasta los actínidos. Dentro de tanta variedad, creo, no obstante, acertar al decir que el buque insignia de la investigación desarrollada por Andersen ha sido la química de coordinación y organometálica de los elementos lantánidos y actínidos. Por esta razón, y como ya he anticipado, el presente artículo se centrará principalmente en este importante campo de trabajo. No menos variada resultó la selección de los ligandos necesarios para la construcción de las nuevas estructuras moleculares. A este respecto, las *obsesiones químicas* de Andersen están claramente reflejadas en los ligandos representados en la Figura 3, donde además de los muy sencillos hidruro, metilo o monóxido de carbono, figuran otros como los alquilo estabilizados respecto a la eliminación de  $H_{\beta}$  (C), ciclopentadienilos voluminosos como el **E** (y naturalmente el  $C_5Me_5$ ), alcóxidos y arilóxidos (**F**), y ligandos amiduro voluminosos, preferentemente sililamiduros (**G**).

A sus sobresalientes dotes intelectuales, Dick unía una no menos notable destreza en el laboratorio, que hizo de él un excelente químico sintético capaz de afrontar con éxito los más exigentes retos experimentales. Conservó toda su vida esta capacidad que practicaba en un pequeño laboratorio contiguo a su despacho, en el que tenía una línea de Schlenk siempre en perfecto estado de revista. Además de dirigir el trabajo que asignó a sus colaboradores, preparó personalmente diversos complejos de U, Zr, Hf y Ta con ligandos alquilo, alcóxido y sililamiduro (en especial  $(Me_3Si)_2N^-$ ), de manera que en 1979 publicó cuatro artículos como **autor único** en *Inorganic Chemistry* y poco después otro más en *Journal of Organometallic Chemistry*. Uno de los primeros citados<sup>[4]</sup> tuvo un notable impacto al describir la

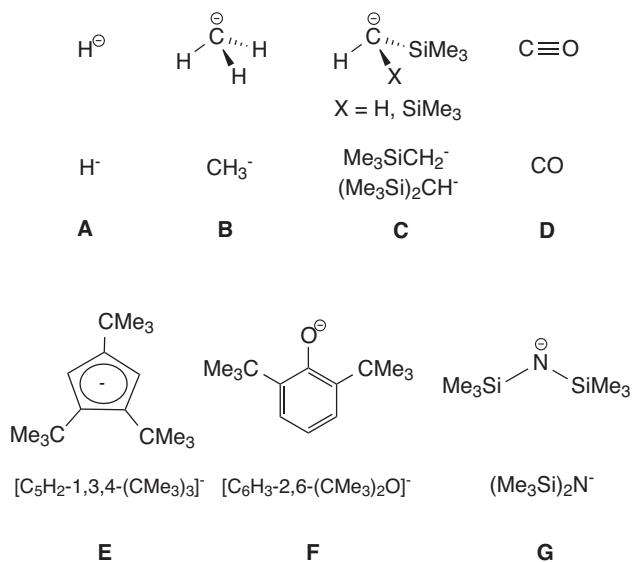


Figura 3. Ligandos frecuentemente utilizados por el grupo de Andersen

síntesis de  $U[N(SiMe_3)_2]_3$ , molécula que no solo abrió una muy sencilla vía de acceso a la química del U(III), sino que como más adelante demostró tiene una inusual estructura de pirámide triangular.

Durante estos primeros años, desarrolló asimismo una línea de trabajo sobre complejos de Mo y W con enlaces cuádruple metal-metal, en la que entre otros jóvenes investigadores participaron G. S. Girolami y V. V. Mainz. Estos trabajos reflejan el interés y preocupación de Dick por la estereoquímica de las moléculas inorgánicas y organometálicas, el conocimiento del mecanismo de las reacciones químicas, y el de otros aspectos cinéticos y termodinámicos tan relevantes como el **efecto** y la **influencia trans**, cuya manifestación en estos dímeros con enlace cuádruple M-M demostró inequívocamente por vez primera.<sup>[5]</sup> Aunque Dick mantuvo su interés por estos temas durante toda su vida, por diversas circunstancias dio por finalizada esta línea de trabajo tras los primeros años de la década de 1980.

Por entonces, la investigación de los complejos de metales 4f y 5f estaba ya en plena efervescencia, como resultado del trabajo de jóvenes doctorandos e investigadores posdoctorales, entre ellos T. D. Tilley, H. W. Turner, S. J. Simpson y J. M. Boncella.<sup>[1]</sup> El escepticismo de Dick ante los dogmas científicos establecidos, se puso de manifiesto en la caracterización estructural de los primeros complejos de Th(IV), U(IV) e Yb(II) con fosfinas terciarias (Figura 4). Los derivados actínidos resultaron de la ya citada estancia posdoctoral de Peter Edwards<sup>[6]</sup> en las instalaciones del afamado *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL), al que Dick estuvo siempre asociado a través del programa dedicado a la investigación de los elementos actínidos, mientras que Don Tilley preparó el complejo  $Yb[N(SiMe_3)_2]_2(Me_2PCH_2CH_2PMe_2)$ ,<sup>[7]</sup> para el que los estudios de difracción de rayos X desvelaron la existencia de interacciones  $\gamma$ -agósticas. Muchos influyentes químicos inorgánicos de la época

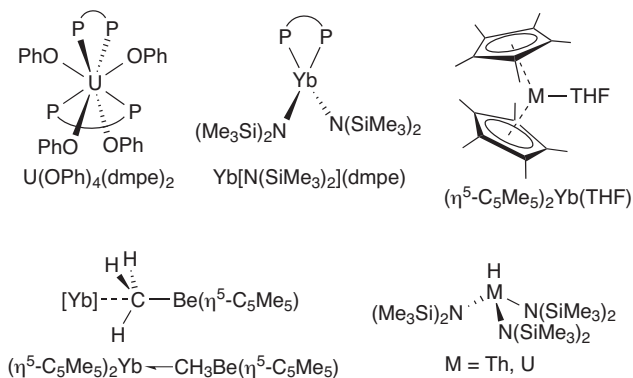


Figura 4. Algunos complejos de elementos lantánidos y actínidos preparados por el grupo de Andersen

defendían con vehemencia que el marcado carácter blando de las fosfinas como bases de Lewis se traduciría en la intrínseca inestabilidad termodinámica de sus aductos con los iones  $M^{n+}$  4f y 5f, prototipos de ácidos de Lewis duros. Andersen demostró lo infundado de tal hipótesis.

En los últimos años 1970, Don Tilley preparó diversos aductos del decametiliterbioceno,  $(C_5Me_5)_2Yb$ ,<sup>[8]</sup> molécula emblemática en el grupo de Andersen, como comentaré más adelante. Se trata de un metaloceno sándwich de geometría angular, con una acentuada acidez de Lewis (Figura 4) que se traduce en una reactividad química poco usual. Carol Burns preparó años después el complejo  $(C_5Me_5)_3Be(CH_3)$ , que puede imaginarse como modelo del metano. Andersen conjeturó que la sustitución de un átomo de H del metano por el fragmento isolobular  $Be(C_5Me_5)$  debe crear un momento dipolar en la dirección del átomo de carbono  $-CH_3$ , exaltando así la capacidad donadora de los enlaces C-H en comparación con los de  $CH_4$ . De acuerdo con esta hipótesis, la reacción entre  $(C_5Me_5)_2Yb$  y  $(C_5Me_5)_3Be(CH_3)$  originó el complejo cristalino  $(C_5Me_5)_2Yb \cdot CH_3Be(C_5Me_5)$ , con coordinación prácticamente lineal  $Yb-CH_3-Be$  (Figura 4). Los parámetros estructurales deducidos para este compuesto permiten considerarlo como modelo de un complejo de iterbio y metano,  $(C_5Me_5)_2Yb-CH_4$ .<sup>[9]</sup>

En una línea de trabajo diferente por la que Dick mostró siempre predilección, asimismo desarrollada durante los primeros años en Berkeley, Turner, Simpson y Andersen caracterizaron los primeros hidruros moleculares de los elementos actínidos Th y U. Estos complejos, de composición  $MH[N(SiMe_3)_2]_3$  (Figura 4), se convierten en presencia de  $D_2$  en los isotopólogos perdeuterados  $MD\{N(Si(CD_3)_2)\}_3$ , pero a diferencia de las especies análogas de los metales de transición, no lo hacen a través de una secuencia de etapas sucesivas de adición oxidante y eliminación reductora, sino mediante un mecanismo entonces desconocido, en el que el complejo de hidruro se interconvierte de forma reversible en un complejo de metalaciclobutano, gracias a la eliminación y adición de dihidrógeno.<sup>[10,11]</sup>

Años después, Werkema y Andersen prepararon el primer hidruro molecular monómero de cerio,  $Cp'_2CeH$ , para  $Cp' = 1,2,4-(CMe_3)_3C_5H_2$ , (Figura 5), que muestra

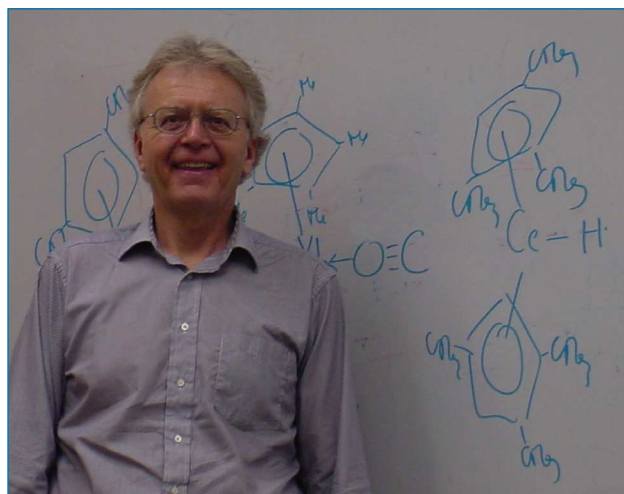


Figura 5. Dick Andersen y su propio dibujo de la estructura molecular del complejo  $[1,2,4-(CMe_3)_3C_5H_2]_2CeH$ . En el centro de la pizarra se adivina en parte la formulación del carbonilo  $(C_5Me_5)_2Yb(OC)$  con coordinación  $Yb-OC$  (véase el texto)

también un comportamiento químico inusual.<sup>[12]</sup> Así, en presencia de CO experimenta una reacción de inserción migratoria que origina un complejo de oxometileno puente,  $Cp'_2Ce(OCH_2)CeCp'_2$ , el cual reacciona con  $H_2$  generando  $Cp'_2Ce(OCH_3)$  y  $Cp'_2CeH$ . El citado complejo con un grupo metoxo coordinado, se obtiene directamente cuando  $Cp'_2CeH$  se trata con una mezcla de CO y  $H_2$ . El estudio computacional de esta transformación fue realizado por Odile Eisenstein y Laurent Maron como parte de una larga y fructífera colaboración iniciada a comienzos de este siglo, que se discutirá con detalle en el apartado siguiente. Los cálculos basados en el complejo modelo  $Cp'_2CeH$ , sugirieron la participación de un intermedio de formilo,  $Cp'_2Ce(\eta^2-CHO)$ , cuyo átomo de carbono se comporta como donador y como aceptor, y se transforma en el producto final por adición de  $H_2$ .

## OTROS TRABAJOS DE ANDERSEN

### LA BÚSQUEDA DE COLABORACIONES CIENTÍFICAS ESPECIALIZADAS

Creo conveniente recordar que Dick Andersen pretendió en todo momento acceder a nuevas moléculas con propiedades no siempre explicables con los conocimientos existentes, cuya comprensión llevara a una diferente interpretación de los hechos químicos, creando y ampliando nuevos horizontes científicos. Con esta premisa, su interés por conocer la estructura electrónica íntima de las moléculas tenía como finalidad desvelar nuevos modos de reactividad y descubrir mediante ellos inéditas transformaciones. Como desvelar estos arcanos requiere un dominio de variadas, al tiempo que complejas, técnicas químicas y físicas, que solo poseen quienes las utilizan con profusión y el máximo rigor, buscó con éxito, y mantuvo con esmero, muy selectas colaboraciones científicas, que le permitieron adentrarse en el estudio de la estructura electrónica y molecular en fase gaseosa mediante difracción de electrones,

desarrollar estudios de espectroscopía de fotoelectrones complementados con avanzados cálculos computacionales, complejos y detallados análisis de las propiedades magnéticas, espectroscopía XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure), estudios de RMN en estado sólido, y en este último campo, realizar un exhaustivo examen computacional de las componentes principales del tensor que define el desplazamiento químico, etc.

Probablemente, la colaboración científica de Andersen mejor conocida por la comunidad organometálica sea la que mantuvo a lo largo de muchos años con su colega de Berkeley, Robert A. Bergman. Fue una colaboración modélica, extraordinariamente enriquecedora, al confrontar las perspectivas químico-física inorgánica y orgánica de la Química Organometálica. Como señalaron Arnold y Tilley,<sup>[1]</sup> de ella surgieron las Tesis Doctorales de un puñado de jóvenes investigadores entusiastas y brillantes, que incluyen, entre otros, a J. F. Hartwig y P. L. Holland, y numerosos artículos científicos sobre diversos aspectos de la química de metales de transición como Ti, Zr, Ru, Os, Ir, Ni o Pt. Como ya se justificó, estos trabajos no podrán discutirse en este artículo.

Con anterioridad, desde los primeros años 1980, Dick mantuvo fructíferos intercambios científicos con Jennifer C. Green (Oxford) y Arne Haaland (Oslo), sobre la aplicación de la espectroscopía de fotoelectrones (PES) al estudio del enlace químico, y de la difracción de electrones para la determinación de la estructura molecular. Para diversos complejos binarios del ligando  $(\text{Me}_3\text{Si})_2\text{N}^-$  con metales en diferentes estados de oxidación, M(I)-M(III), el trabajo cooperativo puso de manifiesto que el enlace M-N( $\text{SiMe}_3$ )<sub>2</sub> es primordialmente de tipo  $\sigma$ , puesto que el par de electrones no compartido del átomo de N se deslocaliza en los átomos de Si.<sup>[13]</sup> Adicionalmente, estos estudios permitieron la primera detección de la ionización de un electrón 4f en el complejo de Ce(III), y 5f en el de U(III). La extensión de estos trabajos a los metalocenos  $(\text{C}_5\text{Me}_5)_2\text{M}$  (M= Sm, Eu e Yb) produjo, entre otros resultados, la constatación de la estructura angular en fase gaseosa del ya citado iterbioceno,  $\text{Yb}(\text{C}_5\text{Me}_5)_2$ .<sup>[11]</sup> Merecen asimismo destacarse los estudios de PES y difracción de electrones de los complejos  $\text{M}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_2$  de Mn, Fe y Co, que revelaron, una vez más, la naturaleza estrictamente  $\sigma$  de la interacción electrónica<sup>[15]</sup> M-N( $\text{SiMe}_3$ )<sub>2</sub>. En los últimos años, el complejo  $\text{Fe}[\text{N}(\text{SiMe}_3)_2]_2$  se ha utilizado como material de partida para la síntesis de otros complejos de Fe(II) y también de nanopartículas de este metal. Ilustrando una vez más su perfeccionismo científico, la síntesis de Andersen es modélica en su sencillez,<sup>[15]</sup> transcurre con rendimiento muy elevado (90%) y se desarrolla en escala de 6g.

El imparable avance durante las últimas dos décadas de los métodos de cálculo basados en la metodología *Density Functional Theory*, DFT, junto con el irrenunciable deseo de Andersen de entender el enlace y la reactividad química característica de los complejos de los elementos lantánidos y actínidos, propiciaron una colaboración extraordinariamente fructífera con Odile Eisenstein (Montpellier), ampliada prácticamente desde su inicio a Laurent Maron

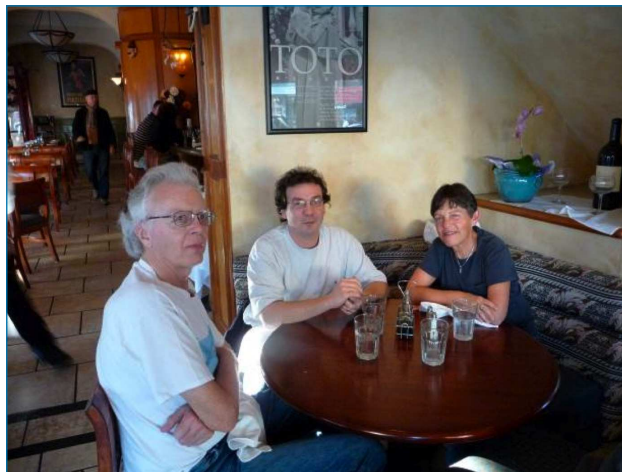


Figura 6. Dick Andersen, Laurent Maron y Odile Eisenstein en San Francisco en 2008. Por cortesía de la profesora Odile Eisenstein, CNRS y Université Montpellier

(Toulouse), que comenzó a finales de 2001 y se ha prolongado hasta nuestros días (Figura 6).

Cuenta Odile<sup>[16]</sup> que a principios de septiembre de dicho año, cuando de regreso de una gira científica en Australia quería descansar durante tres días en el área de Berkeley-San Francisco, se encontró casualmente con Dick, a quien poco antes había conocido en España en la reunión del GEQO celebrada en el año 2000 en Valladolid, en la entrada del Departamento de Química. Tras los saludos de rigor y el ofrecimiento por Dick de su ordenador para una rápida puesta al día de la correspondencia electrónica, él le planteó algunas cuestiones químicas que, aunque al principio simples, llegaron a extenderse a los tres días que pasó en Berkeley. Rememora Odile: “My three-day vacation had evaporated in thin air but a scientific venture, whose amplitude was still unknown to me, was starting”. Aunque Odile carecía entonces de experiencia en la química computacional de los complejos de los elementos 4f y 5f, Laurent Maron, recién incorporado a su grupo como investigador posdoctoral, poseía sobrada pericia en tales sistemas. Esta colaboración, y otras asimismo importantes, que Dick mantuvo durante el presente siglo se discutirán en los próximos apartados.

## HIDRUROS, CARBONILOS, OXO E IMIDUROS COMPLEJOS DE ELEMENTOS 4f Y 5f

El primer problema que estudiaron conjuntamente Dick, Odile y Laurent concernió al valor de  $\nu(\text{CO})$  característico de los carbonilos de diversos metalocenos. Conjuntamente con Brintzinger (Constanza) y Horváth (Exxon), Andersen había estudiado<sup>[17]</sup> la coordinación de CO a  $(\text{C}_5\text{Me}_5)_2\text{Ca}$ , trabajo que amplió después a otros decametilmetalocenos,  $(\text{C}_5\text{Me}_5)_2\text{M}$ , en los que además de Ca, M puede ser Mg, Sr, Ba, Sm, Eu o Yb.<sup>[18]</sup> En todos ellos, las frecuencias asociadas con la vibración de tensión del enlace CO,  $\nu(\text{CO})$ , eran superiores a la del CO libre ( $2143\text{ cm}^{-1}$ ), con la excepción del

iterbioceno,  $(C_5Me_5)_2Yb$ , que presenta  $\nu(CO)$  a  $2114\text{ cm}^{-1}$ . Los cálculos de DFT realizados pusieron de manifiesto la inexistencia de retrodonación  $\pi$  desde los orbitales  $4f$  llenos del ión  $Yb(II)$ , y evidenciaron al mismo tiempo que la estructura computada  $(C_5Me_5)_2Yb(OC)$ , con coordinación del monóxido de carbono a través del oxígeno (Figura 5),  $Yb-OC$ , y no del carbono como es habitual, es la única capaz de reproducir el valor experimental antes citado.<sup>[19]</sup>

En este campo de los carbonilos de metallocenos de los elementos  $f$  se enmarca el estudio del primer carbonilo de uranio, el complejo  $(Me_3SiC_5H_4)_3U(CO)$ , iniciado en 1986<sup>[20]</sup> y culminado, en lo que a la comprensión del enlace entre los fragmentos  $Cp'_3U$  y  $CO$  se refiere, en 2009,<sup>[21]</sup> gracias también a la colaboración con Maron y Eisenstein. Como parte de una serie de artículos dedicados al estudio de la química de coordinación de diversos metallocenos de  $U(III)$ ,  $Cp'_3U$ , Brennan, Andersen y Robbins observaron que el compuesto  $(C_5H_4SiMe_3)_3U$  reacciona reversiblemente con  $CO$ , tanto en disolución como en estado sólido, permitiendo la formación del primer complejo molecular de uranio y monóxido de carbono, el aducto  $(Me_3SiC_5H_4)_3U(CO)$ , que, no obstante, no pudo aislarse.<sup>[20]</sup> La reacción es muy llamativa y lleva consigo un cambio de color desde verde a bermellón, así como la aparición en el espectro de IR de una banda a  $1969\text{ cm}^{-1}$ , debida a  $\nu(CO)$ .

En años posteriores se caracterizaron otros complejos  $Cp'_3U(CO)$  con diferentes ligandos  $Cp'$ , obteniéndose de este modo el valor de la vibración de tensión del enlace  $C-O$  para  $Cp' = C_5H_4(SiMe_3)$ ,  $C_5H_4(CMe_3)$ ,  $C_5H_3(SiMe_3)_2$ ,  $C_5Me_4H$  y  $C_5Me_5$ . En todos los casos  $\nu(CO)$  es menor que para el  $CO$  libre y por analogía con los carbonilos de los metales de transición se propuso la existencia de retrodonación  $\pi$  desde los orbitales atómicos  $5f_\pi$  del  $U(III)$  a los o.m.  $\pi^*$  del  $CO$ . A pesar de que se trata de una hipótesis muy razonable que encontraba apoyo teórico en cálculos de o.m.  $X_\alpha$ -SW realizados para la molécula modelo  $(C_5H_5)_3U(CO)$ , y fue aceptada durante muchos años, el espíritu crítico de Andersen y su conocimiento exhaustivo de la bibliografía, le llevaron a detectar algunas incongruencias, muy en particular la existencia en los complejos  $Cp'_3U(CO)$  de un importante efecto de los sustituyentes de  $Cp'$  en el valor de  $\nu(CO)$ , que no existe en los carbonilos análogos de los metales  $3d-5d$ . Los cálculos computacionales de Eisenstein y Maron desvelaron que en la retrodonación  $\pi$  desde el fragmento  $Cp'_3U$  al carbonilo coordinado, participan orbitales ocupados con simetría  $f_\pi$  y  $d_\pi$  que son enlazantes  $Cp'-U$  y tienen en consecuencia un importante carácter de los orbitales de  $Cp'$ . El nuevo modelo no solo explica el notable efecto de los sustituyentes en la magnitud de  $\nu(CO)$  en los complejos  $5f$  como  $Cp'_3U(CO)$ , en comparación con los semejantes de metales  $3d-5d$ , sino que justifica además que los complejos lantánidos similares,  $Cp'_3M$ , y los actínidos con ligandos cuyos orbitales ocupados de simetría  $\pi$ ,  $M-L$ , tienen energía inferior a los  $M-Cp'$ , no formen carbonilos estables.<sup>[21]</sup>

Probablemente, el área de mayor productividad científica de las estudiadas conjuntamente por Andersen, Eisen-

stein y Maron sea la dedicada a la comprensión de la reactividad de los metallocenos lantánidos frente a los enlaces  $C-X$  ( $X = H, F, Br$ , etc.) de moléculas pequeñas como  $CH_4$ ,  $C_6H_6$  y algunos de sus derivados. Para diversos metallocenos de cerio, entre ellos el ya mencionado  $Cp'_2CeH$  ( $Cp' = 1,2,4-(CMe_3)_3C_5H_2$ ), los estudios computacionales pusieron de manifiesto la eyección de un grupo metileno  $CH_2$  durante la activación de moléculas  $CH_{4-X}F_X$ ,<sup>[22]</sup> propuesta que encontró apoyo adicional en la caracterización de un carbenoide en la activación análoga de  $CH_3(OMe)$ .<sup>[23]</sup>

Merecen asimismo destacarse los estudios sobre la naturaleza del enlace químico entre el átomo de uranio de diversos uranocenos y grupos oxo e imido.<sup>[24]</sup> La esencial ayuda computacional reveló que el esperado enlace doble entre los átomos de  $U$  y  $O$  en  $Cp_2UO$  no es tal, sino simple, y hay tres pares de electrones no compartidos en el átomo de oxígeno, que en consecuencia originan un enlace  $U-O$  muy polarizado. Por el contrario, la agrupación  $U-NMe$  del complejo  $Cp_2UNMe$  comprende componentes  $\sigma$  y  $\pi$  y un par de electrones no compartido sobre el átomo de nitrógeno que, en conjunto, la hacen menos polar. Curiosamente, el enlace simple polar  $U^{(+)} - O^{(-)}$  resultó ser unas  $70\text{ kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$  más fuerte que el doble, aunque menos polarizado,  $U=NMe$ .<sup>[24]</sup>

## ITERBIOCENOS

### PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y ESTUDIOS COMPUTACIONALES

Se ha indicado ya que el decametiliterbioceno es una molécula emblemática en el grupo de Andersen. A su estudio, que incluye el de los aductos que forma con diversas diiminas  $(C_5Me_5)_2Yb(N^{\wedge}N)$ , han contribuido investigadores pre y posdoctorales de varias generaciones, así como colaboradores científicos especialistas en magnetismo y cálculos computacionales, a lo largo de una treintena de años.

