



Anales de Química de la RSEQ

Revista editada en Madrid por la Real Sociedad Española de Química

Editor General

Miguel Ángel Sierra
Universidad Complutense de Madrid

Comité Editorial

Fernando P. Cossío
Universidad del País Vasco y DIPC San Sebastián-Donostia

José Manuel Costa
Universidad de Oviedo

Óscar Millet
CICbioGUNE, Derio, Bizkaia

Gabriel Pinto
Universidad Politécnica de Madrid

M.^a Carmen Redondo
Colegio Estudio, Madrid

Elena Sáez
Universidad Complutense de Madrid

Miquel Solà
Institut de Química Computacional i Catàlisi, Universitat de Girona

Rolando A. Spanevello
Universidad Nacional de Rosario, Argentina

Joaquín Tamariz
Instituto Politécnico Nacional, México

Alejandro Toro-Labbé
Pontificia Universidad Católica de Chile

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

Otilia Val-Castillo
IES Lluís Simarro Lacabra, Xàtiva, Valencia

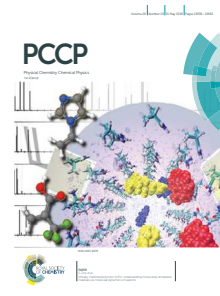
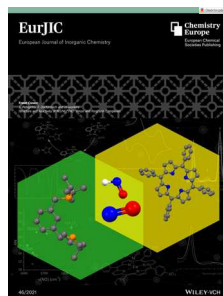
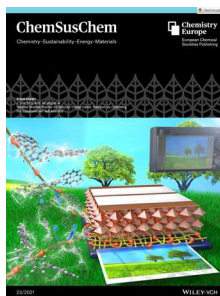
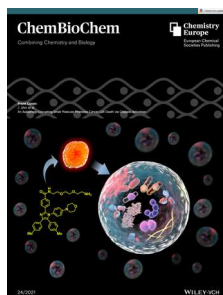
Secretaría Editorial

Patricia Yáñez-Sedeño
Real Sociedad Española de Química
Facultad de Ciencias Químicas. UCM
28040, Madrid

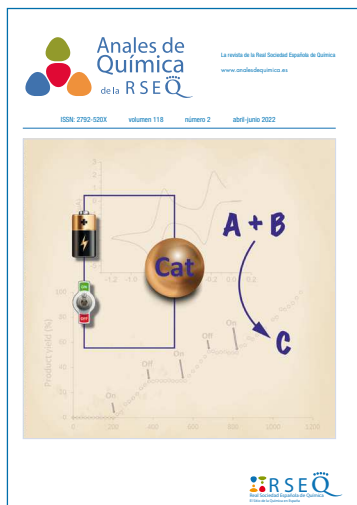
www.analesdequimica.es
administracion@analesdequimica.es



Revistas patrocinadas por la Real Sociedad Española de Química



Sumario



Composición:
Palabra de apache

An. Quím., 118 (2), 2022, 69-145
 ISSN: 2792-520X
 e-ISSN: 2792-5250
 D. L.: M-232-1958

| | |
|--|-----|
| Editorial | 72 |
| Miguel Ángel Sierra | |
| Carta del presidente | 74 |
| Investigación Química | |
| Catalizadores con ligandos conmutables-rédox: una buena herramienta para elucidar mecanismos de reacción | 75 |
| Macarena Poyatos, Sergio Gonell, Susana Ibáñez y Eduardo Peris | |
| Enseñanza de la Química | |
| El Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para la enseñanza y la divulgación | 86 |
| Gabriel Pinto | |
| Vídeo-Tabla Periódica: una herramienta educativa desarrollada por alumnos y profesores | 90 |
| Alberto Aguayo Díaz y Covadonga Gutiérrez | |
| De la pila Bagdad a una pila con un sacapuntas y una mina de lápiz, pasando por la pila Daniell y la pila de Volta | 96 |
| Josep Corominas y Aureli Caamaño | |
| Historia de la Química | |
| Centenarios de la Primera Conferencia Solvay de Química y del fallecimiento de Ernest Solvay | 103 |
| Gabriel Pinto Cañón y Manuela Martín Sánchez | |
| Crónicas del Antropoceno: el siglo del tetraetilo de plomo | 110 |
| Gabriela A. Vázquez Rodríguez | |
| 100 años del experimento Stern-Gerlach | 118 |
| Jorge Santoro | |
| Noticias | 125 |
| Artículos reseñables | 140 |
| Reseñas | 141 |
| Radicales (muy) libres | 144 |

EDITORIAL

Miguel Á. Sierra

Estoy confundido (un poco más de mi natural ser). Por todas partes se habla de “fomento a la investigación”, “plan de recuperación, transformación y resiliencia”, “Reforma de la Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación” y otras muchas medidas del más variado pelaje. Como soy muy simple todo esto se traduce en inyectar pasta en el sistema, según unos criterios que pueden ser más o menos discutibles, pero es dinero, al fin y al cabo. La cuestión es si esto va a servir para algo. Me explico ¿Puede un coche con el motor gripado moverse y acelerar por mucho que le pongamos gasolina? Claramente no.

Hace ya unas cuantas editoriales decía con alegría ¡Me han auditado! Y lo hicieron. Vaya si lo hicieron. Como ocurre con cualquier acción se produce siempre una reacción. Gracias al genio que diseñó el sistema de auditorías con el fin de recuperar unos euros, basándose en la premisa de que todos los investigadores somos culpables mientras no se demuestre lo contrario, las universidades y centros públicos de investigación han entrado en un estado que en psiquiatría se denomina catatonía (lo he mirado en la “wiki” y significa “síndrome neuropsiquiátrico caracterizado por anomalías motoras, que se presentan en asociación con alteraciones en la consciencia, el afecto y el pensamiento”), y terror pánico (esto no lo he mirado, me cayó en un examen y significa terror extremo, y es un miedo grande, un temor excesivo, o una cobardía extrema).