Como cabe esperar para un ión  $Yb(II)$  de configuración  $4f^{14}$ , los aductos  $(C_5Me_5)_2Yb(S)_2$  ( $S = Et_2O, THF, py$ ) son diamagnéticos. En cambio, los complejos análogos  $(C_5Me_5)_2Yb(N^{\wedge}N)$  de 2,2'-bipiridina (*bipy*) y fenantroli-*na*, son paramagnéticos, no obstante lo cual el valor de  $\mu_{\text{eff}}$  para el derivado de *bipy* es mayor del esperado para la estructura de Lewis  $(C_5Me_5)_2Yb^{II}(bipy^0)$  e inferior del correspondiente a  $(C_5Me_5)_2Yb^{III}(bipy^-)$ . El complejo fue preparado originalmente por Tilley en 1978,<sup>[1]</sup> pero la descripción de su síntesis y propiedades no se produjo hasta 2002, cuando se dilucidó su extraño comportamiento magnético y el de otros compuestos análogos con distintos ligandos ciclopentadienilo.<sup>[25]</sup> Poco después, C. Booth, colaborador de Andersen en el LBNL, propuso<sup>[26]</sup> que tanto el complejo  $(C_5Me_5)_2Yb(bipy)$  como el ceroceno  $(cot)_2Ce$  (*cot* = dianión ciclooctatetraeno) tienen un estado electrónico fundamental multiconfiguracional, en el que el elemento lantánido posee valencia intermedia, y que en ellos se manifiesta el denominado *efecto Kondo*, bien conocido en sistemas intermetálicos con electrones  $f$ . En las presentes moléculas de  $Yb$  y  $Ce$  resultaría de la correlación de los electrones  $f$  de valencia del ión lantá-

nido y los del sistema  $\pi$  deslocalizado de los anillos hidrocarbonados.<sup>[26]</sup>

En trabajos posteriores se analizó la influencia en las propiedades magnéticas de distintos sustituyentes en las diferentes posiciones del anillo de bipyridina,<sup>[27,28]</sup> postulándose a las especies químicas en equilibrio como tautómeros de valencia intermedia (entre II y III para el Yb). Las propuestas anteriores encuentran soporte experimental en estudios XANES, medidas de susceptibilidad magnética, datos de difracción de rayos X y EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure), y están además avaladas por cálculos computacionales de campo autoconsistente multiconfiguracional CASSCF-MP2. Además de los investigadores citados, debe destacarse la importante contribución de M. Walter, G. Nocton, L. Maron, O. Eisenstein, D. Berg, M. Schultz y otros. Para concluir este apartado, querría hacer referencia a un estudio reciente realizado en colaboración con M. Walter y L. Maron sobre los derivados de metilo del decametiliterbioceno  $[(C_5Me_5)_2Yb]_2(\mu-Me)$  y  $[(C_5Me_5)_2Yb]_2(\mu-Me)(Me)$ , así como otros complejos análogos  $Yb_2(II,III)$  e  $Yb_2(III,III)$ , entre ellos el hidruro  $[(C_5Me_5)_2Yb]_2(\mu-H)$ . La estructura electrónica calculada para este hidruro de valencia mixta implica la participación del orbital  $d_z^2$  de uno de los átomos de Yb que conduce a un estado electrónico fundamental doblete, con estructura  $Yb[f^{13}(\alpha)] \cdots H \cdots Yb[f^{13}(\alpha), d^1(\beta)]$ . El citado estudio ilustra, por una parte, la continua progresión de los modelos de enlace para los compuestos organometálicos de los elementos *f* a medida que se perfeccionan los métodos experimentales y computacionales, y por otra, la importante contribución de Andersen y sus colaboradores a estos avances.

## ESTUDIOS DE RMN DE SÓLIDOS TENSOR DEL DESPLAZAMIENTO QUÍMICO

Una parte significativa de la actividad investigadora de Dick Andersen durante los últimos 20 años se ha desarrollado en colaboración con el grupo de Christophe Copéret en ETH Zurich. En 1999, Dick visitó los laboratorios de Jean-Marie Basset en Lyon con la intención de explorar la preparación de alquilos e hidruros de diversos elementos *d* y *f* implantados en superficies de sílice. De estos contactos preliminares surgió la intensa y provechosa colaboración mantenida con Copéret, que se ha extendido hasta casi el fin de su vida, puesto que los últimos días de trabajo de Andersen transcurrieron en los laboratorios del grupo de Copéret en ETH. Tras una estancia en Zurich de alrededor de una semana, Dick partió de regreso a Berkeley el miércoles 12 de junio. Horas después de su llegada necesitó cuidados médicos hospitalarios, que por desgracia nada pudieron hacer para mantenerlo con vida, falleciendo como se ha dicho, el siguiente domingo, día 16.

A lo largo de los últimos 20 años, Andersen y Copéret mantuvieron frecuentes encuentros para la discusión de sus trabajos en curso sobre activación de los enlaces C-H, creación de centros activos e iniciación de reacciones de

polimerización sobre superficies sólidas, estudio de la estructura electrónica de las moléculas mediante RMN y RPE (Resonancia Paramagnética Electrónica), y otros temas. En fechas más recientes, e incluyendo en la colaboración a Odile Eisenstein, han estudiado el significado del desplazamiento químico en RMN en estado sólido y la información estructural que encierra, así como su importancia en la caracterización de las especies químicas adsorbidas sobre superficies. Los resultados de este estudio, aplicado, por ejemplo, a diversos metalaciclobutanos y a su reactividad, o falta de ella, en reacciones de metátesis de olefinas, son muy relevantes, y permiten relacionar las componentes principales del tensor del desplazamiento químico con los orbitales moleculares frontera, y por tanto con la reactividad química.<sup>[30-34]</sup> Aplicado a otros tipos de compuestos organometálicos, estas investigaciones explican por qué algunos dialquilos metálicos forman con facilidad alquilidenos, y justifican que la inserción de alquenos en alquilos M-R de metales *d<sup>n</sup>* sea isolobular con la metátesis de enlaces sigma, y también con la metátesis de olefinas, y se vea facilitada por el carácter de alquilideno del enlace M-R, haciendo que esta etapa elemental resulte intermedia entre las postuladas en los bien conocidos mecanismos de Cossee-Arlmann y Green-Rooney.

En un artículo con fines didácticos<sup>[35]</sup> se estudia el enlace M-olefina sobre la base del tensor del desplazamiento químico de  $^{13}C$ , y se analizan las componentes  $\sigma$  y  $\pi$  de dicho enlace, definidas por el bien conocido modelo de Dewar-Chatt-Duncanson. No obstante, el estudio pone además de manifiesto la posibilidad de una componente adicional de donación  $\pi$  desde el alqueno al metal, en la que participarían el o.m.  $\sigma$  del alqueno y un orbital *d* vacío de simetría apropiada. Tal interacción sería importante, por ejemplo, en  $(C_5Me_5)_2Ti(C_3H_4)$ , especie para la que puede postularse una estructura de metalaciclopropano que tendría parcial carácter  $\pi$  en los enlaces M-C, el cual explicaría el desapantallamiento de estos átomos de carbono y su capacidad para participar en reacciones de inserción de olefinas (expansión del anillo a metalaciclopentano).<sup>[35]</sup>

## DICK ANDERSEN Y LA ENSEÑANZA UNIVERSITARIA

Dick desarrolló su trabajo docente con la misma intensidad y rigor que el de investigación, consciente de la trascendencia que el buen profesor puede tener en sus alumnos. Aunque su carácter algo reservado, a riesgo de parecer hosco, pudiera despertar ciertos celos, fue siempre abordable para quienes se acercaban a él con el deseo de aprender y discutir sobre química.

Su conocimiento de la química inorgánica y organometálica, y de la bibliografía científica, así presente como histórica, era, como ya se ha dicho, monumental. Su antigua doctoranda Joanne Stewart, refiere que, con frecuencia, su respuesta a una cuestión química determinada era la cita textual del artículo científico correspondiente, incluyendo revista de publicación, año y autor principal.<sup>[36]</sup> Si la consulta se formulaba en su despacho, como alguna vez

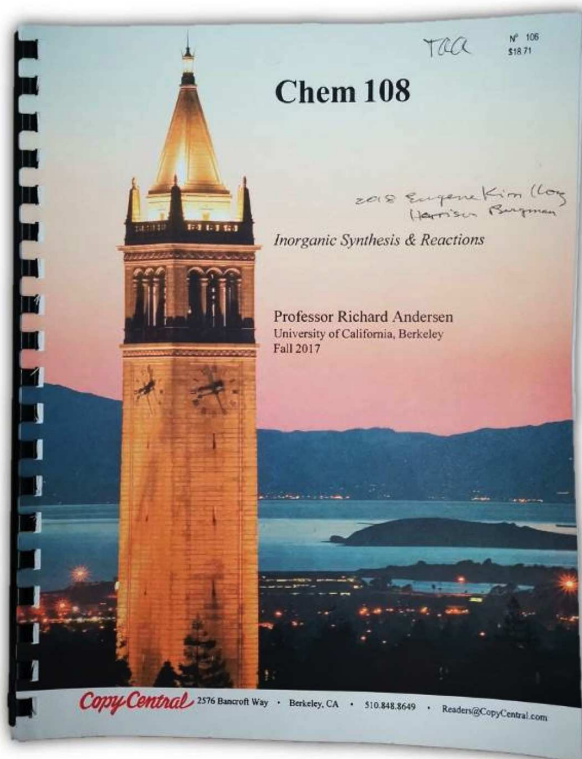


Figura 7. Frontispicio del curso práctico *Chem 108* del Berkeley College of Chemistry, con anotaciones manuscritas de Dick Andersen

hice yo mismo, completaba la respuesta buscando la ficha apropiada en un misterioso fichero que mantenía al día, en perfecto orden. Refiere asimismo Stewart que en sus cursos de posgrado esperaba a sus alumnos en el interior del aula con la pizarra repleta de reacciones, citas y diagramas de orbitales moleculares, y cuando terminaba su discusión, a menudo les espetaba: “You have to have been born knowing the molecular orbital diagram of ferrocene”.<sup>[36]</sup>

Durante los pasados cursos académicos Andersen tuvo a su cargo el curso práctico *Chem 108 Inorganic Synthesis and Reactions* (Figura 7). Diseñado por él mismo, ha sido siempre un curso muy apreciado y valorado por los alumnos, quienes debían completar la información que este manual proporciona consultando la bibliografía adecuada. Está por tanto concebido a modo de introducción a la investigación científica, motivando a los alumnos a organizar su tiempo en el laboratorio, a aprender a trabajar de modo independiente, y a presentar correctamente los resultados obtenidos. Andersen complementaba la parte práctica con dos clases de teoría centradas en las técnicas de caracterización utilizadas, principalmente espectroscopías Vis-UV, IR y RMN, así como propiedades magnéticas.

Dick Andersen fue además un conferenciante impecable, de muy alto nivel, pulcro y brillante, perfecto actor que solía conferenciar completamente ensimismado, absorto en la materia que discutía. La Figura 8B muestra el título de la conferencia científica que había preparado para la

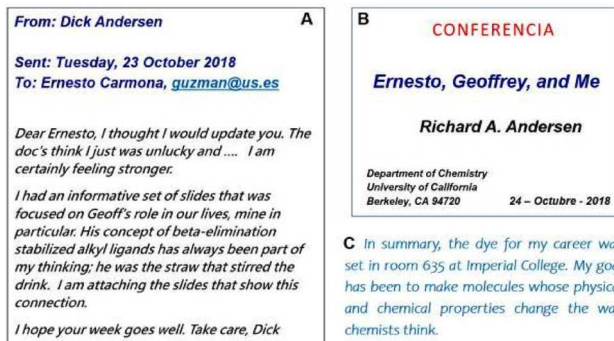


Figura 8. Algunos intercambios de información entre Dick Andersen y el autor de este artículo (A y B), junto con un enunciado definitorio extraído de un breve historial científico de Andersen (C)

reunión que se celebró en Sevilla en octubre de 2018 con motivo de mi 70 cumpleaños, a la que no pudo asistir por razones de salud. Incluye algunos fragmentos del correo electrónico que me envió poco después de su conclusión (A), que dejan ver el orgullo que sentía por su descendencia científica de Wilkinson, asimismo expresado en el efusivo colofón de un breve historial científico que preparó hace algunos años (C).<sup>[3]</sup>

#### LAZOS CIENTÍFICOS Y PERSONALES CON ESPAÑA

Andersen gustó siempre de aprovechar las colaboraciones científicas con investigadores extranjeros a las que le llevó su entusiasmo por la química, para conocer otros países, en especial europeos, y entre ellos principalmente España, Francia, Suiza, y también Alemania y Noruega. En diversas épocas fue *Profesor Visitante* en Sevilla, Lyon, Montpellier y Zurich, así como *Humboldt Professor* en Berlín y Constanza.

Sevilla sirvió de puerta de entrada a España, sobre todo cuando fue en nuestra Universidad *Profesor Visitante Iberdrola de Ciencia y Tecnología* entre 1995 y 1998. Durante este trienio realizó en el Instituto de Investigaciones Químicas y en el Departamento de Química Inorgánica varias estancias de 4-6 semanas de duración, y tuvo una notable contribución a las Tesis Doctorales de M. Mar Conejo Argandoña y Rafael Fernández Laínez. La primera fue defendida en 1999 y contó con Dick Andersen como miembro de la Comisión Evaluadora, puesto que incluía un capítulo sobre metalocenos de U(III) y U(IV), mientras que la segunda, concluida un año después, tuvo como núcleo central el estudio de diversos berilocenos derivados de los ligandos  $C_5Me_4H$  y  $C_5Me_5$ . De este intercambio científico surgieron dos publicaciones, la primera sobre complejos de tipo  $Cp^*_3U(CO)$  y otros similares,<sup>[37]</sup> y la segunda sobre berilocenos y su reactividad frente al isonitrilo  $CNXyl$  ( $Xyl = 2,6-Me_2C_6H_3$ ).<sup>[38]</sup>

Mi amistad con Andersen y la confianza científica que desde la juventud existió entre nosotros, fue siempre de gran ayuda para nuestro grupo. En este artículo dejo constancia de ello y de mi inmensa gratitud a Dick. En este sentido, quiero hacer referencia a su valiosa contribución



**Figura 9.** Rosa Fandós, Dick Andersen, Pilar Terreros y Christophe Copéret en Berkeley en 2012 en una reunión científica conmemorativa del 70 cumpleaños de Andersen. Por cortesía de la profesora Odile Eisenstein, CNRS y Université Montpellier



**Figura 10.** Pilar Palma, Juan Cámpora, Dick Andersen y Agustín Galindo en Valladolid en 2000. Gentileza del profesor Agustín Galindo, Universidad de Sevilla

a la caracterización del dizincoceno ( $\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_5$ )<sub>2</sub>Zn<sub>2</sub>, cuya estructura molecular basada en un enlace directo Zn-Zn sin ligandos puente, era inédita entre los centenares de metallocenos entonces conocidos. Aunque esta molécula se caracterizó en nuestro laboratorio con el mayor esmero, resultaba muy difícil descartar una formulación alternativa que incluyera dos ligandos hidruro puente, ( $\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_5$ )<sub>2</sub>Zn<sub>2</sub>( $\mu\text{-H}$ )<sub>2</sub>, y existía de hecho un precedente erróneo en un complejo de cobalto formulado inicialmente como ( $\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_5$ )<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>, en vez de como el trihidruro ( $\eta^5\text{-C}_5\text{Me}_5$ )<sub>2</sub>Co<sub>2</sub>( $\mu\text{-H}$ )<sub>3</sub>, que en realidad es. En nuestro caso, el espectro de masas de alta resolución que Andersen obtuvo en Berkeley fue decisivo, al estar de acuerdo con la formulación propuesta con enlace directo Zn-Zn, y no con la supuesta Zn( $\mu\text{-H}$ )<sub>2</sub>Zn.<sup>[39]</sup>

Las estancias de Andersen en Sevilla fueron académicamente muy fructíferas. Impartió varias conferencias en nuestro Centro, participó en un curso de posgrado sobre Química Organometálica en el que discutió la aplicación de la espectroscopía de RMN al análisis de compuestos paramagnéticos, y mantuvo innumerables discusiones científicas con Manuel López Poveda, Juan Cámpora, Pilar Palma y otros colegas, sobre temas de interés común. Realizó además visitas académicas a las Universidades de Castilla-La Mancha (UCLM) y Alcalá de Henares, en las que pronunció sendas conferencias, y también al Instituto de Catálisis del CSIC, en este caso invitado por nuestra compañera Pilar Terreros (Figura 9). En las citadas fechas surgió la relación científica con la UCLM, que se materializó inicialmente en la estancia que Carolina Hernández Labrador realizó en Berkeley entre septiembre y diciembre de 2000, y con posterioridad en la provechosa colaboración mantenida con Rosa Fandós desde entonces hasta nuestros días, a la que me referiré de inmediato. Antes, querría recordar que Andersen participó en dos Reuniones GEQO, primero en 2000 en Valladolid, donde presentó un póster

(Figura 10), y en 2008 en Santiago de Compostela como conferenciante plenario.

Rosa Fandós trabajó con Andersen en Berkeley durante seis meses en 2003 y dos más en 2009, en un proyecto de investigación que se centró en el estudio de la capacidad de coordinación del ligando tetraazamacrocíclico 6,8,15,17-tetrametildibenzotetraaza[14]anuleno, abreviado tmtaaH<sub>2</sub>, y dio como resultado la publicación de tres artículos, dos de ellos casi simultáneos,<sup>[40,41]</sup> y el tercero divulgado en fechas recientes.<sup>[42]</sup> En el primero, de gran interés para Andersen, se investigaron varios complejos de cerio, entre los que destaca el de composición Ce(tmtaa)<sub>2</sub>, formulación que implicaría una estructura electrónica de Ce(IV) con configuración 4f<sub>0</sub>, y en consecuencia comportamiento diamagnético. No obstante, el citado complejo exhibe un paramagnetismo independiente de la temperatura similar al encontrado para el complejo ya mencionado Ce(cot)<sub>2</sub>, que contiene el anión cot<sup>2-</sup> derivado del ciclooctatetraeno y posee estructura electrónica multiconfiguracional. Los otros artículos describen la formación de complejos de Rh(I) e Ir(I) de tipo M(tmtaaH)(L<sub>2</sub>), con L<sub>2</sub>= 1,5-ciclooctadieno, o 2CO, para los que se estudia su reactividad frente a los electrófilos Me<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> y Li<sup>+</sup>. Estas investigaciones se completan con la síntesis selectiva de complejos bimetalicos, que incluyen especies homonucleares como M<sub>2</sub>(tmtaa)(CO)<sub>4</sub>, y heteronucleares como RhIr(tmtaa)(CO)<sub>4</sub>, entre otras.<sup>[41,42]</sup>

Nuestro país, sus gentes y hábitos, atrajeron siempre a Dick Andersen. En la comida, la tortilla de patatas, las verduras, y sobre todo el pan, el aceite de oliva, las salsas, los mariscos y el pescado. En la bebida, la cerveza y el vino tinto, y de nuestra cultura, Goya, Picasso, el Museo del Prado y el Reina Sofía, y también el arte flamenco. Durante los últimos 15-20 años, Andersen visitó Sevilla de forma regular, con frecuencia al menos bianual, y en muchos de estos viajes aprovechaba para pasar unos días en Madrid o en Toledo, en este último caso preparando con Rosa Fandós algún artículo científico. Como curiosidad, siempre programaba sus viajes en miércoles, que consideraba el

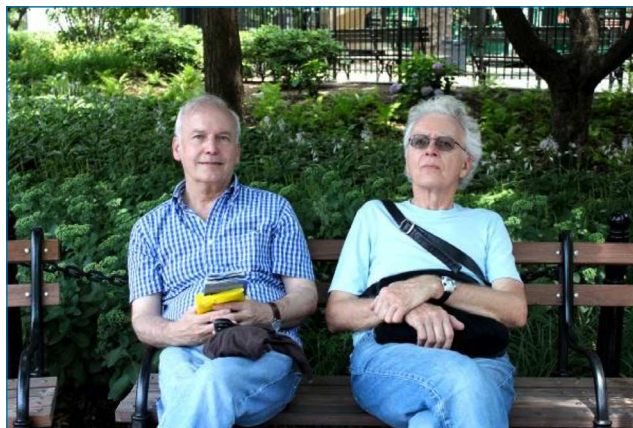


Figura 11. Fotografía tomada en Central Park, Nueva York, en 2011 (propiedad del autor de este artículo)

día más tranquilo de la semana por la casi equidistancia con los fines de semana anterior y posterior. Le entusiasmaba el flamenco, sobre todo el baile y la guitarra. Leía *The New York Times* de modo habitual y se interesaba por las noticias sobre Europa, y entre ellas las de España, y analizaba además con predilección las críticas de los espectáculos flamencos que acontecían en Nueva York, para asistir a ellos posteriormente si llegaban a repetirse en San Francisco. Los años de Bienal de Flamenco en Sevilla, al hacerse público el programa oficial yo lo convertía en documento pdf y se lo enviaba, junto con una selección previa propia. Ésta incluía dos o tres largos fines de semana (jueves a martes) que ofrecían al menos otros tantos espectáculos descolantes, y Dick hacía la selección final, condicionándola a sus enseñanzas del curso *Chem 108* antes aludido. En Sevilla hemos disfrutado juntos del baile de Antonio Canales y, sobre todo, del de Farruquito, su gran ídolo flamenco, así como de la guitarra de Tomatito y de las actuaciones de otros muchos artistas. También hemos hecho alguna excursión a Sanlúcar de Barrameda para comer en Bajo Guía y deleitarnos con sus pescados e insuperables langostinos.

A título anecdótico, recuerdo con nitidez esperar en no pocas ocasiones la llegada en AVE de Dick en la plataforma elevada de Santa Justa, en la que desembocan las escaleras mecánicas procedentes de los andenes, hasta distinguir en la distancia su inconfundible silueta, portando una sencilla bolsa de viaje de reducidas dimensiones, con su escaso, siempre reducido, equipaje, y otra de tela, colgada en bandolera, aún más sencilla, si cabe, que la anterior, con lectura, documentos de viaje y de trabajo. Ni por asomo un dispositivo electrónico, algo que sería herético para Dick, no ya un teléfono móvil (Dick y yo debíamos ser los dos únicos químicos organometálicos del mundo carentes de este artilugio), sino ni siquiera un sencillo reproductor de música. En este sentido, cuando en 2011 fuimos a *New York* a visitar a nuestro común amigo Roberto Sánchez Delgado (Figura 11) aproveché para comprar un *iPod*. No solo no quiso acompañarme a

la tienda de *Apple* sino que reprochó mi libertinaje electrónico y me amenazó con la pérdida de su estima.

## EPÍLOGO

Es un hecho evidente que las contribuciones científicas de Dick Andersen han tenido un impacto considerable en la química inorgánica y organometálica de los metales de transición y de los elementos lantánidos y actínidos. Son testigo de ello las numerosas y relevantes aportaciones que hizo sobre las características de una amplia variedad de compuestos, entre los que se incluyen hidruros, alquilos, amiduros, carbonilos, metalocenos, etc., la ilustre escuela que creó, de la que son parte destacados investigadores estadounidenses y de otros países, y la excelencia de las colaboraciones que mantuvo con prestigiosos científicos de todo el mundo.

Junto con su rectitud y honradez, el rasgo más distintivo de su personalidad fue su incontenible pasión por la química, ciencia a la que se entregó en cuerpo y alma, y a la que dedicó gran parte de su vida con tanto entusiasmo como generosidad. A estos atributos Dick acompañaba un profundo juicio crítico, muy altas cotas de creatividad y originalidad, y una superlativa memoria. Con él se va una parte importante de la química inorgánica moderna, y muchos de nosotros perdemos además a un querido y leal amigo, de quien guardaremos un entrañable e imperecedero recuerdo.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los profesores Jennifer C. Green, Malcolm L. H. Green, Odile Eisenstein, Peter G. Edwards, Christophe Copéret, Marc Walter y Rosa Fandós, la valiosa información proporcionada para la elaboración de este artículo. Deseo, asimismo, mostrar mi gratitud a los profesores Gerard Parkin, Odile Eisenstein y Agustín Galindo, por la autorización para incluir fotografías de su propiedad (para mayor detalle véase el pie de las figuras).

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Arnold, T. D. Tilley, *Chem. Commun.*, **2018**, *54*, 12131-12132 (editorial).
- [2] R. A. Andersen, E. Carmona-Guzmán, J. F. Gibson, G. Wilkinson, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, **1976**, 2204-2211.
- [3] M. L. H. Green, comunicación personal.
- [4] R. A. Andersen, *Inorg. Chem.* **1979**, *18*, 1507-1509.
- [5] G. S. Girolami, V. V. Mainz, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **1982**, *104*, 2041-2042.
- [6] P. G. Edwards, R. A. Andersen, A. Zalkin, *J. Am. Chem. Soc.* **1981**, *103*, 7792-7794.
- [7] T. D. Tilley, R. A. Andersen, A. Zalkin, *J. Am. Chem. Soc.* **1982**, *104*, 3725-3727.



- [8] T. D. Tilley, R. A. Andersen, B. Spencer, H. Ruben, A. Zalkin, D. H. Templeton, *Inorg. Chem.* **1980**, *19*, 2999-3003.
- [9] C. J. Burns, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **1987**, *109*, 5855-5856.
- [10] H. W. Turner, S. J. Simpson, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **1979**, *101*, 2782.
- [11] S. J. Simpson, H. W. Turner, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **1979**, *101*, 7728-7729.
- [12] E. L. Werkema, L. Maron, O. Eisenstein, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 2529-2541.
- [13] J. C. Green, M. Payne, E. A. Seddon, R. A. Andersen, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, **1982**, 887-892.
- [14] R. A. Andersen, J. M. Boncella, C. J. Burns, J. C. Green, D. Hohl, N. Rösch, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, **1986**, 405-407.
- [15] R. A. Andersen, K. Faegri Jr., J. C. Green, A. Haaland, M. F. Lappert, W. P. Leung, K. Rypdal, *Inorg. Chem.* **1988**, *27*, 1782-1786.
- [16] O. Eisenstein, comunicación personal.
- [17] P. Selg, H. H. Brintzinger, R. A. Andersen, I. T. Horváth, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1995**, *34*, 791-793.
- [18] P. Selg, H. H. Brintzinger, M. Schultz, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2002**, *21*, 3100-3107.
- [19] L. Maron, L. Perrin, O. Eisenstein, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 5614-5615.
- [20] J. G. Brennan, R. A. Andersen, J. L. Robbins, *J. Am. Chem. Soc.* **1986**, *108*, 335-336.
- [21] L. Maron, O. Eisenstein, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2009**, *28*, 3629-3635.
- [22] E. L. Werkema, E. Messines, L. Perrin, L. Maron, O. Eisenstein, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **2005**, *127*, 7781-7795.
- [23] E. L. Werkema, R. A. Andersen, A. Yahia, L. Maron, O. Eisenstein, *Organometallics*, **2009**, *28*, 3173-3185.
- [24] N. Barros, D. Maynau, L. Maron, O. Eisenstein, G. Zi, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2007**, *26*, 5059-5065.
- [25] M. Schultz, J. M. Boncella, D. J. Berg, T. D. Tilley, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2002**, *21*, 460-472.
- [26] C. H. Booth, M. D. Walter, M. Daniel, W. W. Lukens, R. A. Andersen, *Phys. Rev. Lett.* **2005**, *95*, 267202.
- [27] C. H. Booth, D. Kazhdan, E. L. Werkema, M. D. Walter, W. W. Lukens, E. D. Bauer, Y.-J. Hu, L. Maron, O. Eisenstein, M. Head-Gordon, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **2010**, *132*, 17537-17549.
- [28] G. Nocton, C. H. Booth, L. Maron, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2013**, *32*, 5305-5312.
- [29] M. D. Walter, P. T. Matsunaga, C. J. Burns, L. Maron, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2017**, *36*, 4564-4578.
- [30] C. P. Gordon, K. Yamamoto, W.-C. Liao, F. Allouche, R. A. Andersen, C. Copéret, C. Raynaud, O. Eisenstein, *ACS Central Science*, **2017**, *3*, 759-768.
- [31] C. P. Gordon, K. Yamamoto, K. Searles, S. Shirase, R. A. Andersen, O. Eisenstein, C. Copéret, *Chem. Sci.*, **2018**, *9*, 1912-1918.
- [32] C. P. Gordon, S. Shirase, K. Yamamoto, R. A. Andersen, O. Eisenstein, C. Copéret, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **2018**, *115*, E5867-E5876.
- [33] C. P. Gordon, D. B. Culver, M. P. Conley, O. Eisenstein, R. A. Andersen, C. Copéret, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 648-656.
- [34] C. P. Gordon, C. Raynaud, R. A. Andersen, C. Copéret, O. Eisenstein, *Acc. Chem. Res.* **2019**, *52*, 2278-2289.
- [35] C. P. Gordon, R. A. Andersen, C. Copéret, *Helv. Chim. Acta*, **2019**, *102*, e1900151.
- [36] J. L. Stewart, A. K. Bentley, A. R. Johnson, C. Nataro, B. A. Reisner, L. A. Watson, *Dalton Trans.*, **2018**, *47*, 13755-13760.
- [37] M. M. Conejo, J. S. Parry, E. Carmona, M. Schultz, J. G. Brennann, S. M. Beshouri, R. A. Andersen, R. D. Rogers, S. Coles, M. B. Hursthouse, *Chem. Eur. J.* **1999**, *5*, 3000-3009.
- [38] M. M. Conejo, R. Fernández, E. Carmona, R. A. Andersen, E. Gutiérrez-Puebla, M. A. Monge, *Chem. Eur. J.* **2003**, *9*, 4462-4471.
- [39] A. Gírrane, I. Resa, A. Rodríguez, E. Carmona, E. Alvarez, E. Gutiérrez-Puebla, A. Monge, A. Galindo, D. del Río, R. A. Andersen, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 693-703.
- [40] M. D. Walter, R. Fandos, R. A. Andersen, *New J. Chem.*, **2006**, *30*, 1065-1070.
- [41] R. Fandos, M. D. Walter, D. Kazhdan, R. A. Andersen, *Organometallics*, **2006**, *25*, 3678-3687.
- [42] R. Fandos, S. S. Rozenel, R. A. Andersen, *Polyhedron*, **2017**, *137*, 17-23.

# Santiago Bonilla Mirat: retrato de un químico olvidado

Fernando Villafañe González

**Resumen:** Todas las referencias señalan que la primera mención en español a la Tabla Periódica de Mendeleiev aparece en el texto “Tratado Elemental de Química General y Descriptiva”, de Santiago Bonilla Mirat (1844-1899) en su primera edición de 1880. A pesar de este dato, Bonilla es un gran desconocido para el público y para la comunidad científica española e hispanohablante. Este artículo contiene el primer retrato publicado desde el siglo XIX y datos biográficos a partir de las fuentes originales. De este modo se pretende reparar el olvido al que se ha visto relegado este personaje fascinante y su obra.

**Palabras clave:** Bonilla, Tabla Periódica, siglo XIX.

**Abstract:** All the references indicate that the first mention in Spanish to the Mendeleiev’s Periodic Table was published in the textbook “Tratado Elemental de Química General y Descriptiva” (Basic Treatise on General and Descriptive Chemistry), by Santiago Bonilla Mirat (1844-1899), in its first edition of 1880. However, Bonilla is largely unknown by the public and by the Spanish speaking scientific community. This article includes his first portrait published since the XIX century, as well as biographic data from the original sources. The aim of this work is to raise awareness of this fascinating person and his work.

**Keywords:** Bonilla, Periodic Table, XIX century.

## INTRODUCCIÓN

La primera edición del libro *Osnovy khimii (Principios de Química)*, escrito por Dmitri Mendeleiev, se publicó en Rusia en 1869.<sup>[1]</sup> Como es bien sabido, el libro recogía una novedosa propuesta de clasificación de los 63 elementos químicos conocidos en ese momento, ordenados según su “capacidad de combinación” (o valencia) y su peso atómico. No era la primera vez que se publicaba una clasificación de los elementos conocidos y, como los demás intentos, fue acogida con cierto escepticismo. Lo que diferenció la propuesta de Mendeleiev de las demás fue su atrevimiento, ya que predecía la existencia y propiedades de elementos que aún no habían sido descubiertos. Sólo unos años más tarde, en 1874, 1879 y 1884 se descubrieron tres elementos (galio, escandio y germanio, respectivamente), cuyas propiedades coincidían con las que había predicho Mendeleiev. Estos descubrimientos contribuyeron a que la comunidad científ-

fica mundial aceptara rápidamente esa clasificación. Como sabemos, la clasificación inicial de Mendeleiev ha sido capaz de ir admitiendo posteriores ampliaciones a medida que se han ido descubriendo más elementos, resultando en lo que hoy conocemos como Tabla Periódica.

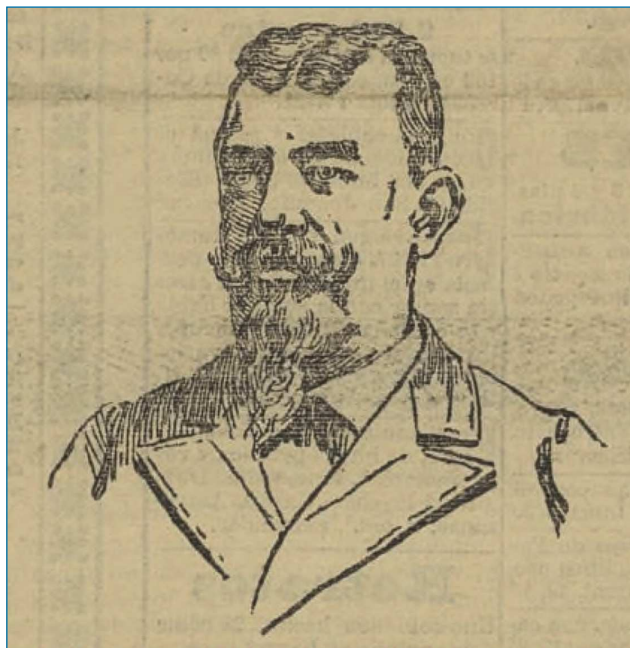
En 1880 la “Imprenta y Librería Nacional y Extranjera (sic) de Hijos de Rodríguez” editó en Valladolid el libro *Tratado Elemental de Química General y Descriptiva*, escrito por Santiago Bonilla Mirat, “Catedrático numerario por oposición de la asignatura en la Universidad de Valladolid”.<sup>[2]</sup> En la página 76 aparece un epígrafe titulado “Fundamentos de la clasificación de Mendéleeff” (sic), en el que se describen los “principios de la ley periódica” y se recogen ya los descubrimientos del galio y del escandio. Se trata de la primera mención en un libro de texto escrito en español a la Tabla Periódica de Mendeleiev. Es importante resaltar que ésta empezó a ser aceptada a partir del descubrimiento del galio en 1874, y que la mayoría de los textos de Química publicados por otros autores españoles e incluso del sur de Europa no recogieron ni la Tabla Periódica ni estos descubrimientos hasta años más tarde.<sup>[3]</sup> En total se editaron nueve ediciones del *Tratado Elemental de Química General y Descriptiva*, las últimas tras la muerte de su autor, en este caso reformadas y ampliadas por Ángel del Campo Cerdán y Jaime Ferrer Hernández. Fue un texto ampliamente utilizado durante casi medio siglo en muchos centros de enseñanza superior, pero también en secundaria o en escuelas militares, tanto en España como en otros países de habla



F. Villafañe

Universidad de Valladolid. Química Inorgánica, Facultad de Ciencias 47011 Valladolid, España.  
Presidente de la Asociación de Químicos de Castilla y León.  
C-e: [fernando.villafane@uva.es](mailto:fernando.villafane@uva.es)

Recibido: 02/09/2019. Aceptado: 05/09/2019.



**Figura 1.** Retrato a plumilla de Santiago Bonilla Mirat publicado en el Heraldo de Madrid el 12/6/1898

hispana, hasta la última edición que se publicó en 1922. Estos datos hablan por sí solos de la importancia del libro y de su autor, que sin embargo es un gran desconocido tanto para el público, como para la comunidad científica española e hispanohablante. La pregunta surge inmediatamente: ¿quién fue Santiago Bonilla Mirat? Los datos que se pueden encontrar sobre su vida y sus obras son bastante limitados, pero la verdad es que cuando nos adentrarnos en ellos nos encontramos con un personaje fascinante. Para comenzar, no existe en la bibliografía moderna ningún retrato del autor. El retrato a plumilla que aquí se presenta (Figura 1)<sup>[4]</sup> corresponde a la última etapa de su vida y fue publicado en el Heraldo de Madrid el 12 de junio de 1898, con motivo de su toma de posesión como académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. En este artículo se recopilan sus datos biográficos, académicos y personales, citando en la medida de lo posible las fuentes originales.

## ETAPAS DE FORMACIÓN Y PRIMEROS TRABAJOS

Santiago Bonilla Mirat nació en Salamanca el 27 de marzo de 1844, hijo de José Bonilla Ruiz, natural de Alcañices (Zamora), y de Casilda Mirat Tejedor, natural de Salamanca.<sup>[5]</sup> Sabemos que en la década de los 1850 el niño Santiago vivía con sus padres y sus hermanas Antonia y María en la calle Caldereros de Salamanca, junto a la fábrica familiar dirigida por su abuelo materno Juan Sahagún Mirat Herro. En ella se producía el conocido “almidón de Salamanca” y hoy en día la fábrica sigue funcionando bajo la marca S.A. Mirat. Era una familia acomodada, que vivía del próspero negocio familiar, aunque varios parientes ocupaban

puestos de responsabilidad en la sociedad civil y religiosa, como su padre, abogado de profesión, o sus tíos Juan y Adrián Mirat, médico titular en el pueblo salmantino de San Felices de los Gallegos y administrador económico de la diócesis de Salamanca, respectivamente.<sup>[4]</sup>

Santiago finaliza en 1853 su primer ciclo de formación y en su expediente figuran las “muestras inequívocas de aplicación y buena conducta” y que “a las buenas cualidades de este niño han contribuido el celo infatigable de los profesores y el esmero de su entendido padre en secundar las miras de aquellos”.<sup>[4]</sup> Las muestras del afán por aprender y formarse del joven Santiago no habían hecho más que comenzar, como demuestra la sucesión de estudios que emprendió y finalizó. En junio de 1860 obtiene el Grado de Bachiller en Artes<sup>[6]</sup> con la calificación de sobresaliente.<sup>[7]</sup> El último curso 1859-1860 se matricula de tres asignaturas de Ciencias en la Universidad de Salamanca, pero no puede examinarse debido a la supresión de la Escuela de la Facultad de Ciencias.<sup>[8]</sup> Durante el curso 1861-1862 desempeña su primer trabajo como encargado del Observatorio Meteorológico del Instituto de Segunda Enseñanza de Salamanca.<sup>[7]</sup> En Valladolid obtiene los títulos de Bachiller en Ciencias y en Derecho Administrativo,<sup>[6]</sup> que debió simultanear ya que finaliza ambos en 1863. A continuación se traslada a Madrid, donde en sólo dos años obtiene las Licenciaturas en Ciencias, en la sección de Físicas, y en Derecho, sección de Administrativo.<sup>[7]</sup>

En Madrid, a los 19 años de edad, comienza su carrera docente como “Profesor de las asignaturas de Física y Química, y de Matemáticas, de varios colegios de 2.<sup>a</sup> enseñanza, incorporados a los Institutos del Noviciado y de San Isidro de Madrid, desde 1863 a 1873, con autorización de la Dirección de Instrucción Pública, fecha 24 de octubre de 1864, dispensándole la edad que entonces se exigía para desempeñar dicho Cargo”.<sup>[7]</sup> Con la Licenciatura en la mano, en 1865, obtiene una plaza como Ayudante de las Cátedras de Física y Química, impartiendo asignaturas de Química General, Análisis Químico, Química Orgánica y Química Inorgánica entre 1865 y 1874.<sup>[7]</sup> El 18 de abril de 1869 presenta su Tesis Doctoral<sup>[9]</sup> titulada *La nomenclatura química*.<sup>[10]</sup> Su determinación por seguir formándose no finaliza tras obtener el doctorado y entre 1869 y 1872 se matricula de algunas asignaturas de la Licenciatura en Farmacia.<sup>[8]</sup>

En 1872 se publica la tercera edición del libro *Lecciones elementales de Química General...*, de Ramón Torres Muñoz de Luna, en la que Bonilla colabora en su redacción, como le agradece en el prólogo por “...completarnos una lección de principios elementales de filosofía química, poniendo en relieve las ideas modernas que tienden á invadir tarde ó temprano el campo de la química mineral desde la orgánica, en que hoy dominan sin obstáculo alguno, y para cuyo objeto ha extractado (sic) con el mayor tino y erudición, lo más conveniente al caso, de las obras de química modernas, tales como Debray, Naquet, Brélez, y sobre todo, la filosofía química de nuestro querido amigo y profesor A. Wurtz”.<sup>[11]</sup> Esta colaboración con el profesor Torres Mu-

ño de Luna debió ser meramente profesional, ya que es al profesor Manuel Sáenz Díez a quien Bonilla expresará posteriormente su mayor admiración y agradecimiento: “a cuyo lado transcurrieron los mejores años de mi vida, primero como discípulo, después como ayudante”.<sup>[12]</sup> La relación con el profesor Sáenz Díez llegó a ser de tipo personal: “En los años que tuve la fortuna de pasar a su lado muchas horas en el laboratorio y de tratarle en el seno de su familia...”<sup>[12]</sup> También coincidió en esos años con José Ramón de Luanco, a quien expresa su cariño llamándolo “mi inolvidable profesor”.<sup>[2]</sup>

Son años de formación en todos los sentidos: “Aprendió de sus maestros la constancia, la formalidad más absoluta, la severidad en el cumplimiento de su deber, y continuó y continúa siendo un obrero diario de la labor científica, dotado de una fe y de una resistencia inagotables, verdadero soldado de la legión de los hombres útiles, el primero de los estudiantes de su cátedra siempre, que a un tiempo enseña con su saber y con el ejemplo”.<sup>[13]</sup>

### CÁTEDRA EN VALLADOLID

En 1874 obtiene la Cátedra de Química General en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid, que ocupará durante 18 cursos consecutivos, hasta 1892. Se trata de la etapa más dilatada y fecunda de su vida académica y científica.<sup>[5]</sup> Su *Tratado Elemental de Química General y Descriptiva* y otras publicaciones destacadas se tratan con detalle más abajo, por lo que este apartado se centra en otras actividades desarrolladas durante esa etapa.

Quizá una de sus decisiones más sorprendentes es que entre 1877 y 1881 decida matricularse y finalizar la Licenciatura en Medicina. Como relata el académico Becerro de Bengoa: “...siendo profesor tan reputado, fue a sentarse en el anfiteatro del hospital del Campo Grande, entre los estudiantes, para alcanzar su título de Licenciado en Medicina, con la nota superior que logran los que trabajan con fe y perseverancia”.<sup>[13]</sup> Sin duda, esta amplia formación multidisciplinar, con Licenciaturas en Derecho y Medicina, sin olvidar sus estudios en Farmacia, además del Doctorado en Ciencias, le permitió abordar las labores profesionales variadas que luego se detallan, relacionadas casi siempre con la salud pública.

Una comisión mixta de la Diputación y el Ayuntamiento de Valladolid le asigna la creación del primer “Laboratorio Químico y Micrográfico Municipal y de la Provincia”. Constituido en julio de 1886, es su Director, responsable de su instalación, puesta en funcionamiento, y de la elaboración de un reglamento.<sup>[7]</sup> El laboratorio “practicó más de un millar de análisis y reconocimientos de alimentos, bebidas y sustancias sujetas al impuesto de consumos, redactando numerosos informes técnicos. A ciento treinta asciende la cifra de análisis químicos que ha realizado además por encargo de los tribunales”.<sup>[13]</sup> Algunas de estas labores de inspección de alimentos fueron reconocimientos micrográficos de carne porcina, para detección de cisticercosis, o de bacalao. Además se encar-

gó del reconocimiento y fumigación de los ríos Pisuerga y Esgueva en la capital y en otras poblaciones durante la epidemia de cólera de 1885. Durante esta epidemia formó parte de la comisión permanente de salubridad, que elaboró numerosos informes.<sup>[5,7]</sup> También fue nombrado inspector del alumbrado público de Valladolid y formó parte de diversos jurados, consejos y comisiones de la ciudad.<sup>[5,7]</sup>

En cuanto a sus labores académicas, Bonilla se mostraba especialmente satisfecho de su labor en las “lecciones prácticas de Química, a los alumnos de dicha asignatura en laboratorio de la misma, habiendo reformado y aumentado considerablemente los medios de enseñanza en dicho laboratorio”.<sup>[7]</sup> En 1887 fue designado para dar lectura al discurso inaugural en la Universidad de Valladolid en la solemne apertura de curso: “voy a presentar (...) sirviéndome de punto de partida y medio de demostración de la importancia que los conocimientos de la Química tienen para otros ramos del saber humano y más concretamente para la Medicina y para la administración de justicia, una de las conquistas más modernas de aquella ciencia, cual es el descubrimiento de que en el organismo animal se forman alcaloides, llamados ptomainas y leucomainas, algunos tan venenosos o más que los que se producen en el organismo vegetal; alcaloides de origen animal que son el principio tóxico que se desarrolla en la putrefacción cadavérica y en los alimentos cuando comienzan a alterarse, siendo la causa de los errores cometidos en las investigaciones químico-legales y de los graves trastornos que experimentan los que hacen uso de dichos alimentos”.<sup>[14]</sup>

Obtuvo un pronto reconocimiento a su labor profesional formando parte en la Real Academia de Medicina y Cirugía de Castilla la Vieja, primero como corresponsal (1879), luego como miembro numerario (1883) y, posteriormente, como tesorero (1887-1888) y como vicepresidente (1889-1892). También fue nombrado Académico de la Sociedad de Farmacia de Turín en 1880.<sup>[5]</sup>

### CÁTEDRA EN LA UNIVERSIDAD CENTRAL

En 1892 es nombrado catedrático de la Universidad Central y ese verano se traslada a Madrid, donde pasará los últimos años de su vida. En el aspecto profesional son años en los que se sigue reconociendo su trayectoria académica, como demuestra que en 1893 fuera nombrado académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Tomó posesión el 12 de junio de 1898 con un discurso titulado “Anatomía y Fisiología de la Molécula Química”.<sup>[12]</sup> Su discurso fue contestado por el Académico Ricardo Becerro de Bengoa.<sup>[13]</sup> Ambos discursos reflejan con detalle el ambiente de trabajo y los escasos medios en los que los científicos de la época desarrollaban sus labores. El espíritu de la generación del 98 se reflejaba en el estado de la Ciencia, y Bonilla se lamentaba de no poder ofrecer a sus colegas académicos “...el descubrimiento de algún nuevo elemento, de algún ‘Hispanio’, digno de figurar al

lado de el del Galio de Mr. Lecoq de Boisbaudran, ó del Germanio de Winkler, fuese por lo menos un diminuto grano de arena que, aglomerado con otros, merced á la energía intelectual, puesta en acción por el cerebro de algún genio potente, viniera á formar parte del grandioso edificio de la Ciencia...”<sup>[12]</sup> Este lamento estaba relacionado con la escasez de medios, que Bonilla denominaba “trabajar a lo pobre”: “Y en este sentido le debemos (al prof. Manuel Sáenz Díez) sus discípulos el inmenso favor de habernos enseñado á trabajar á lo pobre, porque sin ello habríamos tenido que permanecer inactivos, esperando que el Estado mejorase las condiciones del material de nuestros gabinetes de Química...”<sup>[12]</sup> La contestación del académico Becerro de Bengoa incide en similares términos: “Ha vivido siempre la Química oficial en nuestros establecimientos como una pobre huérfana sin amparo, tan escasamente nutrida por dentro como mal arropada por fuera”.<sup>[13]</sup> Y a continuación resalta: “Desde fuera veíamos moverse en él, como á seres superiores, que siempre nos impusieron inevitable temor, (...) al enhiesto é imperturbable Bonilla. Pobre era todo lo que nos rodeaba, el sitio, la casa, el ajuar, los estantes, el material que contenían, los productos químicos, la biblioteca y los utensilios de escritorio; pobre era todo menos el afecto, la vocación, la asiduidad, el saber, el buen ejemplo, la valía de aquellos profesores veteranos de la enseñanza, que tanto empeño pusieron siempre en instruirnos y en que practicáramos la ciencia en todo lo posible, á pesar de ‘trabajar á lo pobre’”.<sup>[13]</sup>

Estos últimos años fueron duros en el plano personal. Antes (en 1888, en Valladolid) había fallecido su único hijo varón, José. En 1895 fallece su esposa Columba Elipe Bustinduy, con la que se había casado en 1867 en la Parroquia de San Sebastián de Madrid durante su primera etapa en la capital. En esa época “los primeros síntomas de una enfermedad cruel iban haciendo mella” en él,<sup>[15]</sup> y finalmente falleció en Madrid el 21 de junio de 1899. Tres días más tarde fue enterrado en Valladolid (Figura 2). Le sobrevivieron sus hijas María Cruz, Casilda y Matilde.

Meses después de su muerte, el académico José Muñoz del Castillo hace una emocionada semblanza de Bonilla: “maestro forjado á machamartillo en las aulas de Salamanca, Valladolid y Madrid, escuelas que bien claras pruebas le dieron del afecto en que como hijo predilecto le tenían; del pedagogo, revelado en su admiradamente equilibrado libro de texto, preciosa herramienta con que esculpió en veinticinco generaciones los conocimientos y las aficiones químicas en la medida de lo legal, de lo necesario, y de lo discreto entre lo viejo y lo nuevo; del analista que heredó, por aclamación del público, aquella confianza que la Administración y los particulares tuvieron durante muchos años con razón y justicia en D. Magín Bonet y D. Manuel Sáenz Díez; del observador concienzudo, cuyos trabajos empezaban ya á ser conocidos, no por enviados, sino por pedidos, en el extranjero; del hombre cuya corrección de procedimientos era tal, que pocos de los amigos que perdió, por ser esclavo de ella, no le hacían justicia á pesar de la ruptura de los afectos”.<sup>[16]</sup>

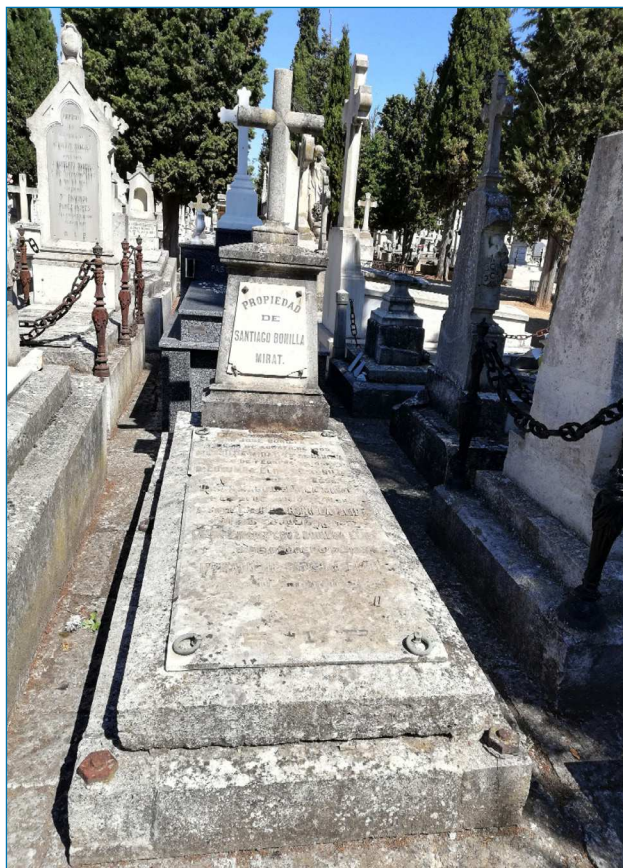


Figura 2. Tumba familiar de Santiago Bonilla Mirat en el Cementario del Carmen de Valladolid (fotografía del autor)

## EL “TRATADO ELEMENTAL DE QUÍMICA” Y OTRAS PUBLICACIONES

Como ya se ha señalado, el “Tratado Elemental de Química General y Descriptiva” es sin duda su obra más importante. En el prólogo de la 1ª edición ya confiesa que la razón principal por la que se decidió a escribirlo fue comprobar cómo sus alumnos “...vienen sirviéndose la mayor parte de ellos de cuadernos manuscritos formados con las notas que toman por sí mismos en la cátedra durante la explicación, ó que se van transmitiendo de unos a otros; he tenido ocasión de revisar algunos de dichos cuadernos, bastante extensos á la verdad, y de los que mas fama han conseguido alcanzar entre mis alumnos, y he podido apreciar gran número de inexactitudes consignadas en ellos, debidas á la precipitación con que se toman las notas que sirven para formarles. El deseo de que desaparezcán aquellas y de evitar á mis discípulos el penosísimo trabajo de copiar toda la explicación, son las razones que he tenido para publicar este tratado”.<sup>[2]</sup>

La primera mención a la Tabla Periódica en un texto español aparece en esa primera edición y es muy breve, apenas ocupa más de una página y no recoge ninguna figura. Es la tercera edición de 1884 la que recoge por primera vez una representación de la Tabla Periódica.<sup>[2b]</sup> En cualquier caso, el texto no se organizaba a partir de la Tabla

Periódica, como ocurría con el resto de libros publicados hasta 1920, aproximadamente. Bonilla, como otros autores de la época, se limitaba a describir la ordenación de Mendeleiev enfatizando la predicción de las propiedades de los elementos que luego se descubrieron.<sup>[17]</sup>

También publicó varios trabajos de investigación original. Es evidente que este tipo de publicaciones eran poco habituales en la época, en la que eran más comunes los libros de texto o las traducciones de autores extranjeros. Los trabajos que podríamos denominar de investigación cubrían campos muy amplios que excedían el propio de la química y generalmente se solapaban con ciencias hermanas, y eran siempre de aplicación práctica, como monografías industriales o agrarias, o trabajos sobre toxicología, farmacia o higiene.<sup>[18]</sup>

Pero Bonilla era consciente de la trascendencia de la investigación: “para ser químico, en el genuino sentido de esta palabra, es necesario practicar investigaciones cuyo objetivo sea la comprobación de las realizadas por otros para demostrar su exactitud, ya siguiendo los procedimientos empleados por sus autores, ya modificándoles para perfeccionarlos ó ideando otros nuevos, ó bien lanzándose por caminos no seguidos aún por otros para contribuir á que aumenten los conocimientos científicos, llegando quizás á realizar descubrimientos de gran importancia: para todo lo cual naturalmente no basta adquirir la práctica rutinaria de preparar mejor ó peor los cuerpos que se acostumbra á preparar en nuestros laboratorios ó cátedras, haciendo caso omiso, casi por completo, de todo lo que se refiere á ideas especulativas. Ni basta tampoco limitarse á leer y comentar las publicaciones en que otros dan cuenta de sus investigaciones, porque sería lo mismo que aspirar á ser músico sin saber el solfeo, pintor sin saber dibujar, anatómico sin haber practicado ni la más pequeña disección, patólogo sin haber visitado una clínica”.<sup>[12]</sup> Las aportaciones de Bonilla se encuadran en los campos señalados más arriba, aunque quizá cabe destacar la variedad de las áreas que cubre, más amplia que las estudiadas por sus contemporáneos.

Firmó diversos trabajos, a veces en colaboración con médicos o farmacéuticos, analizando aguas de distintos manantiales españoles.<sup>[19]</sup> A finales de la década de los 1870 publicó dos trabajos junto a su amigo el farmacéutico vallisoletano Ángel Bellogín Aguasal, a quien conoció durante su primera etapa en Valladolid y le acompañó hasta los últimos días de su vida, como indica su presencia como testigo en el momento de hacer testamento.<sup>[5]</sup> En 1877 publicaron juntos un trabajo sobre la presencia del aceite de semillas de algodón en el aceite de oliva, una adulteración que era frecuente.<sup>[20]</sup> Dos años más tarde publican otro trabajo sobre las intoxicaciones con cloroformo,<sup>[21]</sup> anestésico que comenzó a utilizarse regularmente a mediados del siglo XIX. El último trabajo de Bonilla es de 1896 y analiza la composición química de un meteorito que cayó en Madrid el 10 de Febrero de 1896.<sup>[22]</sup>

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a los historiadores María Ordóñez y Enrique Berzal, así como a Noemí Garcimartín, técnico especialista del Archivo de la UVa. Su desinteresada ayuda ha sido decisiva para elaborar este artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] (a) P. Román, *Mendeléiev. El profeta del orden químico*, 2.ª ed. Nivola, 2008. (b) Una detallada descripción del descubrimiento de Mendeleiev y del proceso de creación de su libro: M. Kaji: “D. I. Mendeleev’s concept of chemical elements and the principles of Chemistry”, *Bull. Hist. Chem.* **2002**, *27*, 4-16.
- [2] (a) S. Bonilla, *Tratado Elemental de Química General y Descriptiva*, Imprenta y Librería Nacional y Extranjera (sic) de Hijos de Rodríguez, 1880. (b) *Ibíd.*, 3.ª edición, 1884.
- [3] (a) *Early Responses to the Periodic System*, editado por M. Kaji, H. Kragh, y G. Palló. Oxford University Press, 2015. (b) S. Alvarez, J. Sales, M. Seco: “On books and chemical elements”, *Found Chem.* **2008**, *10*, 79-100.
- [4] M. Ordóñez, comunicación personal.
- [5] J. Riera: Santiago Bonilla Mirat (1844-1899): Académico de Valladolid y químico del siglo XIX, *An. Real Acad. Med. Cir. Vall.* **2015**, *52*, 217-280.
- [6] El título de Bachiller en Artes era necesario para matricularse en las facultades. Los estudios de facultad se hacían en tres períodos, que habilitaban respectivamente para los tres grados académicos de Bachiller, Licenciado y Doctor. Los alumnos no podían pasar de un período a otro sin haber recibido el grado correspondiente. El Grado de Bachiller en Ciencias constaba de tres cursos, a partir del cual se podía optar a la Licenciatura, que constaba de cuatro cursos. “Ley de Instrucción pública, 9 de Setiembre de 1857, Claudio Moyano Samaniego, Madrid, Imprenta Nacional, 1857”.
- [7] Hoja de servicios de Santiago Bonilla Mirat, Archivo Universidad de Valladolid, leg. 345.
- [8] E. Niño, *Perfiles Universitarios Ciencias (1858 a 1923)*, Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial, 1991, 45-47.
- [9] Las tesis doctorales de los años 50 y 60 del siglo XIX no tenían originalidad científica, ni se exigía calidad investigadora: A. Miguel, *Los estudios de doctorado y el inicio de la tesis doctoral en España. 1847-1900*, Alicante: Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2005. Edición digital a partir de Archivos e Historia de las Universidades, Madrid, Instituto Antonio de Nebrija de Estudios sobre la Universidad, 2003.
- [10] Archivo Histórico Nacional, Sección Universidades 5345, expediente 9. Transcrita en ref. 5.
- [11] R. Torres, *Lecciones elementales de química general para uso de los alumnos de medicina, ciencias, farmacia, ingenieros industriales, agrónomos, de minas, etc., etc.* 3.ª edición, Librería de Sánchez, Madrid 1872. Advertencia, VI.

- [12] S. Bonilla, Discurso en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales*. Imprenta de L. Aguado 1898, Madrid, 7-110.
- [13] R. Becerro, Discurso en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales*. Imprenta de L. Aguado 1898, Madrid, 113-166.
- [14] S. Bonilla, Discurso Inaugural, Universidad de Valladolid. Imprenta de L. N. de Gaviria, Valladolid, 1887.
- [15] L. Cortejoso, *Académicos que fueron*, Institución Cultural Simancas, Valladolid, 1986, 497-504.
- [16] J. Muñoz, Discurso en *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias, Exactas, Físicas y Naturales*, Imprenta de L. Aguado 1901, Madrid, 8.
- [17] J. R. Bertomeu, “Pedagogía química y circulación de la ciencia: el sistema periódico de los elementos durante el siglo XIX”. En *Química: Historia, Filosofía y Educación*, editado por J. R. Bertomeu, W. Jensen, J. Seeman, M. House, J. V. Talanquer, J. A. Chamizo. Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, 2011.
- [18] E. Portela, A. Soler. “La Química Española del siglo XIX.” *Ayer*, 1992, 7, 85-107.
- [19] (a) S. Bonilla, “Ligero ensayo cualitativo de dos aguas minerales, conocidas con los nombres de Agua de los Arenales y Agua de Hasuaje, respectivamente, procedentes de las Islas Canarias”. *El Siglo Médico*, núm. 991, 22 de Diciembre de 1872, 804-807. (b) S. Bonilla. “Análisis de las aguas del manantial del establecimiento balneario de Puente-Viesgo”. Hijos de J. Pastor, Valladolid, 1880. (c) S. Bonilla, F. López, “Análisis de las Aguas de Puente Viesgo”. En *Anuario oficial estadístico de las aguas minerales de España*. Tomo II. Madrid, Establecimiento Fontanet. 1882, 216-217. (d) S. Bonilla, “Análisis químico cualitativo y cuantitativo del agua mineral de la fuente del Salugral (Hervás) provincia de Cáceres”. Imprenta de “El Museo”, Valladolid, 1886. (e) S. Bonilla, A. Lacort, “Investigación química en 1885 de las aguas de Fortuna, en la que encontraron algunos principios que no constan en el análisis practicado en 1870 por el Dr. Gargarza”. En “*Anuario oficial estadístico de las aguas minerales de España*”. Tomo III. Madrid, Establecimiento Fontanet. 1887, 200. (f) S. Bonilla, A. Lacort, “Análisis cualitativo de las aguas de Solares y cuantitativo de sus gases”. En *Anuario oficial estadístico de las aguas minerales de España*. Tomo IV. Madrid, M. Minuesa de los Ríos impresor. 1888, 201. (g) S. Bonilla, “Análisis químico y cuantitativo de las aguas de Puente Nansa (Santander)”. Imprenta de Eduardo Saenz, Valladolid, 1889.
- [20] S. Bonilla, A. Bellogín. *Investigación del aceite de semillas de algodón en los de olivas: exposición de algunos procedimientos prácticos para conseguirlo*. Imprenta y Librería Nacional y Extranjera de Hijos de Rodríguez, Valladolid, 1877.
- [21] S. Bonilla, A. Bellogín. *Toxicología del cloroformo: exposición de algunos datos prácticos que deben tenerse en cuenta en las investigaciones químico-legales de este anestésico*. Imprenta de Alejandro Gómez Fuentenebro, Madrid, 1879. Publicado también como “Toxicología del Cloroformo” en *La Gaceta de Sanidad Militar*. (99): 64-69; (100): 81-88.
- [22] S. Bonilla, *Análisis químico de una de las piedras meteóricas que cayeron en Madrid del bólido de 10 de Febrero de 1896*. Vda. e hijo de Tello, Madrid, 1896.



## XVI Simposio Jóvenes Investigadores Químicos

XVI SIMPOSIO DE INVESTIGADORES Jóvenes de la Real Sociedad Española de Química RSEQ-SIGMA ALDRICH (MERCK)

# El concurso escolar “Nuestra tabla periódica”: una iniciativa para fomentar la motivación de profesorado y alumnado en áreas STEAM

Gabriel Pinto Cañón

**Resumen:** Se exponen las características principales (desarrollo, bases, participación, evaluación...) del concurso escolar “Nuestra tabla periódica”, convocado por las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química para promover entre el alumnado español no universitario la relevancia de la tabla periódica y sus aplicaciones y contribución a la sociedad, en el contexto del Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos. El concurso contó con una amplia respuesta (200 propuestas de todas las comunidades autónomas), mostrando mucho entusiasmo por parte del alumnado y profesorado implicados, así como importantes dosis de creatividad.

**Palabras clave:** concursos escolares, educación STEAM, motivación, tabla periódica.

**Abstract:** This article sets out the main characteristics (development, bases, participation, evaluation ...) of the “Our periodic table” school competition, convened by the Spanish Royal Societies of Physics and Chemistry to promote the relevance of the periodic table and its applications and contribution to society, among non-University Spanish students, in the context of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements. The contest had a wide response (200 proposals from all the autonomous communities), showing a lot of enthusiasm by the students and teachers involved, as well as important doses of creativity.

**Keywords:** School competitions, STEAM education, motivation, periodic table.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se exponen las características principales (etapas, desarrollo, bases, participación, evaluación, repercusión...) del concurso escolar que, bajo el nombre de “Nuestra tabla periódica”, se desarrolló en España, entre febrero y junio de 2019, a instancias del Grupo Especializado en Didáctica e Historia de la Física y la Química, común a las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química (RSEF y RSEQ, respectivamente).

La participación fue excelente, tanto por el número de propuestas presentadas como por su calidad. La propia dinámica del concurso sirvió de catalizadora para desarrollar una jornada en la que se entregaron las distinciones y, además, se expusieron ponencias y se facilitó el debate, en torno a distintos aspectos relacionados con la didáctica y la divulgación de un tema tan apasionante como es la tabla periódica.

Los objetivos que se pretenden en este trabajo son:

- Presentar las características principales del concurso, como ejemplo que podría ser de interés para otros colegas e instituciones que se planteen desarrollar actividades similares entre alumnado y profesorado de las distintas etapas educativas.
- Difundir las propuestas presentadas, como ejemplo de creatividad y de distintas formas de abordar la adquisición de competencias básicas en ciencia y tecnología, conocidas también como STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*).
- Homenajear a las miles de personas implicadas en el concurso, principalmente alumnado y profesorado.
- Promover el conocimiento de aspectos asociados a la tabla periódica, en el contexto de su Año Internacional.



G. Pinto<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química, Reales Sociedades Españolas de Física y de Química, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

<sup>2</sup> E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 28006 Madrid.  
C-e: gabriel.pinto@upm.es

Recibido: 02/08/2019. Aceptado: 10/09/2019.

## CONVOCATORIA DE UN CONCURSO ESCOLAR SOBRE LA TABLA PERIÓDICA

En línea con la proclamación por la ONU de 2019 como Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, el Grupo Especializado indicado en la introducción, entre otras acciones,<sup>[1,2]</sup> convocó en febrero de 2019 este concurso escolar con el objetivo de promover, entre



el alumnado español no universitario, el conocimiento de la relevancia de la tabla periódica, así como sus aplicaciones y contribución a la sociedad. La iniciativa surgió de la profesora Almudena de la Fuente Fernández, vocal de la Junta de Gobierno del citado Grupo. En concreto, lo planteó en la reunión de la Junta de Gobierno celebrada el 14 de diciembre de 2018, cuando se analizaba la posibilidad de realizar distintas actividades de cara a la celebración del citado año internacional. En las siguientes semanas se fue elaborando la propuesta y, finalmente, se difundió en distintos medios.

Se indicó que podrían participar centros educativos no universitarios del territorio nacional, presentando un máximo de dos trabajos por centro. Las bases del concurso fueron:

1. Los estudiantes elaborarán, coordinados por uno o más docentes, una tabla periódica (TP) de gran formato que se exhibirá en algún espacio público del centro.
2. Los centros participantes enviarán una presentación realizada en PowerPoint con un máximo de 12 diapositivas donde figuren:
  - Título del proyecto y nombre del centro educativo.
  - Descripción (incluyendo las imágenes que se consideren pertinentes) del proyecto y su proceso de elaboración.
  - Al menos, una imagen completa de la TP confeccionada.
3. La presentación se enviará por correo electrónico, en formato PDF con alta resolución.
4. En el mensaje deberán figurar: título del trabajo, nombre y localidad del centro, nombres y apellidos de los docentes coordinadores del proyecto y datos (teléfono y dirección de correo electrónico) de uno de ellos. En el asunto del mensaje solo deberá constar: "Concurso Escolar: Nuestra Tabla Periódica". Se enviará acuse de recibo por correo electrónico.
5. Plazo de presentación: 20 de mayo a 20 de junio de 2019.
6. El jurado estará compuesto por expertos designados por la Junta de Gobierno del Grupo Especializado convocante que no estén relacionados con ningún centro participante.



Figura 1. Cartel anunciador del concurso escolar "Nuestra tabla periódica"

7. Como criterios de selección se tendrán en cuenta la calidad, la originalidad y la creatividad tanto del contenido del trabajo como de su presentación. También se valorarán la participación e implicación en el proyecto de alumnado de diversos niveles educativos y la interdisciplinariedad. La decisión del jurado será inapelable.
8. Se establecen 3 premios (Au, Ag y Cu), consistentes en diploma acreditativo y material escolar o tecnológico por valor de: 1000 € (Au), 500 € (Ag) y 300 € (Cu).
9. El fallo del jurado se publicará en el Boletín Informativo y en las redes sociales del Grupo Especializado.
10. La entidad organizadora se reserva el derecho de difusión y publicación de fotografías y partes de los trabajos presentados al concurso así como de su autoría, por lo que al remitirse, se entiende que son aptos para ello.

Se elaboró un cartel en dos formatos, uno breve (véase Figura 1) y otro más extenso al que se podía acceder siguiendo la dirección Web que se fue actualizando durante todo el período del concurso, y se pretende mantener.<sup>[3]</sup>

La información se difundió principalmente a través de distintos portales Web y redes sociales (Twitter, Facebook, LinkedIn...) de diversos organismos, como la RSEQ, la RSEF y el Foro Química y Sociedad. El efecto multiplicador fue inmediato, por la cantidad de interacciones y preguntas que se recibieron.

## DESARROLLO DEL CONCURSO ESCOLAR

El primer día en el que se admitía la participación (20 de mayo) se recibieron 6 propuestas y, en los días restantes de ese mes, otras 27. En la primera quincena de junio se recibieron 31, entre los días 16 y 18 de junio llegaron 57



Figura 2. Procedencia de los centros educativos de los trabajos presentados al concurso, por comunidades autónomas

y, durante los últimos dos días (19 y 20 de junio) hubo 79 envíos de trabajos (de ellos, incluso 6 en las últimas dos horas). Así, hubo en total 200 candidaturas, procedentes de todas las comunidades autónomas (véase Figura 2), e incluso una de Andorra. Hubo una adicional, recibida cinco días después, que no pudo admitirse.

En el anexo se recogen los trabajos remitidos, por orden cronológico de recepción, incluyéndose el título del proyecto, el nombre y localidad del centro educativo, y el profesorado que efectuó la coordinación. Con ello, se rinde homenaje a todos los participantes y, además, se facilita que contacten con ellos las personas interesadas en sus trabajos.

Aparte de sorprender la cantidad de propuestas que se enviaron cuando finalizaba el plazo (de 31 días posibles, se remitieron el 68,0% de los trabajos en los últimos cinco días), cabe señalar que prácticamente todas ellas se amoldaron a la normativa (formato, extensión, temática, etc.) y las pocas que no lo hicieron, lo subsanaron casi inmediatamente. Las direcciones de correo electrónico que se indicaban no siempre eran correctas o admitían correos para interactuar. A pesar de permitirse varios coordinadores en cada proyecto, se aprecia que el profesorado es algo reactivo a indicar un nombre concreto para facilitar la comunicación. En todo caso, aparte de este tipo de formalidades, todos los trabajos destacaron por su calidad y la ilusión que se traslucía en sus presentaciones. Esto hizo difícil la tarea del jurado, así como el hecho de que hubiera trabajos realizados por estudiantes de muy diferente edad o la dificultad de discernir entre la labor desarrollada por parte del profesorado o del alumnado.

Dado que se anunció que la entrega de premios se realizaría en Madrid, el 5 de julio, en el contexto de la celebración de una jornada sobre el tema, como se expone en párrafos posteriores, la labor del jurado estuvo sometida a un tiempo muy limitado, pues había que anunciar el resultado alrededor del 27 de junio, para facilitar a los premiados la preparación sus viajes.

El jurado estuvo integrado por 11 expertos, siguiendo el punto 6 de la convocatoria. En concreto, había 9 profesores de distintas etapas educativas (Manuela Martín Sánchez, José Antonio Martínez Pons, Marisa Prolongo Sarria, Juan Antonio Llorens Molina, Francisco Sotres Díaz, Inés Pellón González, Gabriel Pinto Cañón, que ejerció de presidente, María Araceli Calvo Pascual y María Victoria Alcázar Montero), un experto en diseño gráfico para la ciencia y miembro del colectivo del personal de administración y servicios de universidad (Víctor Manuel Díaz Lorente) y un alumno universitario (Javier de la Vega Bautista).

La valoración de los trabajos se realizó en dos fases. En la inicial, los primeros 7 miembros del jurado nombrados en el párrafo anterior seleccionaron (en 4 días, si bien se podía acceder a todos los presentados a medida que se recibían) entre 10 y 15 trabajos que destacaba cada uno. Posteriormente, en 2 días, todos los miembros del jurado evaluaron los 15 trabajos que habían sido seleccionados previamente por 3 o más miembros del jurado. En esta fase final, cada miembro del jurado debía otorgar 12, 8, 6, 4, 3,



Figura 3. Primer premio (Au): Tabla periódica 3D, del IES María Guerrero de Collado Villalba (Madrid)

2 y 1 puntos, al primero, segundo, etc., respectivamente, a los trabajos, según su valoración global. Cabe destacar que, para esta segunda fase, solo el presidente conocía el número de veces que había sido seleccionado cada uno de los trabajos; aun así, el que se seleccionó más veces (5) en la fase inicial fue el que obtuvo finalmente la mayor puntuación.

Tras sumar los puntos obtenidos, dado que hubo dos empates en el segundo y tercer puesto, se aceptó otorgarlos de forma *ex aequo*, lo que elevó el gasto en premios a 2600 €, más 900 € para ayudas de desplazamiento de los premiados. Además, dado que solo un 7,5% de los trabajos pasaron a la fase final, se decidió otorgar 10 menciones de honor, para los que se clasificaron y no recibieron uno de los tres primeros premios, aunque no se había planteado en las bases del concurso.

Para agradecer el trabajo realizado, se remitió un diploma acreditativo a todos los participantes.

En las Figuras 3 a 7 se muestran imágenes de los trabajos que recibieron los tres primeros premios y en las Figuras 8 a 17, de los que se destacaron con mención de honor.

En las reuniones celebradas por el jurado, tanto de forma virtual como presencial, se puso de manifiesto la gran calidad de los trabajos presentados, como ya se ha indicado. Se apreció que la tabla periódica es, *per se*, un tema atractivo, tanto para el profesorado como para el alumnado.



Figura 4. Segundo premio (Ag) *ex aequo*: Una catedral periódica construida elemento a elemento, del Colegio Virgen de Atocha - Fundación Educativa Santo Domingo de Madrid

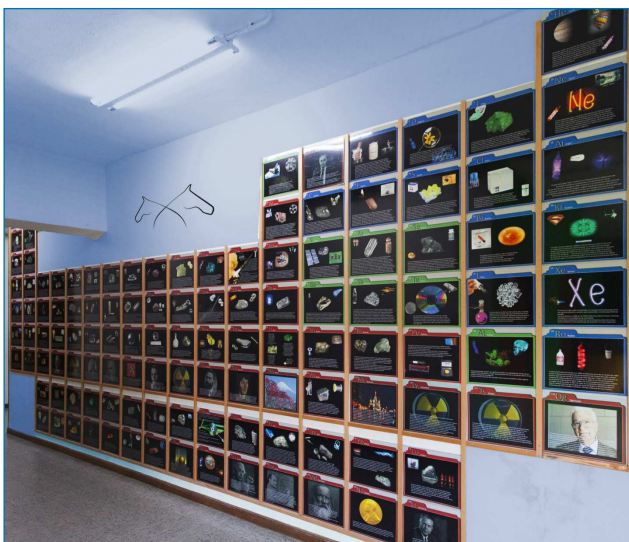


Figura 5. Segundo premio (Ag) *ex aequo*: Tabla periódica gigante, del IES Valle del Saja de Cabezón de la Sal (Cantabria)



Figura 6. Tercer premio (Cu) *ex aequo*: Tabla de tablas; somos atómicos, del IES de Massamagrell (Valencia)



Figura 7. Tercer premio (Cu) *ex aequo*: Te doy mis ojos, del Colegio Internado Sagrada Familia de Valladolid



Figura 8. Dale la vuelta a la tabla, del IES Floridablanca de Murcia



Figura 9. ¡Cumpleaños feliz! 150 años de la tabla periódica de Mendeleiev, del IES Carpetania de Yepes (Toledo)

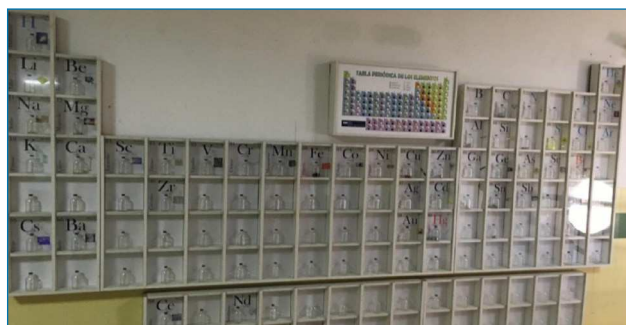


Figura 10. Nuestra tabla periódica. Tridimensional, interactiva, multilingüe e inclusiva, del IES Diego Velázquez de Torrelozanes (Madrid)



Figura 11. La tabla periódica en realidad aumentada, del Colegio La Salle - San Francisco de Sanlúcar de Barrameda (Cádiz)



Figura 12. 118 Mensajes en una botella. Historias de los elementos químicos, del Agora International School Andorra de La Massana (Principado de Andorra)



Figura 13. En carnaval el disfraz es elemental, del IES Mar Mediterráneo de Aguadulce (Almería)



Figura 16. Nuestra tabla periódica interactiva, del IES Virgen de Gracia de Oliva de la Frontera (Badajoz)



Figura 14. QRElements, del Colegio Internacional G. Nicoli de Madrid



Figura 15. Elementos al cubo, del CEIP Reyes Católicos de Santa Fe (Granada)

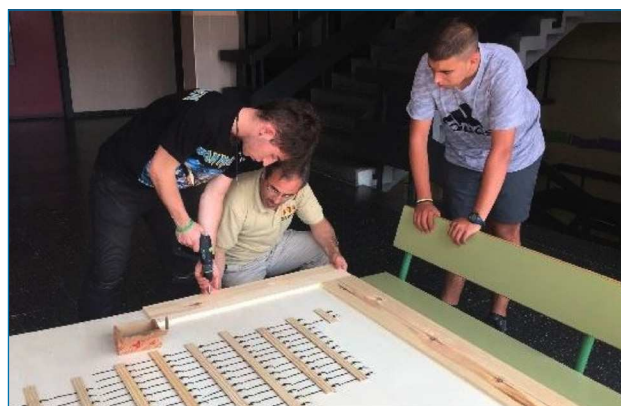


Figura 17. 150 Aniversario de la publicación de la tabla periódica de los elementos, del IES Rey Don García de Nájera (La Rioja)

Otro tema interesante es que muchos de los trabajos se realizaron no solo como tarea dentro de la asignatura de Física y Química, sino con implicación de otras, como Tecnología, Historia, Lengua y Literatura, Inglés, Griego, Arte, etc. Así, se abordaron en muchas ocasiones los trabajos con una perspectiva STEAM, de tan vigente actualidad educativa.

Cabe destacar que, en muchas propuestas, se involucraron también tanto personal de administración y servicios de los centros como madres y padres de alumnos.

En cuanto a aspecto de mejora, y de cara también a una posible reflexión sobre muchas de las actividades que se están desarrollando durante el Año Internacional de la Tabla Periódica, es que a veces se concentra casi todo el esfuerzo en la parte más lúdica o artística de la cuestión abordada, sin quedar claro si el alumnado profundiza en aspectos como qué significa exactamente la periodicidad en las propiedades de los elementos, su explicación y la evolución histórica de la tabla periódica. Obviamente, acometer estas cuestiones requeriría una mayor extensión y profundidad, así como considerar las etapas educativas implicadas.

## JORNADA FORMATIVA PARA EL ACTO DE ENTREGA DE LOS PREMIOS

Para entregar los premios (diplomas, asignación económica y libros educativos) y favorecer el intercambio de impresiones e ideas, se decidió, cuando el concurso ya estaba en marcha, preparar un evento que cumpliera diversos requisitos. Así, por motivos logísticos, se decidió que fuera en Madrid, en un día solo y que, a su vez, fuera no lectivo y antes de las vacaciones de verano. Para ello se eligió el 5 de julio, como ya se ha indicado. El título elegido para la jornada fue: “La tabla periódica: una oportunidad para la didáctica y la divulgación de la ciencia” (véase Figura 18).

Con objeto, a su vez, de que se expusieran breves ponencias sobre el tema, se solicitaron voluntarios entre los miembros del Grupo Especializado en Didáctica e Historia de la Física y la Química, aparte de cursar invitaciones a otros ponentes, como Inés Pellón (presidenta del Grupo Especializado en Historia de la Ciencia de la RSEQ), Fer-

nando de Prada (miembro de la RSEF) y Pascual Lahuerta (profesor de la Universidad de Valencia). Asimismo, para la inauguración y la entrega de premios se contó con la colaboración de Francisco J. Jiménez Leube (Vicerrector de la Universidad Politécnica de Madrid, UPM), Óscar García Suárez (Director del centro donde se realizó el acto, la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la UPM) y Sonsoles Martín Santamaría (Secretaria General de la RSEQ).

Asistieron a la jornada cerca de dos centenares de personas, principalmente profesorado de las distintas etapas educativas, y se impartieron las siguientes ponencias: Introducción al Año Internacional de la Tabla Periódica (Gabriel Pinto), El nombre del único elemento químico aislado en España: ¿Tungsteno o wolframio? (Inés Pellón), Buscando elementos químicos en el mundo del ferrocarril (José A. Martínez Pons), Curiosidades de un elemento descubierto por casualidad (Fernando Ignacio de Prada), Bohr y la Tabla Periódica (Jesús M. Arsuaga), Desarrollo y aplicación de un *Escape Room* sobre la tabla periódica (Jorge Ramírez), El mercurio y la contribución española a la tabla periódica (Ángela Martín Serrano), Mendeléiev en mi instituto (Marisa Prolongo), ¿Qué sé sobre la tabla periódica y cómo puedo aprender más? Experiencia con alumnado de Secundaria (Jorge Cebrián y M<sup>a</sup>. Araceli Calvo Pascual), La tabla periódica: un puzzle educativo (Pascual Lahuerta), ¿Cómo se evalúan los conocimientos de la tabla periódica en las pruebas de acceso a la Universidad? (Almudena de la Fuente) y Reflexiones educativas en torno a la evolución histórica de la tabla periódica (Juan Antonio Llorens). Durante el debate, se plantearon diversas inquietudes y propuestas sobre el proceso de enseñanza y aprendizaje de la tabla periódica en particular, y de las ciencias y materias STEAM en general.

Más detalles, con fotografías, presentaciones de las ponencias presentadas, etc., se encuentran en la referencia 3.

## CONCLUSIONES

Tanto el concurso escolar expuesto en este artículo como la jornada formativa que se celebró para entregar los premios, supusieron un éxito, según se desprende de los comentarios recibidos por todos los colectivos implicados. Gracias a esta iniciativa, se promovieron, entre profesorado y alumnado no universitario, de distintas etapas educativas, aspectos como la formación en ámbitos STEAM, la creatividad, el trabajo en equipo, la interdisciplinariedad, y otros, en un ambiente lúdico. Todo ello ha supuesto una iniciativa, en el contexto del Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, que, vista la repercusión, se intentará repetir, con otros temas, en años posteriores.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Almudena de la Fuente, inspiradora del concurso, de los miembros del jurado (citados en el texto) y de todas las demás personas involucradas

Figura 18. Cartel anunciador de la jornada formativa durante la que se hizo entrega de los premios del concurso escolar “Nuestra tabla periódica”

directamente en esta actividad: del orden de 500 profesores, más de 12.000 alumnos de diferentes etapas educativas, personal de administración de los centros, y padres y madres de alumnos. También se agradece la ayuda recibida de las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química, el Foro Química y Sociedad, la Universidad Politécnica de Madrid, la E.T.S. de Ingenieros Industriales de dicha Universidad, y la Fundación Obra Social “La Caixa”, a través del proyecto divulgativo “La tabla periódica: un icono de la ciencia que merece conocerse”.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Pinto, M. Martín, M. A. Calvo Pascual, A. de la Fuente, Año Internacional de la Tabla Periódica (2019): Una Oportunidad para Abordar Contextos de Didáctica e Historia de la Física y la Química, *Rev. Esp. Fis.* 2019, 33(1), 10-18.
- [2] G. Pinto, M. Prolongo, Algunas Aportaciones al Año Internacional de la Tabla Periódica desde España, *Educació Química, EduQ*, en prensa.
- [3] Web del concurso escolar “Nuestra tabla periódica”. <https://bit.ly/2FTjK5d> (visitada el 2/8/2019).

## ANEXO: TRABAJOS PRESENTADOS AL CONCURSO ESCOLAR

Se recogen, por orden cronológico de envío, los trabajos presentados al concurso “Nuestra tabla periódica”. Aparte del título, se incluyen el centro educativo y su localidad, así como el nombre del profesorado que realizó su coordinación.

- <sup>1</sup> Te vamos a dar la lata con la Tabla Periódica. IES Sierra de Mijas, Mijas (Málaga). Rafael Castillejo Muñoz, Celia Rodríguez Gil, Eva Montañez Montañez e Inés Sánchez Hernández.
- <sup>2</sup> Una catedral periódica construida elemento a elemento. Colegio Virgen de Atocha - Fundación Educativa Santo Domingo, Madrid. Antonio José Sánchez Arroyo y María Trillo Alcalá.
- <sup>3</sup> Un mosaico muy elemental. IES Pablo Picasso, Pinto (Madrid). Raquel Rodríguez Barrio, Irune Acarreta Bea, Cristina Asenjo Berzal, Silvia Bayón García, Susana Beato Ruipérez, José Manuel de Pedro Bonilla, María del Puy Martín González, Rosa Ana Mendoza Ruiz, Rebeca Muñoz Rodríguez, Lourdes Sánchez-Aguilera Chocano, Gema Varela González y María Antonia Vivas Alonso.
- <sup>4</sup> La tabla periódica. IES Profesor Máximo Trueba, Boadilla del Monte (Madrid). Víctor Omaechevarría.
- <sup>5</sup> IYPT-2019. IES Iturruma, Pamplona (Navarra). Izaskun Jorajuria Elizondo.
- <sup>6</sup> Conoce la tabla periódica. IES Profesor Ángel Ysern, Navalcarnero (Madrid). Yolanda del Real Ollero, Alfonsa Canas Delgado, Rosa Marina de Tena Cabanillas y Lourdes Santos Santos.
- <sup>7</sup> Tabla periódica 2º ESO (IYPT). Colegio Santa Teresa (FET) de Calahorra (La Rioja). Sara Pardo Pejenaute y Tatiana Gurra Ruiz.
- <sup>8</sup> 2019 Año internacional de la tabla periódica. ¡Bingo! IES Bezmiñana, Rincón de la Victoria (Málaga). Ana María Martínez Martín, María del Valle Carrión del Real y Rafael Wilczynski Jiménez.

- <sup>9</sup> Elementos para nuestra existencia. Colegio Episcopal O. M. Ekumene, Almansa (Albacete). Adoración Alcocel Cuenca y Carlos Coloma Fernández-Reyes.
- <sup>10</sup> ¡Vaya elementos hay en Montealbir! Colegio Montealbir, El Casar (Guadalajara). Cristina de Blas Fresno.
- <sup>11</sup> Jeroelementaria. IES Antoni Llidó, Jávea (Alicante). María del Rosario Pons Pérez y Elisa Torres Pastor.
- <sup>12</sup> Tabla periódica mural. IES Diego de Siolé, Albacete. María Concepción Corredera Fraile y Rosa María Palacios Salto.
- <sup>13</sup> Tabla periódica de los elementos interactiva. I. P. Cristo Rey, Valladolid. Ana Ollero Serrano y José Manuel González Mateos.
- <sup>14</sup> Los elementos químicos de la Vega del Esla. CRA Vega del Esla, Algadefe y Toral de los Guzmanes (León). Hugo Medina Melcón, Altamira García Casado, Esperanza García Tejerina, Lorena Alonso Vega, Leticia García Castro, Raquel Pérez Martínez, Pilar Rodríguez Suárez y Ana Victoria Castro Miguélez.
- <sup>15</sup> *The patchwork periodic table*. La tabla periódica en *patchwork*. Escola Pia de Sitges (Barcelona). Josep Corominas, Anna Barrachina y Silvia Pascual.
- <sup>16</sup> Somos la tabla periódica. Colegio Corazón de María, Gijón. Ana Yolanda Álvarez González, Laura Fernández Alonso, Alberto Estrada Fidalgo, José Manuel González Martínez y Pablo Díaz García.
- <sup>17</sup> Todos diferentes, todos iguales. IES La Serna, Fuenlabrada (Madrid). Jesús Rodríguez Arroyo.
- <sup>18</sup> La etimología de la tabla periódica. IES Carreño-Miranda, Avilés (Asturias). Francisco José Suárez Álvarez.
- <sup>19</sup> Esencia de Talavera. Colegio Cristóbal Colón, Talavera de la Reina (Toledo). Miguel Gutiérrez Díaz.
- <sup>20</sup> *Bizaraingo Taula Periodikoa* (La tabla periódica de Bizarain). IES Bizarain, Errenteria (Gipuzkoa). Jaione Eizaguirre Gogenola, Ana Cardeñoso Antolín, Leire Mazizior Egilegor, Aitor Sarasketa Osa, Miren Larrañaga Arrizabalaga, Idoia Iburguren Ganborena, Marina Aranzabal Losa y Xebe García Mendive.
- <sup>21</sup> Nuestros aniversarios. Colegio Menor Nuestra Señora de Loreto, Madrid. Alfonso Blanco Martínez, Mariela Rodríguez, Ana García Romeral y Claudia Huedo.
- <sup>22</sup> Cajas periódicas ISAB 19. IES de San Antonio de Benagéber (Valencia). José Miguel Rubio Andrés, María José Arnau Sabatés y Cristina Pertegás Giménez.
- <sup>23</sup> ¿Qué sabes de los elementos químicos? IES El Burgo-Ignacio Echeverría, Las Rozas (Madrid). Carmen Méndez Martín, Marta M. Morán Bayón, Clara Hidalgo Lozano y Estela González Gómez.
- <sup>24</sup> Tabla periódica: de Mendeleiev a nuestros días. IES Antonio Gala, Alhaurín El Grande (Málaga). María Luisa Merino Córdoba.
- <sup>25</sup> La tabla del Padilla. IES Juan de Padilla, Torrijos (Toledo). Antonio Berjano García.
- <sup>26</sup> Nuestras tablas periódicas, 150 aniversario. IES Juana de Castilla, Madrid. Esperanza Hospital Henche.
- <sup>27</sup> 2019, *International Year of the Periodic Table*. Colegio Inmaculada Concepción, Madrid. Mónica de Hoyos Siero y Alberto Alonso Acevedo.
- <sup>28</sup> Dale la vuelta a la tabla. IES Floridablanca, Murcia. Yolanda Ramírez Sánchez, Asunción García Fernández y Rosario Solano Lucas.
- <sup>29</sup> ¡Cumpleaños feliz! 150 años de la tabla periódica de Mendeleiev. IES Carpetania, Yepes (Toledo). Paloma Sepúlveda Vizcaíno, Ca-

tia González Amaya, Isabel Vizcaíno Escobar, Susana del Reino Querencia y Carmen García Ruíz.

<sup>30</sup> La tabla periódica luminosa del IES Sierra Sta. Bárbara. IES Sierra de Santa Bárbara, Plasencia (Cáceres). Eduardo Moraga Egido y María Jesús Manzanares Serrano.

<sup>31</sup> Del hidrógeno al oganesón. 150 aniversario de la tabla periódica. IES Ezequiel González, Segovia. Esther Posadas Olmos, María Fuencisla Álvarez y María García Turiel.

<sup>32</sup> ¡Elemental, mi querido Mendeleiev! IES "Alcántara", Alcántarilla (Murcia). José María Olmos Nicolás, Josefá Rubio Cascales, Milagros Jiménez Dato y Rafaela García López.

<sup>33</sup> Tabla periódica con balizas de orientación. IES Beatriz Galindo, Madrid. Marta Llorens Costa.

<sup>34</sup> Nuestra tabla periódica. Colegio San José Sagrados Corazones, Sevilla. Amalia Segura Irala y Angélica Vidal González.

<sup>35</sup> Tabla de los elementos químicos. Colegio San José - Hijas de María Auxiliadora, Madrid. María Luisa Cerrada.

<sup>36</sup> 150 Aniversario de la tabla periódica. IES Ramón y Cajal, Murcia. Bruno Martíz Liza y Aurora Alemán Sánchez.

<sup>37</sup> Tabla periódica. Colegio María Reina de Orcasur, Madrid. David Perezagua e Isabel Arquero.

<sup>38</sup> Concurso escolar "Nuestra tabla periódica I". IES Salvador Rueda, Málaga. José Antonio Barea Aranda, José Carlos Conde Linares y Joaquín Recio.

<sup>39</sup> Concurso escolar "Nuestra tabla periódica II". IES Salvador Rueda, Málaga. José Antonio Barea Aranda, José Carlos Conde Linares y Joaquín Recio

<sup>40</sup> La escalera periódica. Colegio Salesianos Atocha, Madrid. Covadonga Correas López.

<sup>41</sup> 150 Aniversario de la tabla periódica. IES Santa Cruz de Castañeda, Villabañez (Cantabria). María José Heras Varela.

<sup>42</sup> Tabla periódica de los elementos. IES Luis de Góngora, Torrejón de Ardoz (Madrid). María del Rosario Ramos Pedregosa, Raquel Valera Benito, Marta Barco Corzo y Segismundo Pelaez Lirola.

<sup>43</sup> La tabla periódica de las mujeres científicas. IES Puerta del Mar, Estepona (Málaga). Pilar Sánchez Fernández, Susana Serradilla Buján, Jesús García Vidal y Javier Cabrera López.

<sup>44</sup> Tabla periódica para compartir. IES Comendador Juan de Távora, Puertollano (Ciudad Real). Guadalupe Talavera Trinidad.

<sup>45</sup> La Tabla Periódica: Coleccionando elementos. IES Luces, Colunga (Asturias). Francisco J. Ruiz Urraca.

<sup>46</sup> 118 Mensajes en una botella. Historias de los elementos químicos. *Agora International School Andorra*, La Massana (Principado de Andorra). Carlos Moreno Borralló y Esther Márquez Fernández.

<sup>47</sup> Gracias a ellos. CEPA Lucas Aguirre, Cuenca. Nuria Yebra Llandres.

<sup>48</sup> Nuestra tabla periódica. Colegio San Francisco de Asís, Mijas (Málaga). Juan Fernández Maqueda.

<sup>49</sup> Los elementos químicos de la tabla periódica. Colexio Sagrada Familia, Cangas (Pontevedra). Rebeca Costas Refojos.

<sup>50</sup> Tabla periódica interactiva. IES Honori García, La Vall d'Uixó (Castellón). Loli Lozano Garnés.

<sup>51</sup> Aprendemos con Mendeleiev y Meyer. IES La Serna, Fuenlabrada (Madrid). Purificación Zamorano Curiel y Jesús Rodríguez Arroyo.

<sup>52</sup> ¿Qué esconde la tabla periódica? Colegio Virgen del Carmen, Toledo. Sara Cabrera Benito.

<sup>53</sup> *As madiñas dos elementos* (Las madiñas de los elementos). CPI Plurilingüe Fonte Díaz, Touro (A Coruña). María del Carmen Fernández Bouza y Daniel Pereiro López.

<sup>54</sup> Tabla periódica a gran escala. IES Romano García, Lorquí (Murcia). Rosa María López Nicolás y Manuel Maruenda Pagán.

<sup>55</sup> Mural cerámico de la tabla periódica. IES Clot del Moro, Sagunto (Valencia). Juana Puente Rivera, Antonia Talavera Castellanos, Rosa Montes Valero y José María Pérez Blasco.

<sup>56</sup> Más allá de los elementos. *Edelweiss School*, Godella (Valencia). Paola Estellés Compañ y Patricia Coll Pérez.

<sup>57</sup> La Tabla de la vida. EPPP Sagrada Familia, Alcalá la Real (Jaén). Gregorio Navío Real, M. Antonia Sánchez, Francisco Albendín y Marina Valiente.

<sup>58</sup> Concurso escolar "Nuestra tabla periódica". IES Cañada Real, Valmojado (Toledo). María del Camino Castillo Rodríguez.

<sup>59</sup> TP 3.0. Tabla periódica yríptica: Etimológica + Periódica + Mitológica. IES Rafael Frühbeck de Burgos, Leganés (Madrid). María Felisa Domínguez Rodríguez, Olga Alcalde Rodríguez y Rosario Corriendo Santalla.

<sup>60</sup> La tabla periódica, Ilusiónate, investiga y colabora. Colegio Nuestra Señora de los Ángeles, Madrid. Almudena Canorea Martínez, Pedro Montanet Casilda, Almudena de la Fuente Fernández, Marta Estebaranz Marfil, María Jesús Gutiérrez Cobo, María Yuste Serrano y Guillermo Ramírez Álvarez.

<sup>61</sup> Tabla periódica de los elementos. Colegio Virgen de la Soledad, Arganda del Rey (Madrid). José García Sáez.

<sup>62</sup> Los elementos químicos y el cuerpo humano. Colegio Compañía de María, Santiago de Compostela (A Coruña). José Luís García Menéndez.

<sup>63</sup> Estudiando Ciencia, Tecnología, Arte y Clásicas con la Tabla Periódica. IES Plurilingüe Pintor Colmeiro, Silleda (Pontevedra). Xesús Fernández Sulleiro, Xosé Fuentes, Nuria Rodríguez, Fermín Cambeiro, Ángel Manuel Maciñeiras, Noela Vallejo y Belén González Bernardo Insua.

<sup>64</sup> Elemental, querido mundo. CC La Milagrosa, Madrid. Ana Rosa Martín Hernández, Francisco José Nicolás Martín y María Ángeles Sánchez Agramonte.

<sup>65</sup> Proyecto tabla periódica. Divina Pastora, Madrid. María del Carmen González Osorno, Inmaculada Rodríguez Serrano, María Isabel Rodríguez Serrano, María Teresa Huélamo Oliva, María Antonia Muñoz Areales y Ana Ortiz Jiménez

<sup>66</sup> La tabla periódica en el día a día. *Trinity College*, Boadilla del Monte (Madrid). Carmen Fariña Fuentes.

<sup>67</sup> 2019, Año Internacional de la Tabla Periódica. IES Lluís Simarro Lacabra, Xátiva (Valencia). Otilia Val Castillo.

<sup>68</sup> La tabla periódica: una obra de arte colectiva. Colegio Santo Domingo Savio, Madrid. Benigno Agustín Palacios Plaza.

<sup>69</sup> Nuestra tabla periódica. Colegio San Francisco y Santo Domingo, Vilamarxant (Valencia). Rosana Sanchis Rubio.

<sup>70</sup> Un IES con 100cia. IES Gandhi, Orcera (Jaén). Marta Martín Aceituno, Miguel García Tornero y Miguel Ruiz Heredia.

<sup>71</sup> 118 ladrillos para construir el Universo. IES Ciudad de Haro, Haro (La Rioja). Rebeca Escudero de la Hera y Ainara Soriano Pina.

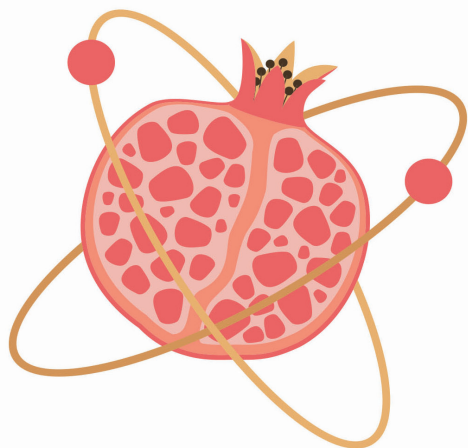
<sup>72</sup> Tabla periódica interactiva. IES Satafi, Getafe (Madrid). Amaya García Barahona, Inmaculada Alonso Casarrubios, José Antonio Collado Muñoz y Paloma Domínguez Rello.



- <sup>73</sup> Audio tabla periódica cotidiana. IES Ausiàs March, Gandía (Valencia). Míriam Esparza García, Francisco Savall Alemany, Susana Prats Català y Amparo Figueres Romero.
- <sup>74</sup> La tabla del Lorca. IES Federico García Lorca, Las Matas, Las Rozas (Madrid). Ricardo Callejo y José del Álamo.
- <sup>75</sup> 1869-2019: 150 años de trabajo y descubrimientos en equipo. IES Cervantes, Madrid. María del Pilar Godoy Caballero, Isidro Álvarez Mayor, Delia Fernández Torre y Ana Fernández Vijande.
- <sup>76</sup> 150 años / 75 elementos Litoral. IES Litoral, Málaga. Sonia Ruiz del Castillo y Luis Palacios Carrillo.
- <sup>77</sup> Nuestra tabla periódica. Colegio Estudio, Madrid. Carmen Redondo González.
- <sup>78</sup> Dame un elemento y te doy un dibujo. IES de Sahagún (León). María Jesús Álvarez Bajo.
- <sup>79</sup> Nuestra tabla periódica: Proyecto CRISTAL-INS. INS La Serra, Mollerussa (Lleida). Montserrat Solé Montoro.
- <sup>80</sup> La Tabla QRIÓDICA. INS La Serra, Mollerussa (Lleida). Montserrat Solé Montoro, María José Santiago Planes y Silvia Arcas Baena.
- <sup>81</sup> En carnaval el disfraz es elemental. IES Mar Mediterráneo, Aguadulce (Almería). Ángel Rodríguez Martínez.
- <sup>82</sup> Nuestra multi-tabla periódica. Colegio San José, Ciudad Real. María del Prado García Cáceres y María Fernández de Mera.
- <sup>83</sup> Las rimas y leyendas de las ciencias. Colegio El Valle Sanchinarro, Madrid. José Ángel Hidalgo Salinero.
- <sup>84</sup> Tabla periódica reciclada. IES Jaume I, Burriana (Castellón). María Elisa Capella Peiró e Inma Herreros Parra.
- <sup>85</sup> Concurso escolar nuestra tabla periódica I. Colegio Asunción Cuestablaca, Madrid. Yolanda Guntiñas López y María del Carmen López Bravo.
- <sup>86</sup> Concurso escolar nuestra tabla periódica II. Colegio Asunción Cuestablaca, Madrid. Yolanda Guntiñas López y María del Carmen López Bravo.
- <sup>87</sup> Tabcient 150. IES Miguel Herrero, Torrelavega (Cantabria). Luis Francisco Felices Crespo.
- <sup>88</sup> Tabla periódica literaria. Colegio Puertoblanco, Algeciras (Cádiz). Cristina Campos Aguilar, Carmen Pons-Fuster Pons, Raquel Castro Linares y Carmen María Moncada Lacerca.
- <sup>89</sup> Elementos vivos. IES Satafi, Getafe (Madrid). Inmaculada Alonso Casarrubios, Amaya García Barahona, José Antonio Collado Muñoz y Paloma Domínguez Rello.
- <sup>90</sup> Mural de la tabla periódica. IES Juan Padilla, Illescas (Toledo). María Teresa Rodríguez Álvarez y Javier Gallego Ramírez.
- <sup>91</sup> Construcción de un Sistema Periódico tridimensional. IES Candavera, Candeleda (Ávila). Francisco Javier García Mateos y Noemí del Río López.
- <sup>92</sup> Tabla periódica. IES Sebastián Fernández, Cartaya (Huelva). Pilar González Durán e Isabel Terrón Bueno.
- <sup>93</sup> Tabla periódica del Cid. Colegio El Cid, Madrid. Rubén García López y Ana Pérez Franco.
- <sup>94</sup> La vidriera periódica. IES Secundaria Ramón Muntaner, Xirivella (Valencia). Juan Luis Carrión Domínguez, Esperanza Pérez Castelló, Juan Sancho Sánchez, Marian García Luelmo, Javier Julián Fernández y Ana Martínez Reyes.
- <sup>95</sup> La tabla periódica. IES Antonio Domínguez Ortiz, Madrid. Sara Olmedo Franco y Miriam Perales García.
- <sup>96</sup> *Recycled periodic table*. CEIPS Isabel la Católica, Navas del Rey (Madrid). Carlos Pérez González y David Fernández Jiménez.
- <sup>97</sup> *QRElements*. Colegio Internacional G. Nicoli, Madrid. José Frutos Esteban, César Poyatos Dorado e Isabel Serrano González.
- <sup>98</sup> La tabla periódica: "Las elementas invisibilizadas". IES José Sarago, Marinaleda (Sevilla). María del Pilar Ruiz Lucena, Antonio Martín Vázquez y Ana Belén Coín Megías.
- <sup>99</sup> Tabla periódica del melón. IES Marmaria, Membrilla (Ciudad Real). Juan Carlos Martínez López y Loren Díaz Aranda.
- <sup>100</sup> Tabla periódica. IES Fernando de Rojas, Salamanca. María Jesús Cascón Sanz, Juan José Navarro Sánchez, Cristina Ruano Rodríguez y Jesús María Prieto de Paula.
- <sup>101</sup> Tabla periódica. IES Universidad Laboral, Albacete. Joaquín Gómez Claramunt, María del Carmen Manjabacas Tendero y Natividad Mateo Martín.
- <sup>102</sup> Aprendemos jugando. IES Calvià, Santa Ponça (Mallorca). Juan José González de Prada, Pilar Carbonell Vidal, Alberto del Canto Torres, Laila Al Hasani Maturano y Nerea Varela Rodríguez.
- <sup>103</sup> Los elementos del Ramón. IES Ramón y Cajal, Madrid. Patricia de Cos Cuesta, Carlos García Merino, María Isabel Collar Delgado y Begoña de Andrés Gómez de Barreda.
- <sup>104</sup> La Tabla Periódica en Realidad Aumentada. La Salle - San Francisco, Sanlúcar de Barrameda (Cádiz). María Magdalena García Romero, María Antonia Camacho Román y Antonio Jesús Granada Cala.
- <sup>105</sup> Tabla periódica en azulejos. Colegio Hermanos Maristas "La Inmaculada", Granada. Daniel Partal García, Mercedes Cortés Darías, Amparo Márquez Martos, Ignacio Rodríguez Garzón y Manuel Avilés García.
- <sup>106</sup> Tabla periódica *heavy metal* INDIMA. Colegio Institución del Divino Maestro, Madrid. Alberto Canora Lebrato y María Ángeles Uclés Vílchez.
- <sup>107</sup> Los "followers" de Mendeléyev. IES Juan del Enzina, León. Roberto Rubio Lucio y Enrique Santiago Viñas.
- <sup>108</sup> La catedral de los elementos. 150 aniversario de la tabla periódica. IES José María Pereda, Santander. María José Vallés González, David Ayala Pérez, Dolores Caso Martínez, Rocío Sánchez Felipe, Pablo Negrete Rodrigo y Santiago Narváez Torre.
- <sup>109</sup> Entablillados: una actividad interdepartamental. IES Mar Mediterráneo, Aguadulce (Almería). Ángel Rodríguez Martínez.
- <sup>110</sup> Las 18 columnas del Universo, IES Las Lagunas, Rivas-Vaciamadrid (Madrid). Fernando Prada Pérez de Azpeitia.
- <sup>111</sup> Jugamos con Mendeleiev. Colegio San José de Calasanz, Valencia. Silvia Cotolí Suárez y Amparo González García.
- <sup>112</sup> La utilidad de los elementos químicos. IES Pablo Ruiz Picasso, Almadén (Ciudad Real). Ana Isabel Tejero Aguilera y Alba Torres Pérez.
- <sup>113</sup> Descubriendo la tabla periódica: de 2º ESO a 1º Bachillerato. IES Barrio Loranca, Fuenlabrada (Madrid). Carolina Crespo Migoia.
- <sup>114</sup> La tabla periódica más viva. IES Lázaro Carreter, Alcalá de Henares (Madrid). Yolanda Giménez y Patricia Pajares.
- <sup>115</sup> Nuestra tabla periódica. Colegio Bériz, Las Rozas (Madrid). Paloma Mingo Román, Adela Rodríguez Marticorena y Beatriz Monar Rubio.
- <sup>116</sup> Escalera a la química. Colegio Fernando de Rojas, Talavera de la Reina (Toledo). Fernando Romero García.
- <sup>117</sup> Tabla periódica fosforescente. *Secció de l'IES Sant Vicent a Agost*, Agost (Alicante). Cristina Blázquez Lozano.

- 118 Concienciarte: Una tabla periódica dinámica. Colegio Herma, Murcia. Francisco José Serrano García.
- 119 Elementos enlatados. Maristas Santa María del Prado, Talavera de la Reina (Toledo). Susana Alvarado Díaz, María Piedad Fernández Álvarez, Eva del Olmo Becerra, María Ángeles Canora Fernández y David Santillana Alía.
- 120 Nuestra tabla periódica. IES Las Lagunas, Mijas (Málaga). María Adela Camacho, Laureano Romero Montero, Estrella María Blanco Viana, Mercedes García del Álamo y Rosa María Carrera Rodríguez.
- 121 La tabla periódica. IES Ramón y Cajal, Albacete. Consuelo Wic Baena y Leticia A. Pardo.
- 122 Estamos hechos unos elementos. IES Ntra Sra de la Cabeza, Andújar (Jaén). María Aránzazu González Mármol y Manuela Sánchez Reca.
- 123 Tabla periódica de la salud. Colegio Santa Ana y San Rafael, Madrid. Marta Cualladó, Beatriz de Bernardo, Beatriz Parra y Begoña Quero.
- 124 Qn3D (Química en 3 dimensiones). Colegio Salesianos El Pilar, Soto del Real (Madrid). Ana María Ruiz.
- 125 Tabla periódica de los elementos. Colegio Alemán *Deutsche Schule* San Alberto Magno, Donostia-San Sebastián (Gipuzkoa). Antxon Anta.
- 126 Tabla periódica reversible. IES Josep Sureda i Blanes, Palma (Islas Baleares). María Elena Urbina Pons, María Antònia Amezcu Villalonga y Esther Baquero Toledo.
- 127 Al final todo encaja. IES Vermellar, L'Olleria (Valencia). Ana Gasó Climent y José Juan García Ens.
- 128 Lata-bla periódica. Colegio Sagrado Corazón de Jesús, Madrid. Marta Alonso Malmierca.
- 129 Aprende la tabla periódica de re-bote. IES Izipisúa Belmonte, Hellín (Albacete). Susana María López Picazo, Pascual García Herráez, José Ramón Sáez Jordán y Javier Serrano Mora.
- 130 Tabla periódica en la VI Semana de la Ciencia. IES Auringis, Jaén. Purificación Luque Martínez y María Victoria Mayoral Martínez.
- 131 TaBLa PErIODyCa & GeP, INS Els Planells, Artesa de Segre (Lleida). Paco Mengual.
- 132 Descubriendo las cosas que nos rodean. IES 4 de Junio, Cañete (Cuenca). María Isabel González Muñoz y Ana Cañadas Calleja.
- 133 Un poco de cada elemento en el instituto. IES Izipisúa Belmonte, Hellín (Albacete). Susana María López Picazo, Pascual García Herráez, José Ramón Sáez Jordán y Javier Serrano Mora.
- 134 Concurso escolar: nuestra tabla periódica. IES Nuestra Señora de los Remedios, Ubrique (Cádiz). Isabel María Vilches Román y Beatriz Lemos.
- 135 La tabla periódica: Elemental naturaleza, IES Carles Salvador, Aldaia (Valencia). Inmaculada Carrasco Llopis, Vicente Montejano López y Elena Adelantado Aparicio.
- 136 Nuestra tabla periódica. IES Salvador Victoria, Monreal del Campo (Teruel). Juan Cebrián Valiente.
- 137 Agregando valor a la tabla periódica. Colegio Salzillo, Molina de Segura (Murcia). Mercedes Esquer Moya, Patricia Mínguez Martínez y María Teresa López López.
- 138 Los secretos de la tabla periódica. IES Adolfo Suárez, Paracuellos de Jarama (Madrid). Jesús Ángel de la Fuente, María Fernández López y Patricia Álvarez Díez.
- 139 Sc y La y demás tierras raras. IES Cristóbal Pérez Pastor, Tobarra (Albacete). María Esther González Felipe, Yasmina Parreño Buedo, José Lizano Bermejo, Francisco Mediano Villanueva y Rosario Navarro Planelles.
- 140 Tabla apadrinada de los elementos. IES Joaquín Turina, Sevilla. Jesús Manuel Muñoz Calle, María Dolores Castaño Sánchez y Rufino Lobo García.
- 141 Tabla periódica QR. Colegio Santo Ángel de la Guarda, Madrid. Fernando Ramírez Delgado.
- 142 Tabla periódica gigante. IES Valle del Saja, Cabezón de la Sal (Cantabria). Alberto Aguayo Díaz y Covadonga Gutiérrez García.
- 143 Nuestra tabla periódica viva. IES Schamann, Las Palmas de Gran Canaria. Lorenzo Mora González y Teresa Sánchez Cuenca.
- 144 Tabla periódica interactiva. IES La Jara, Villanueva de la Jara (Cuenca). María Sahuquillo Sáiz.
- 145 Encuentra tu elemento, Colegio Eduardo Pondal Soc. Coop. Gal. O, Cangas de Morrazo (Pontevedra). Ana María Piñeiro Sotelo y María del Carmen Sánchez Estévez.
- 146 Nuestro Ábaco Periódico. IES Valles del Luna, Santa María del Páramo (León). Patricia de Pedro Gestoso y Álvaro Mencía Alonso.
- 147 Aplicación real de los elementos químicos. IES Cristóbal Pérez Pastor, Tobarra (Albacete). Yasmina Parreño Buedo y María Esther González Felipe.
- 148 Tabla de tablas: Somos atómicos. IES de Massamagrell (Valencia). Mónica Pérez Herranz, José Antonio Pariente Silván y Empar Peris Cardells.
- 149 La tabla periódica. CEPA Coslada (Madrid). Rosa María Cortés González.
- 150 Tabla periódica 3D. IES María Guerrero, Collado Villalba (Madrid). Sara Alonso Bermejo y Francisco Barbado Rivero.
- 151 La tabla periódica del IES A Pinguela, Monforte de Lemos (Lugo). Pablo Fernández Zapata y María Luisa Rodríguez Piñeiras.
- 152 Creciendo con la tabla periódica. IES Profesor Tierno Galván, Alcalá de Guadaíra (Sevilla). Patricia Balbuena Oliva.
- 153 Tabla periódica virtual. Colegio San Ignacio de Loyola, Torreldones (Madrid). David Rubio Rodríguez.
- 154 La tabla periódica de la ortografía. Jesús y María, Valladolid. Sara Juez Navarro, Regina Gutiérrez Baraja y Nuria Sancho Casado.
- 155 Tabla periódica del reciclaje. IES Alarifes Ruiz Florindo, Fuentes de Andalucía (Sevilla). María del Carmen Herrera Moyano, Ascensión Ruiz Lora, Manuel Rechi Vega, Bernardeth Martín Flores y Miguel Ángel Gómez Mercado.
- 156 Física y química: Elementos *personal training*. CEIP José Calvo Sotelo, Madrid. Ángel Pérez Vázquez.
- 157 La tabla periódica del queso. IES Azuer, Manzanares (Ciudad Real). José Luis Olmo Rísquez.
- 158 La tabla periódica, un puente entre las dos culturas. IES Llanes, Sevilla. Reyes de la Vega Sánchez, Pepa Gómez y Pepa Escibano.
- 159 Nuestra tabla periódica. Colegio San Vicente de Paul, Cartagena (Murcia). Julián José Hernández-Ardieta García, Jesús Guerrero Sánchez, María Isabel Guillen Medina y Beatriz Pérez Saura.
- 160 Tabla saciloica. IES Sácilis, Pedro Abad (Córdoba). Rosario Jiménez Barrientos.
- 161 Nuestra tabla periódica. IES Isabel la Católica, Madrid. Carla C. Hallabrin Zubiri, Cristina Lalinde Fernández, Mercedes Bombín

- Castrejón, Manuela Morillo Méndez, Borja Sanz Martínez, Ángeles Costa Zamorano y Lucía Cabanas Melic.
- 162 Nuestra diversitabla periódica. IES Juanelo Turriano, Toledo. Ana Isabel Marchal Martínez y Marina Sánchez Gutiérrez.
- 163 Nuestra tabla periódica. IES Santa Maria d'Eivissa, Ibiza (Baleares). Catalina Prats.
- 164 El monasterio del tiempo. La historia de la tabla periódica. Colegio María Inmaculada-Hijas de la Caridad, Madrid. Gonzalo Valles Barbudo, Jaime Ulecia, Cristina Camacho, Gonzalo Valles y Elisabeth Alvarado.
- 165 Terelú: Juego tabla periódica. IES Antonio Fraguas "Forges", Madrid. Sergio Medina Repiso y Susana Zuluaga Rodríguez.
- 166 Tabla periódica reciclada. Colegio Sopena, Badajoz. Eva Albano Pérez y Beatriz Marín Moreno.
- 167 La tabla del Pablo. IES Pablo Montesino, Las Palmas de Gran Canaria. Inmaculada Saiz Alonso y Carina María Rodríguez Godoy.
- 168 La tabla periódica de las mujeres científicas. CEO Virgen de Navaserrada, El Hoyo de Pinares (Ávila). Vanessa Rodríguez Rubio y Miguel Ángel Cruz Sánchez.
- 169 Elemental, querido Mendeléyev. Colegio Fundación Caldeiro, Madrid. Mercedes Pérez Santamaría y Santos Rodríguez Núñez.
- 170 Una tabla periódica muy dulce. IES Juana de Castilla, Madrid. Ana Isabel Bárcena Martín.
- 171 150 años de la tabla periódica, "Mujeres que hacen historia". IES San Cristóbal de los Ángeles, Madrid. Beatriz Vigalondo García y Rubén Heras Moreno.
- 172 Nuestra tabla periódica gigante. IES Salvador Dalí, Madrid. Ángel Alfredo Palencia Cabrerizo.
- 173 Elementos al cubo. CEIP Reyes Católicos, Santa Fe (Granada). Emilia María Jiménez Mesas y Juan Francisco Dorador Rodríguez.
- 174 Nuestra tabla periódica: Tridimensional, interactiva, multilingüe e inclusiva. IES Diego Velázquez, Torrelodones (Madrid). Pablo Cassinello, Miguel Ruano, Ana Camarero, Manuel López, Cristina Somolinos, Diego Valdés y Ángeles Lafuente.
- 175 150 Aniversario de la publicación de la tabla periódica de los elementos. IES Rey Don García, Nájera (La Rioja). Santiago Ruiz Abeytua y Alicia Viniestra Ros.
- 176 Tablalmina periódica. IES Almina, Ceuta. Francisco Javier Rodríguez Rodríguez, Patricia González Miaja, Cristóbal Moisés Pavón Coronel y Juan Antonio García Clavijo.
- 177 Tabla periódica isométrica. Colegio Nuestra Señora de la Concepción, Navalcarnero (Madrid). Raquel Marchante Pinto y Cristina Rodríguez Rodríguez.
- 178 Nuestra tabla periódica. IES Pedro Salinas, Madrid. Rebeca Izquierdo Huete.
- 179 Realidad aumentada en la tabla periódica. IES de Muriedas (Cantabria). Nazaret Trueba Fernández y Begoña Perea Mora.
- 180 La tabla periódica en 3D. *Brains International School*, Alcobendas (Madrid). Begoña Utrera.
- 181 La tabla periódica de los superhéroes. IES Ocho de Marzo, Castro Urdiales (Cantabria). Karina Beatriz Hueso, Noemi Martínez del Campo, Anna Villanueva Cuesta, Érika Vela Bringas, Zaira Urtiaga Ruiz y Virginia Moncalián Montes.
- 182 Tabla periódica interactiva y robótica. Colegio Ábaco, Madrid. Rosario Angulo Sánchez-Herrera, David Nehme Álvarez y Alfonso Gago.
- 183 Muy periódica. IES Alto Guadiato Peñarroya-Pueblonuevo (Córdoba). María Ángeles Rubio Muñoz, Manuel Ansino Domínguez y María Contreras Herrera.
- 184 Elementos3. IES Val dos Asma, Chantada (Lugo). Iria Fernández Cid.
- 185 Tabla *body*. Colegio Enriqueta Aymer, Madrid. Begoña Lucas Gallego, María Isabel Sánchez y Carmen Gámez.
- 186 Abecedario Universo. IES Antonio Buero Vallejo, Guadalajara. Julián Pascual-Heranz Ortega y Gema García Vizcaíno.
- 187 Tabla periódica saludable. IES Antonio Buero Vallejo, Guadalajara. Antonio José Montes Oviedo y Silvia Ruano Calvo.
- 188 Tabla periódica multidimensional: más allá de lo presente, salta a la web. IES Príncipe Felipe, Madrid. Jesús López Cantarero, Alicia Berzal Montes, Rosa María Gómez Díaz, José María Gómez Olleta, Ana Jiménez del Río, Carmen López Salgado y Soffia Mateo Ayala.
- 189 150 aniversario de la tabla periódica. IES Condestable Álvaro de Luna, Illescas (Toledo). Sonsoles Delgado Martín, Cristina Prieto Pérez, Pilar Mena Aceta, Miriam Martín Sánchez y Mari Carmen López.
- 190 Mi tabla, tu tabla, nuestra tabla. Tabla periódica colaborativa. IES Calderón de la Barca, Madrid. Begoña Rodríguez Rodríguez y Cándido Hernández.
- 191 Gran escultura periódica de los elementos. IES Valle de Piélagos, Renedo de Piélagos (Cantabria). Samuel Ortiz Mantecón y Ana Moya González.
- 192 Tabla periódica gigante. Colegio Bon Salvador, Sant Feliu de Llobregat (Barcelona). José María López Valbuena.
- 193 Nuestra tabla periódica. IES Pablo Sarasate, Lodosa (Navarra). Vanesa Lázaro Martínez.
- 194 Te doy mis ojos. Colegio Internado Sagrada Familia, Valladolid. Laura García Sastre, Elena Álvarez Seco y Carlota Casado Lorenzo.
- 195 Reciclando la tabla periódica. IES La Maroma, Benamocarra (Málaga). Sergio Florido Oviedo, Jesús García de Miguel y María Isabel Pérez Requena.
- 196 Nuestra tabla periódica interactiva. IES Virgen de Gracia, Oliva de la Frontera (Badajoz). María Ángeles Calatrava Sánchez, Juan José Rodríguez Barjola y José Antonio Ulivarri Domínguez.
- 197 Una carrera con química. Colegio Santo Tomás de Villanueva, Granada. Antonio Jesús Torres Gil, José Antonio Martín-Lagos Martínez, Raúl Álvarez Navarro, José Guzman Fernández y Jennifer Novell.
- 198 Tabla periódica. Colegio Adharaz, Sevilla. Lucía Cardarelli.
- 199 Catedral química. Colegio Concertado Cervantes, Talavera de la Reina (Toledo). Rosario Ruiz Azofra.
- 200 Tabla periódica interactiva. IES Baelo Claudia, Algeciras (Cádiz). José Manuel Aranda Pérez, Lourdes Sánchez López, Isabel Enriquez Urbano, Marina Gutiérrez Portales y Gregorio Fernández Arias.



XXXVIII REUNIÓN BIENAL

**RSEQ**

GRANADA 2021

28 DE JUNIO / 2 DE JULIO

REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE QUÍMICA



## Miquel A. Pericàs, Medalla de Oro RSEQ, 2019

Miquel A. Pericàs nació en Palma de Mallorca (España) en 1951. Estudió Ingeniería Química en el Instituto Químico de Sarriá y Química en la Universidad de Barcelona, y obtuvo su doctorado en 1979 por su trabajo sobre diéteres acetilénicos y síntesis de oxocarbonos cíclicos bajo la dirección de Fèlix Serratosa en la Universidad de Barcelona. Tras realizar estudios postdoctorales en el CSIC con el profesor Francesc Camps, se incorporó al Departamento de Química Orgánica de la Universidad de Barcelona en 1980 como profesor adjunto. Desde 1991 es catedrático de química orgánica en esta institución. En junio del 2000 recibió el encargo de fundar y dirigir el Instituto de Investigación Química de Catalunya (ICIQ), funciones que actualmente desempeña.

Tras iniciar su investigación independiente trabajando sobre la reacción de Pauson-Khand, su interés se focalizó pronto en la producción de compuestos enantiopuros, primero mediante síntesis asimétrica basada en auxiliares quirales y después mediante catálisis enantioselectiva. Utilizando a menudo un enfoque combinado teórico-experimental, la investigación de Miquel A. Pericàs se ha dirigido al desarrollo de métodos prácticos para la preparación de compuestos enantiopuros mediante aproximaciones que han evolucionado a lo largo del tiempo: *a)* diseño de ligandos modulares a partir de precursores sintéticos enantiopuros, *b)* inmovilización covalente de ligandos y organocatalizadores sobre polímeros y nanopartículas mediante cicloadiciones azida-alquino, y *c)* desarrollo de procesos en flujo continuo para la producción catalítica de compuestos enantioméricamente puros. Su trabajo más reciente incluye también estudios sintéticos y mecanísticos sobre reacciones promovidas por luz.

A lo largo de su carrera Miquel A. Pericàs ha dirigido 50 tesis doctorales, ha publicado unos 310 artículos y es coinventor en 25 patentes. En el año 2000, recibió la Distinción de la Generalitat de Catalunya (GC) para la Pro-



Miquel A. Pericàs

moción de la Investigación Universitaria, en 2001 recibió el premio Janssen-Cytag de la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) para la Investigación en Química Orgánica, en 2005 la Medalla Narcís Monturiol de la GC por Méritos Científicos y Tecnológicos, y en 2019 la Medalla de Oro de la RSEQ.

Es miembro de la RSEQ (vicepresidente entre 2006 y 2011), Societat Catalana de Química (presidente en 1986-1987), American Chemical Society y Fellow de la Royal Society of Chemistry (desde 2014).

Todas las noticias deberán enviarse a Elena Sáez Barajas [elenasz@ucm.es](mailto:elenasz@ucm.es)  
Su publicación es discrecional al Comité Editorial de *Anales*.

## Premios de Reconocimiento a la Carrera Investigadora de la RSEQ, 2019



Enrique Guitián

**E**nrique Guitián nació en Santiago de Compostela donde realizó sus estudios de Química y se doctoró en 1981. En 1982 se incorporó al grupo del profesor Winterfeldt en la Universidad de Hannover

Reincorporado a la Universidad de Santiago como Profesor Ayudante retomó sus investigaciones sobre el desarrollo de nuevos métodos de síntesis basados en las reacciones de cicloadición de arinos. En 1985 accedió a la posición de Profesor Titular y en 1992 a la de Catedrático, desarrollando su labor docente e investigadora en el Departamento de Química Orgánica de la Universidad de Santiago, y, desde su creación en 2010, en el Centro Singular de Investigación en Química Biológica y Materiales Moleculares (CiQUS). Su investigación se ha centrado en el desarrollo de nueva metodología sintética basada en la química de arinos y más recientemente al desarrollo de materiales moleculares. El Prof. Guitián ha dirigido 20 Tesis Doctorales y ha publicado más de 100 trabajos de investigación.

**Q**uímica. Profesora de Investigación. Actualmente, dirige el Grupo de Materiales Multifuncionales y Supramoleculares del ICMM del CSIC. Sus investigaciones se enmarcan entre las líneas más avanzadas de la Química de Materiales: desde sus comienzos con óxidos superconductores y relacionados, Química molecular y supramolecular, diseño y síntesis de Zeotipos de Germanio, hasta llegar a su actual tema de investigación: los Materiales MOF (Metal-Organic Frameworks).

Es Profesora Invitada en la Universidad de California en Berkeley, en la que colabora con el profesor Yaghi. Como resultado de estas estancias ya ha obtenido materiales patentados por BASF-USA de las cuales es co-autora. Ha sido Vicerrectora de Investigación y Posgrado de la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP), donde diseñó e implantó su Programa de Doctorado en el European Higher Education Area System.

Ha recibido entre otros: Medalla de Oro MISCA 2019 (Italian and Spanish Crystallography Associations), Distinguished Global Science Visiting Professor of Berkeley Global Science Institute 2018, Medalla of Honor al Merito Académico de la Universidad Internacional Menéndez Pe-



M.ª Ángeles Monge Bravo

layo 2012. Representante Nacional en la IUPAC, Miembro de la International Union of Crystallography en la Comisión de Estructuras Inorgánicas y Minerales.

## Premios a la Excelencia Investigadora de la RSEQ, 2019

**R**osario Fernández realizó la Licenciatura en Química y la Tesis Doctoral en la Universidad de Sevilla. Tras una estancia postdoctoral en la Universidad de Paris Sud, obtuvo en 1987 la Plaza de Profesora Titular en la Universidad de Sevilla. En 2008 superó las pruebas de habilitación, y pasó a ser Catedrática de Química Orgánica. Es Investigadora responsable del Grupo de Investigación de Excelencia de la Junta de Andalucía "Síntesis estereoselectiva" desde su creación en 1997. Sus intereses en investigación se centran en el campo de la catálisis enantioselectiva mediada por metales y en procesos organocatalíticos. Los resultados de su investigación se han recogido en numerosas publicaciones y patentes. Desde 2018 es Colaboradora de la Agencia Española de Investigación. Es Presidenta de la Sección Territorial Andalucía Occidental de la RSEQ desde 2012 y Vicepresidenta del Grupo Especializado de Química Orgánica desde 2014. Desde 2011 es Miembro electo de la Real Academia Sevillana de Ciencias y en 2019 ha recibido el Premio FAMA de la Universidad de Sevilla a la trayectoria investigadora.



Rosario Fernández



Leticia Gonzalez

**L**eticia González se graduó en la Universidad Autónoma de Madrid, donde también obtuvo su doctorado con premio extraordinario (1998). Tras varias estancias en el King's College London (UK), Dalhousie University (Canadá) y Northwestern University (USA), realizó una estancia postdoctoral en la Universidad Libre de Berlín, donde se reconocería su Habilitación en Química Teórica en 2004. En el 2006, recibió una beca Heisenberg de la Fundación Alemana de Investigación Científica (DFG), que disfrutó hasta ocupar una plaza de profesora permanente en la Universidad de Friedrich-Schiller de Jena en 2007. Más adelante, en 2011 obtuvo una cátedra de química teórica en la Universidad de Viena, donde se encuentra actualmente. Cuenta con más de 200 artículos especializados y 25 tesis doctorales dirigidas. Es editora asociada de varias revistas especializadas. Actualmente es presidenta de la Asociación de Química Teórica Alemana (AGTC). Es doctor honoris causa por la Universidad de Lorraine en 2018. Asimismo, Leticia González es miembro de la Academia Internacional de Ciencias Cuánticas Moleculares (IAQMS), la Academia de Ciencias Austríaca (ÖAW), la Academia Europea de las Ciencias (EurASc), la Fundación GADEA por la Ciencia. La Real Sociedad Española de Química le otorgó el premio SIGMA-ALDRICH para jóvenes investigadores en 2005.

José Ramón (“JR”) Galán Mascarós (Valencia, 1970), es profesor ICREA en el Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ) desde 2010. Se doctoró en Ciencias Químicas por la Universidad de Valencia en 1999 con aportaciones en el área de los materiales moleculares magnéticos. Llevó a cabo una estancia postdoctoral en la universidad Texas A&M (College station, TX, 1999-2001), en el laboratorio de la profesora Kim R. Dunbar, realizando estudios en química de coordinación de moléculas magnéticas y bioactivas. En 2002 se reincorporó como investigador Ramón y Cajal al Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) de la Universidad de Valencia, donde trabajó en el desarrollo de multifuncionalidad en materiales híbridos moleculares. En 2009 se incorporó al Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ) en Tarragona, donde lidera un grupo de investigación dedicado al diseño y aplicación de materiales



José Ramón Mascarós

inorgánicos con aplicaciones en el área de las energías renovables y la química sostenible.



Vicent Moliner

Vicent Moliner, Catedrático de Universidad (2009) y director del Grupo de Investigación de Bioquímica Computacional en la Universitat Jaume I, se licenció en Química por la Universidad de Valencia y se doctoró en la misma disciplina por la Universitat Jaume I. Llevó a cabo su estancia post-doctoral con el Prof. Ian Williams en la Universidad de Bath (1996-97, Reino Unido) gracias a una beca de The Leverhulme Trust. Desde entonces ha realizado numerosas estancias en universidades de diferentes países de Europa y América. En 2009-10 fue profesor visitante en la Universidad Politécnica de Łódź (Polonia) gracias a una beca “Salvador de Madariaga”, y en 2017 realizó su segundo año sabático en la Universidad de Bath (Reino Unido).

## Premios Jóvenes Investigadores de la RSEQ, 2019

Gonzalo Abellán se licenció en Químicas en la Universidad de Valencia y completó su tesis doctoral en el Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) en 2014, recibiendo el premio extraordinario de doctorado. En 2017 comienza su carrera científica independiente trabajando en materiales bidimensionales del grupo 15 de la tabla periódica (P, As, Sb y Bi) gracias a un proyecto FLAG-ERA financiado por la Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). Diferentes becas y proyectos para el desarrollo de su investigación le han permitido reincorporarse al ICMol en 2018: una ERC Starting Grant (2018), una ayuda Plan GenT Investigadores de Excelencia (CIDEGENT2018-Generalitat Valenciana), un contrato Ramón y Cajal, una subvención SEJI a la Excelencia Científica de Investigadores Junior (Generalitat Valenciana), y una beca Junior Leader Incoming de la Fundació La Caixa. Gonzalo ha sido distinguido con diferentes premios y reconocimientos, como el Premio Científico-Técnico Ciutat d’Algemesí 2017, el Premio Valencia Idea 2014, o el Premio European Materials Research Society – Young Scientist Award 2012, entre otros.



Gonzalo Abellán





Jordi Bures

Jordi Bures Amat se licenció en Química por la Universidad de Barcelona 2009 y se doctoró en química orgánica. En el año 2010, inicio una etapa postdoctoral en el grupo de la profesora Blackmond (*Scripps Research Institute*, California). En 2013, inició su carrera investigadora independiente en el *Imperial College London* y en 2016 se trasladó a la Universidad de Manchester como *Lecturer* en química orgánica.

María Escudero, nacida en Cáceres (1983), es ingeniera química por la Universidad de Extremadura y doctora en química por la Universidad Autónoma de Madrid (Premio Mejor Tesis Doctoral de la Comunidad de Madrid por la RSEQ). Durante su doctorado, realizó estancias de investigación en el Laboratorio Nacional de Argonne (Estados Unidos) y la Universidad de Ulm (Alemania). Realizó su formación postdoctoral en la Universidad Técnica de Dinamarca (2012-2015) y la Universidad de Stanford (2015-2017). Desde marzo de 2017, es profesora e investigadora independiente en la Universidad de Copenhague, donde dirige el grupo de Nanoelectroquímica. Su grupo investiga nuevos catalizadores que nos permitan construir un futuro sostenible. Desde 2018, es presidenta de la Sociedad Danesa de Electroquímica. En 2018, recibió la beca *Villum Young Investigator* de la fundación danesa “Villum”. Ha publicado su trabajo en revistas como *Science* y *Nature Chemistry*, tiene tres patentes y ha recibido numerosos premios de investigación tanto a nivel nacional como internacional, entre ellos el Premio Joven Químico Europeo – Medalla de Oro (2016), Investigador Joven por la “Electrochemical Society” (2018), Fundación Princesa de Girona Investigación Científica



María Escudero

(2018), “Clara Immerwahr Award” (2019), y es una de las 11 finalistas del “Nature Research Award for Inspiring Science” (2019), otorgado por la revista *Nature* a mujeres líderes en ciencia que son modelos a seguir, a nivel internacional.



Araceli González

Araceli González Campaña se doctoró en 2008 por la Universidad de Granada. Tras varias estancias postdoctorales regresa a la Universidad de Granada en 2012 con un contrato Juan de la Cierva. En el año 2015 inicia una nueva línea de investigación centrada en la síntesis, el estudio y la búsqueda de aplicaciones de nanografenos distorsionados curvos con interesantes propiedades quirópticas y electrónicas, para lo que recibe una ERC-Starting Grant. Desde 2015 es investigadora Ramón y Cajal de la Universidad de Granada y lidera el equipo “NanographOUT” en el Departamento de Química Orgánica (<http://nanographout.ugr.es>).

## Premio ChemPubSoc Joven Investigador

Rubén D. Costa se licenció en química en la Universidad de Valencia en 2006. Realizó su doctorado (2010) en el Instituto de Ciencia Molecular (IcMol). De 2011 a 2013, fue investigador post-doctoral Humboldt en University of Erlangen-Nürnberg (FAU), trabajando en las células solares basadas en nanocarbones. En 2014, obtuvo becas EAM y Liebig para crear su grupo de investigación en la University of Erlangen-Nürnberg universidad trabajando en iluminación sostenible, fotovoltaica híbrida, y diagnosis. En 2017, movió parte de su grupo de investigación al instituto IMDEA Materiales, dónde lidera el laboratorio de materiales y dispositivos optoelectrónicos híbridos que consta de 8 doctorandos. Su grupo investiga desde el diseño y preparación de nuevos materiales hasta la fabricación y optimización de dispositivos para iluminación y fotovoltaica.



Rubén D. Costa

## Premio Tarea Educativa y Divulgativa a profesores de enseñanzas preuniversitarias



Aureli Caamaño Ros

Aureli Caamaño Ros es ingeniero químico por el Instituto Químico de Sarriá, licenciado en química y doctor en química por la Universidad de Barcelona. Ha sido catedrático de física y química de Educación secundaria. Ha coordinado programas de formación del profesorado de ciencias de la ESO y del bachillerato del Departamento de Educación de la Generalitat de Cataluña. Ha trabajado en el desarrollo de varios proyectos de ciencias (Química Faraday, Física Faraday, Proyecto GAIA y Química Salters) y es coautor de diversos libros de texto de física y química para la ESO. Ha publicado más de un centenar de artículos sobre el currículum de ciencias, la terminología y el lenguaje de la química, los trabajos prácticos indagativos y los procesos de modelización en química. Es codirector de las revistas *Alambique* y *Educació Química EduQ*. Recientemente se ha graduado en Humanidades en la universidad Pompeu Fabra y está preparando un libro sobre la enseñanza de la química en la educación secundaria.

## Entrega del premio Weizmann-Moles 2019 al profesor David Milstein

El pasado día 19 de julio, tuvo lugar en Valladolid la entrega del premio Weizmann-Moles al profesor David Milstein del Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel. Esta es la primera edición de este premio, que es una iniciativa conjunta de la RSEQ y The Israel Chemical Society, y que se ve acreditado por su concesión a una figura tan relevante. El profesor Milstein recibió el galardón de manos de Antonio Echavarren, presidente de la RSEQ, en el marco del Simposio-Homenaje a Pablo Espinet con motivo de su 70 cumpleaños.

David Milstein es una de las más prestigiosas figuras en el actual panorama mundial de la Química. Sus contribuciones en química organometálica y catálisis han sido clave en el desarrollo de estas disciplinas y el enorme interés y

relevancia de su trabajo han merecido numerosos reconocimientos de varias sociedades científicas, a las que se une esta que ahora se le ha entregado. Su conexión con investigadores españoles se ha mantenido a lo largo de los años, participando además con cierta frecuencia en congresos y conferencias en nuestro país. Compartió cuatro meses con el profesorado y los doctorandos de la Universidad de Valladolid, en dos visitas como profesor visitante en el marco del Premio Iberdrola de Profesores Visitantes, por lo que Valladolid pareció el lugar adecuado para acoger la entrega de este galardón.

ANA CARMEN ALBÉNIZ  
Universidad de Valladolid



El profesor Milstein recibió el galardón de manos de Antonio Echavarren, presidente de la RSEQ, en el marco del Simposio-Homenaje a Pablo Espinet con motivo de su 70 cumpleaños

## El profesor Francesc Lloret Pastor recibe el premio Hispano-Francés “Miguel Catalán-Paul Sabatier”

El pasado 16 de mayo tuvo lugar la entrega del premio bianual creado en conjunto entre la Société Chimique de France y la Real Sociedad Española de Química, Catalan-Sabatier 2018 a Francesc Lloret Pastor, del Instituto de Ciencia Molecular (ICMol) de la Universidad de Valencia.

El profesor Lloret Pastor obtiene su doctorado en la Universidad de Valencia (1982) en donde actualmente es Catedrático de Química Inorgánica. Dirige el grupo de Química de Coordinación del Instituto de Ciencia Molecular (ICMol). Su actividad investigadora se centra en los estudios magnéticos sobre sistemas multimetálicos, tanto desde el punto de vista experimental como teórico.

Su trabajo ha sido reconocido con el Premio Nacional de Investigación en Química Inorgánica de la Real Sociedad Española de Química en 2005, elegido miembro de la Academia Europea y Doctor Honoris Causa de la Universidad de Bucarest en 2014.

Es miembro de numerosos consejos de redacción (Magnetochemistry) y comisiones nacionales españolas.



De izquierda a derecha: el premiado Dr. Francisco Lloret Pastor, el presidente de la Société Chimique de France Dr. Marc Taillefer y la presidenta de la Division de Chimie de Coordination Dra. Anna Proust en la entrega del premio en La Maison de la Chimie en París

## La doctora Maria João Ramos, premio Madinaveitia-Lourenço (Portugal)

La doctora Maria João Ramos se licenció en Química en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Oporto (Portugal). A esto le siguió su doctorado en la Universidad de Glasgow (Reino Unido), y en el entonces Instituto Suizo de Investigación Nuclear (SIN) en Villigen (Suiza). En la actualidad es profesora de Química Teórica en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Oporto. Dirige el Grupo de Investigación en Bioquímica Teórica y Computacional.

Su investigación científica se centra en la catálisis enzimática computacional, la dinámica de proteínas, la mutagénesis computacional, el acoplamiento molecular y el descubrimiento de fármacos, todo ello con el objetivo de comprender mejor las funciones y aplicaciones de las enzimas.



Maria João Ramos

ELENA SÁEZ

## El profesor Nazario Martín, premio Ciamician-González Lectureship 2019

La Sociedad Química italiana ha concedido el galardón Ciamician-Gonzales Lectureship 2019 al profesor Nazario Martín.

Nazario Martín es catedrático en la Universidad Complutense de Madrid y subdirector de IMDEA-Nanociencia. Doctor Honoris Causa por la Universidad de La Habana (Cuba) y la Universidad de Castilla La Mancha (España). En el período 2006-2012 ha sido presidente de la Real Sociedad Española de Química y en 2015 fue nombrado presidente de la Confederación de Sociedades Científicas de España (COSCE). Ha sido galardonado con diferentes premios a lo largo de su carrera investigadora, así como una Advanced Grant del European Research Council (ERC).

Su investigación se desarrolla en el campo de la química molecular y supramolecular de nanoestructuras de carbono (fullerenos, nanotubos de carbono y grafeno, sistemas p-conjugados como cables moleculares y moléculas electroactivas), así como en los procesos de transferencia de electrones, aplicaciones fotovoltaicas y nanociencia.



Nazario Martín

ELENA SÁEZ

© 2019 Real Sociedad Española de Química



**XXVIII Reunión Bienal  
de Química Orgánica**  
Santa Cruz de Tenerife  
10 - 12 junio de 2020



<https://biqote2020.es>

## Celebración de la XXXVII Reunión del Grupo Especializado de Química Organometálica y entrega de los Premios GEQO 2019

El pasado día 20 de septiembre se celebró en Alcalá de Henares la XXXVII Reunión del Grupo Especializado de Química Organometálica, en su formato de jornada-simpósio. La organización del evento corrió a cargo de la Junta de Gobierno del GEQO y de nuestros anfitriones en Universidad de Alcalá Marta González Mosquera y Ernesto de Jesús. La reunión contó en esta ocasión con la participación de 92 asistentes y en ella intervinieron **Christopher Darcel** (Université Rennes), **Agustí Lledós** (Universidad Autónoma de Barcelona-Medalla Rafael Usón 2018), **Jose Antonio García López** (Universidad de Murcia-Premio Jóvenes Investigadores GEQO 2017) y **Miguel Ángel Ciriano** (Universidad de Zaragoza-CSIC; Medalla Rafael Usón 2019). Además nueve jóvenes investigadores presentaron y discutieron su trabajo con la audiencia.

En la reunión de hizo entrega de los Premios GEQO 2019, en sus diferentes categorías:

Medalla Rafael Usón a **Miguel Ángel Ciriano** por su gran contribución al desarrollo de la Química Organometálica española, destacando la variedad temática de su investigación. Su labor ha sido innovadora y de extraordinaria calidad en la química organometálica de rodio e iridio en aspectos de síntesis, reactividad y aplicaciones en catálisis.

Premio GEQO a la Excelencia Investigadora a **Eva Hevia** por la singularidad, importancia y originalidad de su trabajo en la química organometálica de los grupos prin-



Entrega de los Premios GEQO 2019. De izquierda a derecha: Miguel Ángel Ciriano, Medalla Rafael Usón, Eva Hevia, premio a la Excelencia Investigadora y Arkaitz Correa, premio Jóvenes Investigadores

cipales. Sus contribuciones en el campo destacan por su calidad y repercusión internacional.

Premio GEQO a Jóvenes Investigadores a **Arkaitz Correa** por la innovación y calidad de su trabajo en el campo de la funcionalización catalítica de compuestos orgánicos con complejos metálicos, en estos primeros años de su carrera investigadora independiente.

Toda la información sobre los premiados se puede encontrar en <http://geqo.es/premios-geqo/premios-geqo-2019/>

ANA CARMEN ALBÉNIZ  
Universidad de Valladolid



Asistentes a la XXXVII Reunión del Grupo Especializado de Química Organometálica

## Entrega de los Premios del Grupo de Electroquímica 2019

El día 10 de julio de 2019 tuvo lugar en Huelva, en el seno de la XL Reunión del Grupo de Electroquímica de la Real Sociedad Española de Química y XX Encuentro Ibérico de Electroquímica, la entrega de los Premios “Grupo de Electroquímica 2019”.

Premio “Investigación Científica” del Grupo de Electroquímica-CIC Energigune: Equipo de Investigación: Enric Brillas Coso (representante equipo investigación),

Pere Lluís Cabot Julià, José Antonio Garrido Ponce, Rosa María Araujo Boira, Rosa María Palmira Rodríguez González, Francisco Andrés Centellas Masuet e Ignacio Sirés Sadornil, todos ellos pertenecientes a la Universidad de Barcelona.

Premio “Jóvenes Investigadores” del Grupo de Electroquímica: Daniel Martín Yerga del KTH Royal Institute of Technology (Suecia).

ELENA SÁEZ



Los representantes del CIC Energigune, Teófilo Rojo y Asier Urzelai, hacen entrega del premio a Enric Brillas, representante del equipo de investigación, en presencia de la presidenta del Grupo, Iluminada Gallardo



El tesorero del Grupo de Electroquímica, Ignacio Sirés, hace entrega del premio a Daniel Martín Yerga en presencia de la presidenta del Grupo, Iluminada Gallardo

## Jornada “La tabla periódica: una oportunidad para la didáctica y la divulgación de la ciencia”

La jornada fue organizada por el Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química, común a las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química, en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid (a través del Grupo de Innovación Educativa de Didáctica de la Química y de la E.T.S.I Industriales), el Foro Química y Sociedad, la Fundación Obra Social “La Caixa” y el proyecto europeo Scientix.

El objetivo principal fue favorecer el intercambio de ideas y experiencias tanto educativas como divulgativas sobre la tabla periódica, en el contexto de su Año Internacional. Asistieron cerca de dos centenares de personas, principalmente profesorado de las distintas etapas educativas, y se impartieron diferentes ponencias.

La jornada culminó con la entrega de premios del concurso escolar “Nuestra tabla periódica”. Dicho concurso consistió en la elaboración por estudiantes, coordinados por uno o más docentes, de una tabla periódica de gran formato que se tenía que exponer en el centro. Tuvo como objetivo promover entre el alumnado español no universitario la relevancia de la tabla periódica y sus aplicaciones y contribución a la sociedad. Se presentaron 201 propuestas de centros educativos de todas las comunidades autónomas y los trabajos ganadores fueron:

- Primer premio (“Au”): “Tabla periódica 3D” (Sara Alonso y Francisco Barbado, IES María Guerrero de Collado Villalba, Madrid).
- Segundo premio *ex aequo* (“Ag”): “Una catedral periódica construida elemento a elemento” (Antonio J. Sánchez y María Trillo, Colegio Virgen de Atocha de Madrid), y “Tabla periódica gigante” (Alberto Aguayo y Covadonga Gutiérrez, IES Valle del Saja de Cabezón de la Sal, Cantabria).
- Tercer premio *ex aequo* (“Cu”): “Tabla de tablas; somos atómicos” (Mónica Pérez, José A. Pariente y Empar Peris, IES de Massamagrell, Valencia), y “Te doy mis ojos” (Laura García, Elena Álvarez y Carlota Casado, Colegio Internado Sagrada Familia de Valladolid).

Más detalles de la jornada y del concurso, como las ponencias presentadas y las fotografías de las propuestas ganadoras (incluidas las diez menciones de honor) se recogen en: <https://bit.ly/2FTjK5d>

GABRIEL PINTO CAÑÓN

Grupo Especializado de Didáctica e Historia de las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química





## «Apadrina un elemento»

Con motivo de la celebración durante 2019 del «Año Internacional de la Tabla Periódica», la Sección Territorial de Extremadura de la Real Sociedad Española de Química (RSEQ-STExt), en colaboración con la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura, convocó la primera edición del concurso «Apadrina un elemento». Esta actividad se dirigió a alumnos de enseñanzas medias (segundo ciclo de Educación Secundaria Obligatoria, Bachillerato y Formación Profesional de Grado Medio), marcándose como principales objetivos despertar el interés de estos estudiantes por la ciencia en general, y por la Química en particular. A tenor de la ingente cantidad de trabajos presentados (un total de 55 proyectos, pertenecientes a 10 centros de secundaria de toda Extremadura) y de la elevada calidad científica de los mismos, desde la Junta Directiva de la RSEQ-STExt nos gustaría dedicar unas líneas para expresar nuestra enorme satisfacción por la excelente acogida que ha recibido el concurso, colmando nuestras mejores expectativas. Del mismo modo, deseamos transmitir nuestro más sincero agradecimiento a todos los alumnos y profesores por su participación, así como a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura por su colaboración, sin la que hubiese sido imposible la organización del concurso.

Tras una evaluación inicial de todos los trabajos, el jurado acordó por unanimidad emitir el siguiente fallo:

- Primer premio: Renio, presentado por Andrea Arancón García, Andrea Galán Pérez y Marcos González Cruz, del IES Pedro de Valdivia de Villanueva de la Serena (Badajoz).
- Segundo premio: Cloro, presentado por Lucía Cid Chaves, Alejandro Cortés Silvela, Elena Román Molano y Andrés Torreño Pajares, del IES Luis de Morales de Arroyo de la Luz (Cáceres).
- Tercer premio: Helio, presentado por Andrés Pino Tena, Víctor M. Pineda Guisado, Guadalupe Ridruejo Pineda y Nuria Sánchez Gallego, del IES Puerta de la Serena de Villanueva de la Serena (Badajoz).

Los premios consistieron en una dotación económica de 250 € para el primer grupo clasificado, 150 € para el segundo y 100 € para el tercero, además de los correspondientes diplomas acreditativos.

ADRIÁN BARROSO BOGEAT  
Presidente de la RSEQ-STE



## El doctor Rubén Martín recibe el premio Arthur C. Cope Scholar Award



Rubén Martín

**E**l doctor Rubén Martín del Institut Català d'Investigació Química (ICIQ) ha recibido el premio Arthur C. Cope Mid-Career Scholars Award 2020, concedido por la American Chemical Society (ACS). El doctor Martín se convierte así en el segundo español en recibir tal distinción, que en 2015 le fue otorgada al profesor Antonio M. Echavarren, también del ICIQ y actual presidente de la Real Sociedad Española de Química.

Rubén Martín se doctoró en la Universidad de Barcelona (2003). Posteriormente se trasladó al Max-Planck-Institut für Kohlenforschung como becario postdoctoral de Humboldt con el profesor Alois Fürstner. En 2005 realizó estudios postdoctorales en el Massachusetts Institute of Technology con el profesor Stephen L. Buchwald. En 2008, se incorporó al ICIQ como jefe de grupo. Sus intereses de investigación actuales se refieren al descubrimiento y desarrollo de metodologías organometálicas de utilidad sintética. Rubén Martín fue promovido a profesor asociado en julio de 2013 y en octubre de 2013 a profesor de investigación de la ICREA (Institución Catalana de Investigación y Estudios Avanzados).

## María Vallet recibe la medalla de Oro de FEMS y el premio George Winter Award

**M**aría Vallet-Regí es Catedrática de Química Inorgánica y directora del departamento de Química Inorgánica y Bioinorgánica de la Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense de Madrid. Es miembro de la Real Sociedad de Española de Química (RSEQ) desde 1978 y de la Real Academia de Ingeniería desde 2004. Pertenece al Instituto de Magnetismo Aplicado (IMA) "Salvador Velayos" (UCM-RENFE-CSIC) desde 1989 y formó parte del Comité Nacional de Evaluación de Actividades Investigadoras (CNEAI) entre 2006 y 2009; así como del Comité Rector del Programa "Science for Peace" de la OTAN entre 1999 y 2005. Es miembro honorífico de la Materials Research Society de la India, y miembro de la red Centro de Investigación Biomédica en Red, Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN).

La carrera de María Vallet ha sido reconocida con dos premios europeos este mes de septiembre. Es la primera española en recibir la medalla de oro 2019 de la Federación Europea de Sociedades de Materiales, (FEMS) por sus contribuciones al desarrollo tecnológico y la innovación FEMS Materials Innovation Prize 2019.



María Vallet-Regí

También en este mes de septiembre la Sociedad Europea de Biomateriales, ESB, le ha hecho entrega del "George Winter Award" que reconoce y estimula las contribuciones de investigación destacadas en el campo de los biomateriales.

ELENA SÁEZ

## Miquel Solà, miembro honorífico de la Sociedad Polaca de Química



En la ceremonia de apertura de la 62.<sup>a</sup> Reunión Anual de la Sociedad Química Polaca, organizada del 2 al 6 de septiembre de 2019 en Varsovia, el miembro de DiMoCat Miquel Solà ha sido galardonado con el título de Miembro Honorario de la Sociedad Química Polaca “por sus destacados logros científicos y servicios para la Sociedad”.

La distinción ha sido entregada al profesor Solà por la profesora Izabela Nowak, presidenta de la Sociedad Química Polaca y el profesor Robert Nowakowski, presidente del Comité Organizador.

## El químico Javier García, futuro presidente de la IUPAC

Javier García ha sido elegido para liderar la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada en el período 2022-2023. Su candidatura, presentada por la Real Sociedad Española de Química, obtuvo la mayoría de los apoyos (122 votos) frente a la de Tailandia (33 votos) durante la Asamblea General de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) celebrada en París. De esta forma, Javier García, que también ocupa el cargo de presidente de la recién creada Academia Joven de España, se convierte en el primer español en ocupar esta responsabilidad para el período 2022-2023, ejerciendo hasta entonces como vicepresidente.

Es catedrático de Química Inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante, donde realiza su investigación sobre nanomateriales y su aplicación en el sector energético. En 2014 recibió el Premio Rey Jaime I.



Javier García

ELENA SÁEZ

## Simposio-Homenaje a Pablo Espinet con motivo de su 70 cumpleaños

Investigadores de todo el país participaron los días 18 y 19 de julio en Valladolid en el homenaje ofrecido a Pablo Espinet.

Nacido en Borja (Zaragoza) hace 70 años, Pablo Espinet se formó en la Universidad de Zaragoza y tras desempeñar puestos en Zaragoza y San Sebastián llegó a Valladolid en 1986 como catedrático de Química Inorgánica. Figura importante en química organometálica, en catálisis y en química de materiales, sus trabajos han abordado aspectos fundamentales y han dejado una profunda huella en la comprensión de los fenómenos químicos. Con gran visibilidad internacional ha sido uno de los principales responsables del desarrollo de la investigación química en el ámbito regional que culminó hace 12 años con la puesta en marcha del instituto CINQUIMA, bajo su dirección. Pablo Espinet ha sido presidente del Grupo Especializado de Química Organometálica de la RSEQ y fue fundamental en

la renovación que sufrió la RSEQ a finales de los años 90, para convertirse en la Sociedad dinámica que hoy conocemos, como destacó Antonio M. Echavarren en la ceremonia de apertura.

El simposio se celebró en el edificio histórico de la Universidad de Valladolid, y en él intervinieron como conferenciantes Antonio M. Echavarren (ICIQ, Tarragona), Didier Bourissou (Universidad Paul Sabatier, Toulouse), Stephen Hashmi (Heidelberg University), Agustí Lledós (Universidad Autónoma de Barcelona), David Milstein (Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel), Pedro J. Pérez (Universidad de Huelva), Mónica Pérez Temprano (ICIQ, Tarragona), José Luis Serrano (Universidad de Zaragoza) y Katerina Soulantica (LPCO, INSA, Toulouse).

ANA CARMEN ALBÉNIZ  
Universidad de Valladolid



Pablo Espinet con todos los asistentes al Simposio-Homenaje en Valladolid

## XXIV Edición de la Olimpiada Iberoamericana de Química (OIAQ 2019)



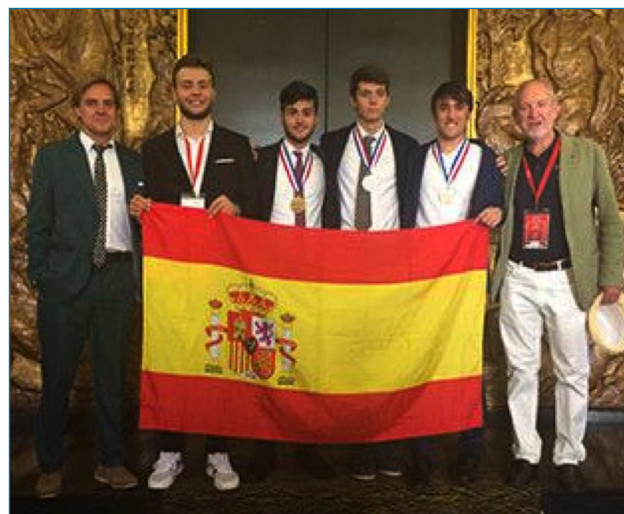
La ciudad portuguesa de Oporto albergó la XXIV edición de la Olimpiada Iberoamericana de Química (OIAQ 2019).

La joven representación de la química española resolvió con éxito su participación. El estudiante Joaquín Baixeras consiguió la medalla de oro y una Mención de Honor al mejor examen teórico, mientras que sus compañeros Daniel Ulibarri y Zhuo Ying Jiang lograron sendas medallas de plata.

## 51 Edición de la Olimpiada Internacional de Química (IChO 2019)

La 51 Edición de la Olimpiada Internacional de Química se celebró en París. El equipo olímpico español vuelve a casa con tres medallas, una de plata para el estudiante de Bachillerato, Joaquín Baixeras (English School Los Olivos, Valencia) y dos medallas de bronce para Daniel Ulibarri (IES Pedro de la Luna, Zaragoza) y Sergio Sanjurjo (Colegio Corazón de María, Gijón). Pablo Soto (IES San Mateo, Tres Cantos, Madrid) recibió el reconocimiento de haber participado en esta competición tras haber ganado una medalla de bronce en la Olimpiada Internacional de Matemáticas.

La joven representación de la química española resolvió con éxito su participación. El estudiante Joaquín Baixeras consiguió la medalla de oro y una Mención de Honor al mejor examen teórico, mientras que sus compañeros Daniel Ulibarri y Zhuo Ying Jiang lograron sendas medallas de plata.



ELENA SÁEZ

## Dieter Enders (1946-2019)

*In memoriam*

El profesor Dieter Enders ha fallecido de forma inesperada el pasado mes de Julio a la edad de 73 años. Dieter Enders nació en Butzbach, Alemania, en 1946. Estudió Química en la Universidad de Giessen, donde también realizó su doctorado bajo la supervisión del profesor Dieter Seebach, recibiendo el título de doctor en 1974. A continuación, realizó una estancia posdoctoral con Elias J. Corey en Harvard. Estos dos grandes maestros dejaron su impronta en la carrera científica de Dieter Enders, cuyo despacho estaba presidido por los retratos de ambos, a los que gustaba citar frecuentemente cuando se reunía con sus colaboradores para discutir distintos aspectos de nuestras investigaciones en el laboratorio. En 1975 regresó a su *alma mater* para comenzar su tarea como profesor, logrando la habilitación en 1979 y siendo nombrado inmediatamente después Profesor de Química Orgánica en la Universidad de Bonn. Fue en 1985 cuando se trasladó a Aquisgrán como catedrático, lugar donde ha ejercido toda su posterior actividad académica. Se retiró en 2014 pero pudo continuar contribuyendo con su creatividad y energía al mundo de la química gracias a una “Advanced Grant” concedida por el ERC.

Dieter Enders fue un pionero en el avance de la síntesis asimétrica. El desarrollo a partir de los años 80 de los auxiliares quirales SAMP/RAMP derivados de prolina para llevar a cabo numerosas reacciones orgánicas fundamentales de forma estereoselectiva a través de las correspondientes hidrazonas son un clásico en síntesis orgánica y supusieron una revolución en el campo. De hecho, los tratados de referencia publicados durante las décadas de los 80 y los 90 dedicaban páginas al uso de estos auxiliares privilegiados, en numerosos ejemplos de síntesis totales de productos naturales y compuestos bioactivos. Posteriormente dirigió su interés al campo de la catálisis asimétrica, en concreto diseñando procesos tremendamente eficaces para generar complejidad molecular mediante reacciones en cascada usando aminocatalisis como aproximación metodológica. En el campo de la organocatalisis también realizó contribuciones clave para el desarrollo de la catálisis con carbenos *N*-heterocíclicos, un tema que recibió el interés recurrente del profesor Enders, desde los años 90, con numerosos intentos de desarrollar una versión catalítica y enantioselectiva de la condensación benzoínica y que acabaron cristalizando años más tarde con el desarrollo de uno de los primeros catalizadores NHC quirales que acabó siendo comercialmente disponible. Además, el grupo del profesor Enders también realizó contribuciones relevantes en catálisis asimétrica mediada por metales de transición y lantánidos, donde también destaca el uso de compuestos quirales de hierro empleados en sustitución alílica enantioselectiva con autoregeneración de estereocentros.



El profesor Dieter Enders

La excelencia de su investigación ha sido reconocida por la comunidad científica en una larga lista de premios y distinciones. Entre ellos, cabe destacar el Leibniz Prize de la DFG (1993), la Medalla Emil Fischer de la Sociedad Química Alemana (2002), el Arthur C. Cope Scholar Award de la ACS (2008), el Robert Robinson Award de la RSC (2010) y el Ryoji Noyori Prize de la Sociedad de Química Orgánica Sintética de Japón (2014).

Sin embargo, donde Dieter Enders mostró sus máximas cualidades fue en su capacidad para construir a su alrededor excelentes equipos de trabajo, formando y aconsejando a numerosos estudiantes de máster, doctorado e investigadores posdoctorales. Cuantos tuvimos la gran oportunidad de trabajar con él pudimos disfrutar de sus conocimientos, su visión de la síntesis orgánica y nos brindó siempre su apoyo y consideración. Siempre se comportó como una persona cercana que nos hizo disfrutar de aquellos días de senderismo (Wandertage) que tanto ayudaban a crear grupo y de los que disfrutaba de forma especial. Incluso después de largo tiempo de haber acabado nuestra estancia en Aquisgrán y con motivo de su jubilación, Dieter reunió en 2014 a un gran número de colegas con los que trabajó en las distintas etapas de su vida y donde quedó patente la conexión que mantenía con todos sus anteriores colaboradores. Con su fallecimiento, la Química Orgánica ve partir a uno de los grandes químicos de finales de siglo y principios del actual. Uno de tantos gigantes sobre cuyos hombros hemos transitado muchos químicos orgánicos de nuestra generación y posteriores. Descanse en paz, profesor Dieter Enders.

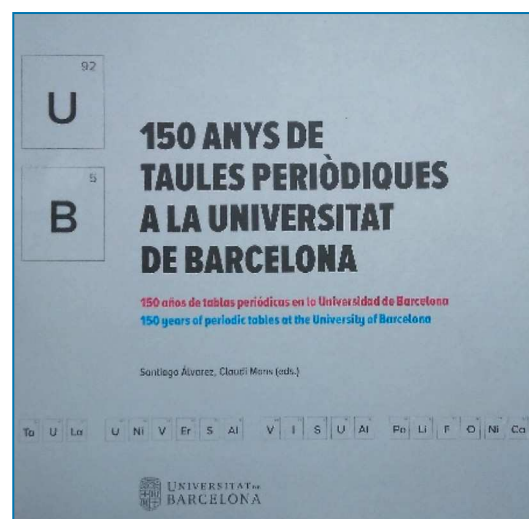
JOSE L. VICARIO  
Universidad del País Vasco  
JUAN VÁZQUEZ  
Universidad de Sevilla

## 150 Anys de taules periòdiques a la Universitat de Barcelona

Santiago Álvarez y Claudi Mans (Eds.)

En la primera frase de la introducción a este magnífico libro (Edicions de la Universitat de Barcelona, 2019), los profesores Santiago Álvarez y Claudi Mans indican que “La tabla periódica es un organismo vivo”. Y, efectivamente, así nos desgranamos a lo largo de la obra, elaborada con una edición muy cuidada y trilingüe (catalán, español e inglés), cómo ha evolucionado a lo largo de siglo y medio.

Se inicia el libro con un capítulo sobre la tabla periódica como icono en el mundo actual, en el que se refleja la química en el contexto de la infografía. Seguidamente, se pormenorizan las pautas a seguir para descifrar una tabla periódica (criterios de ordenación de los elementos, numeración de los grupos, asignación de símbolos para los elementos, códigos de colores y líneas, etc.) y, de gran utilidad práctica, se ilustra cómo se puede datar de forma aproximada una concreta. Tras exponer los inicios de la tabla periódica en Cataluña, se dedica un capítulo a la de la plaza de la Universidad de Barcelona; un mural de valor histórico y artístico (inspirado en el modelo de tabla de Von Antropoff), de cuando la sección de Química de la Facultad de Ciencias se ubicaba en el edificio histórico de la Universidad. Tanto esta tabla como una mesa para demostraciones fueron acciones tomadas en 1933 por iniciativa, entre otros, del profesor Antonio García Banús, para crear un auditorio de Química General. Como mural más reciente, se destaca el realizado por Eugènia Balcells como homenaje a los elementos a partir de sus diferentes espectros de emisión; curioso ejercicio de contemplación artística en equilibrio con un sentido didáctico: “Los elementos de la tabla periódica no tienen solo un nombre y un peso atómico, sino que también responden a su agitación emitiendo un espectro de luz que permite distinguirlos unos de otros”. El capítulo más extenso, sobre pósteres de la tabla periódica que se encuentran por distintos pasillos y estancias de la Universidad, se inicia con la de Lohrig (1932), donde se señalan con un punto los elementos más abundantes; se dedica un apartado especial a la ya citada, conocida como García Banús, restaurada en 2008 y, seguidamente, se ilustran y explican varias decenas



de tablas, tanto científicas como de curiosidades (de gran variedad) e, incluso, de tipo humorístico, incluyendo una con códigos digitales QR y otras de “bolsillo”, tan usadas por estudiantes durante generaciones. La obra finaliza con un capítulo sobre otros murales alegóricos de la química existentes en la Universidad de Barcelona, otras tablas interesantes de distintos centros de Cataluña, y un texto alegórico del profesor David Jou donde, por ejemplo, se expresa de forma poética: “Miradlos: aquí, los ladrillos del mundo, alineados en pisos, en estantes, repitiendo regularmente propiedades, delatando una estructura más profunda”.

En resumen, 263 páginas de gran rigurosidad científica e histórica, con una delicada calidad visual, que seguro harán las delicias de profesores, científicos, estudiantes, y público en general, tanto en el contexto del “Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos” como en el futuro.

GABRIEL PINTO CAÑÓN

Grupo Especializado de Didáctica e Historia  
de las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química

# La forma del agua

Javier de Mendoza

Aunque el agua no tenga forma, pues entre 0 y 100°C es un líquido que se adapta al recipiente que la contiene, es una molécula única y especial, casi mágica, fruto de su increíble red de enlaces de hidrógeno, y no sólo por la belleza de ríos, lagos y mares, o por su relevancia en los procesos vitales. De ahí la forma poética con la que solemos referirnos a ella.

Para casi todos, la forma del agua es el título de una película de Guillermo del Toro que ganó varios premios Oscar en 2017, además de Baftas, Leones y Globos de oro diversos. En ese caso, el nombre español del film es fiel traducción de su original en inglés (*The Shape of Water*), ya mis lectores saben de mi campaña contra las traducciones de fantasía. Pero también tengo que añadir que el nombre de esa película es un plagio, tal como suena, pues el escritor Andrea Camilleri, recientemente fallecido, nombró *Forma dell'acqua* en 1994 a la primera de sus divertidas novelas cortas sobre el famoso comisario Montalbano. Lástima que, por muy popular que sea Montalbano, no pueda competir con la apisonadora de Hollywood.

Pero no es de películas ni plagios de lo que he venido hoy a escribir aquí, sino de inundaciones, de triste actualidad. Como ya tengo una edad, he vivido recurrentemente la misma secuencia, desde mis primeros recuerdos de la riada del Turia de 1957 (la *riuà*, 81 muertos), pasando poco después por las inundaciones del Vallés de 1962 (entre 600 y 1.000 fallecidos), que viví en primera persona, o las más recientes de Sant Llorenç de Cardassar en Mallorca (13 muertos), cerca de donde paso parte del verano, para terminar con la gota fría (ahora se llama DANA), que ha acabado con la vida de al menos 7 personas en el levante y sudeste de la península. He escrito deliberadamente secuencia, porque en toda catástrofe natural hay que analizar de forma diferenciada lo que ocurre antes, durante, y después del fenómeno, aunque todas esas fases estén directamente relacionadas. Comenzaré por las dos últimas, y acabaré por la primera, a mi juicio la más importante por ser la más descuidada.

En una catástrofe, ocurra donde ocurra, se viven las más emotivas expresiones de solidaridad, generosidad y entrega de los seres humanos. Todos quieren ayudar y lo hacen a menudo de forma improvisada y no siempre

acertada, pues no han sido instruidos para ello ni tienen las herramientas necesarias. Es cierto que los japoneses de Fukushima, silenciosos y obedientes, no reaccionaron igual que los mediterráneos de las riadas, de sangre más cálida, pero la abnegación de todos resulta impresionante. No es de extrañar que acaparen las imágenes de los medios de comunicación, con vecinos formando cadenas provistos de cubos, otros esperando ayuda encaramados a un tejado o la copa de un árbol, o el típico viejito mostrando con su brazo levantado el nivel que alcanzó el agua en el salón de su casa. Menos emoción me producen las imágenes de responsables políticos enfundados en sus anoraks de capitán Pescanova, siempre de colores vivos y llamativos, o siguiendo los acontecimientos desde el aire, con enormes cascos de audio sobre las orejas, mientras atienden las explicaciones que les prodigan miembros de la cadena de mando rodeados de mapas. Como tampoco me atraen las imágenes de famosos con una pala sacando barro, muy loables si no fuera porque casi siempre lo hacen frente a una cámara.

Luego, a medida que pasa el tiempo, todo se va olvidando y la vida regresa poco a poco a su rutina, mientras los medios dejan paulatinamente de hablar del tema... hasta la siguiente catástrofe, en donde salen a relucir las quejas de los antiguos afectados que siguen esperando las ayudas que les prometieron. ¿Por qué todo va tan lento? Los vecinos a Sant Llorenç de Cardassar nos acaban de recordar que ahora, un año después de la riada, en Madrid empiezan a tramitar las órdenes finales de la ayuda del 50% que acordaron en su día. El otro 50%, a cargo de entidades locales y autonómicas, se abonó al parecer con prontitud, tal vez por su cercanía y mayor riesgo electoral. Sin embargo, es llamativo que nunca se investigue, persiga ni condene a los responsables que en su día permitieron edificar, aguas arriba de los pueblos afectados, o sobre los propios cauces de los torrentes, construcciones que, actuando como represas, provocaron al romperse las súbitas avenidas mortales. Hace pocas semanas se extrajeron del caudal de la riera de Palma varias toneladas de plásticos, residuos, cañas y ramas e inmediatamente comenzó un debate sobre qué administración entre las varias existentes debía hacerse cargo del pago de la factura. Sería de agradecer que el tema estuviera ya zanjado, y que los cauces se limpiaran anualmente con la misma regularidad con la que el camión de la basura pasa cada día por nuestro barrio, pero en este país de reinos de taifas la cosa es más complicada, e imagino que nadie querrá limpiar el año próximo si la situación no se aclara. Cuando las inundaciones del Vallés y la *riuà* valenciana, se ordenó y ejecutó la canalización de los cauces y los desvíos oportunos, como ocurrió con el Turia, y (claro) nadie discutió quién pagaba. Desde entonces se han mitigado mucho las catástrofes en esas zonas. Para más inri, en las Islas Baleares hemos sabido hace poco de informes técni-



J. de Mendoza

Catedrático jubilado de Química Orgánica  
(Universidad Autónoma de Madrid).  
Profesor Emérito, Instituto Catalán de Investigación Química  
(ICIQ, Tarragona).  
C-e: [jmendoza@iciq.es](mailto:jmendoza@iciq.es)



cos, perdidos por los cajones de la administración, sobre los torrentes y rieras de riesgo existentes, entre ellas la de Sant Llorenç, sin que nadie nos haya dicho todavía quién los guardó ni por qué ni se difundieron adecuadamente no se hizo nada.

Y así entramos en el apartado más relevante, el de la prevención. Al igual que sobre el fin de la vida, no sabemos el día ni la hora, pero hay dos cosas sobre las inundaciones que no ofrecen ninguna duda. La primera es que ignoramos dónde las DANAS atacarán, pero sabemos que lo harán, y cada vez con mayor frecuencia e intensidad, dado el progresivo calentamiento de los mares. La segunda certidumbre resulta una obviedad: el agua ocupará siempre los rincones y las cotas más bajas adonde pueda llegar. En otras palabras, se sabe el camino que seguirá y donde se instalará. Además de mantener los cauces limpios y canalizar ríos y arroyos, sería crucial que todos conociéramos con más precisión los riesgos de inundación de los lugares que habitamos. Para ello concluyo con una idea, una de mis clásicas “genialidades”, pero que me permite de paso retomar el tema del título de hoy: invito a alguien de los que saben de esas cosas a que desarrolle

una herramienta informática sencilla, descargable gratuitamente en el móvil, que nos anticipe dónde irá a parar el agua que descargue en cualquier punto o zona de una cuenca de nuestro país. El usuario sólo tendría que marcar la intensidad de la precipitación a evaluar, en litros por metro cuadrado, señalar en la pantalla la zona deseada y el programa iría mostrando sobre el mapa la distribución del agua caída en intervalos de tiempo establecidos, una hora, seis horas, un día, etc. Probablemente esos datos los tienen ya los expertos, pero la gente ordinaria no los conoce. Con esa aplicación, todos, gobierno, ayuntamientos y particulares podrían incluso “jugar” a modificar el relieve, mediante muros, represas o excavaciones y comprobar inmediatamente el dibujo resultante sobre el mapa, ayudando a tomar iniciativas e implicando así en el tema a todos los afectados. Existen ya mapas con topologías bien detalladas, y aunque no tengo ni idea de geodesia, topografía o programación informática, intuyo que sería relativamente sencillo implementar un sistema así. He decidido bautizarlo como *Watershape Predictor (WSP)*, pues con él podríamos por fin hablar con más propiedad de la forma del agua.

¿Quieres ser socio de una de las sociedades científicas más importantes de España?



Si tienes menos de 25 años, hazte socio de la RSEQ por 5 EUR

  
Real Sociedad Española de Química  
[www.rseq.org](http://www.rseq.org)

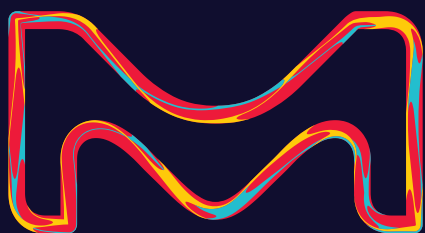
# illuminated synthesis

**From discovery to scale-up:**  
Photoreactors and catalysts to deliver  
consistency and reproducibility to your research.

Chemists have long struggled with reproducibility in photoredox catalysis. Both varied reaction setups and individual reactions performed with the same setup can be tricky. Our new labware seeks to alleviate these issues by providing photoreactors for each stage of reaction development while ensuring high levels of consistency across reactions and between runs.

When combined with our broad portfolio of iridium and ruthenium catalysts and acridinium-based photocatalysts, these tools free synthetic chemists to focus on their next breakthrough.

To view our complete portfolio offering visit,  
[SigmaAldrich.com/photocatalysis](https://SigmaAldrich.com/photocatalysis)



© 2019 Merck KGaA, Darmstadt, Germany and/or its affiliates.  
All Rights Reserved. Merck, Sigma-Aldrich, and the vibrant M are  
trademarks of Merck KGaA, Darmstadt, Germany or its affiliates.  
All other trademarks are the property of their respective owners.  
Detailed information on trademarks is available via publicly  
accessible resources.

2018-18261 02/2019

The life science  
business of Merck  
operates as  
MilliporeSigma in the  
U.S. and Canada.

**Sigma-Aldrich®**  
Lab & Production Materials