La universidad española y los organismos públicos de investigación (OPIs), como cualquier ente que compite por unos recursos escasos, lucha a muerte por conservar su dinero, que, en este caso no es suyo, sino que lo recibe gracias a que los investigadores se parten la espalda para conseguirlo. Esto último no importa ya que, para el sistema público de investigación, los investigadores solo son necesarios para su propia supervivencia, como aquellos parásitos buenos que dan a su huésped elementos esenciales y que, por eso, el sistema inmune del huésped los tolera. ¿Qué ocurre, si por un cambio



en las reglas de juego le quitan a la universidad o a los OPIs dinero que no es suyo pero que gestionan? Como cualquier ente irracional reacciona de forma impredecible, y, puesto que el investigador es el eslabón más débil del sistema, esta reacción nos ataca directamente. Extraño, ¿verdad? Porque el investigador es quien genera los fondos que hacen que la universidad y los OPIs sobrevivan, y sin ellos no habría universidades ni OPIs. Habría institutos de enseñanza terciaria.

Pues esta analogía biológica sirve para explicar lo que ha sucedido. Gracias a las auditorías y a que la Universidad y OPIs han tenido que devolver fondos “mal ejecutados” según los auditores, empresas privadas con poca relación con el mundo de la investigación, nuestros centros de trabajo han multiplicado por cien sus requisitos para que los investigadores puedan gastarse su dinero. En otros tiempos, tramitar un viaje, conseguir una habitación de hotel, comprar un reactivo o incluso un paquete de folios era tan sencillo como disponer del dinero, una solicitud que, en muchos casos era a posteriori, y asunto concluido. Y ya entonces nos parecía una pesadilla. ¡Que equivocados estábamos! Puesto que mi universidad en la más grande del país, voy a poner dos ejemplos

del protocolo a seguir para comprar un ordenador y solicitar una noche de hotel para asistir a un congreso. Por supuesto, debe quedar claro que estamos hablando de gastarnos un dinero que hemos conseguido en una convocatoria pública nacional o internacional. Pues bien, supuesto que ya sé el ordenador que quiero, tengo que rellenar un papel y enviarlo a los servicios informáticos que dan el visto bueno *sí y solo sí* está incluido en los catálogos de los proveedores de la universidad. El proveedor manda un presupuesto y finalmente, si lo acepta el organismo económico competente, unas semanas después llega el ordenador. Por el camino, cuatro impresos a rellenar y un coste 20-30% (estoy siendo conservador) más caro que en el mercado libre. Si el artículo a comprar no está en el acuerdo Marco (el celebre acuerdo Marco) la cosa se complica con el consiguiente aumento del papeleo, y, si quieres un equipo *ad hoc* porque lo necesitas se acabó.

Solicitar una noche de hotel es todavía más esperpéntico. Tienes que hacer la solicitud a tres de las agencias de viajes que trabajan con la universidad y, si hay suerte te consiguen una habitación en la pensión la Trucha, porque con las dietas que te dan para pernoctar no da para más. Ojo, por el camino son seis impresos más. Por supuesto, luego tienes que justificar que has ido a la pensión la Trucha que puede estar en Múnich (Forelle Fremdemzimmer) y no vale con la factura, te piden justificante de pago y posiblemente en unos meses (el sistema es dinámico, cambia de mes a mes) un juramento de sangre sobre una servilleta del hotel.

Cualquiera que trabaje en un centro público de investigación sabe que no estoy exagerando más que un poquito. Ni que decir tiene que con las dietas que el Ministerio considera suficientes, la pensión la Trucha es a lo más que puede aspirar el humilde investigador. Tampoco nos hace falta más ¿no os parece? Pasar unas cuantas calamidades siempre es bueno para aguzar el ingenio, y sin lugar a dudas una pensión con unas cuantas cucarachas es el lugar apropiado. Pensad en el abate Faria que era experto en todo tipo de disciplinas científicas y como se las apañó no solo para sobrevivir en el trullo de If, sino para que se escapara Edmundo Dantes, tesoro incluido. Eso sí, el pobre abate se murió por el camino.

Que la investigación no es un sendero de rosas lo sabemos todos los que nos dedicamos a este negocio. Pero sería bueno que nuestros queridos gestores se dieran cuenta de que no se trata de dormir en el Waldorf Astoria (otro día os digo cómo se puede justificar que has dormido en Nueva York sin volar primero a Estados Unidos, es divertido pero largo de contar), sino en un sitio digno, no solo para nosotros sino para los visitantes nacionales y extranjeros que caen de vez en cuando por aquí. Vamos que, entre las peleas para conseguir que te acepten una factura, o un billete de avión, justificar que has ido a una reunión científica en un sitio que está a 100 km de tu casa en coche y que no has necesitado echar gasolina (por lo que el viaje es injustificable, aunque presentes y te paguen las noches de hotel), reclamar pagos atrasados, justificar que los cinco litros de etanol son para investigar y no te los has bebido y otras historias, el tiempo que

un investigador tiene para hacer algo productivo es un 40% del tiempo que está trabajando. No me digáis que no suena a cachondeo cuando te firman una solicitud de un proyecto en el vicerrectorado de investigación diciendo que la universidad se compromete a facilitar la ejecución del proyecto.

Y ya el colmo de los colmos, el material de papelería no es justificable frente al Ministerio. Afortunadamente, con los ordenadores y las pantallas modernas cada vez imprimimos menos, pero, lo mejor de todo es que luego te piden un ejemplar en papel. Esto tiene que tener alguna relación con la transustanciación de la letra electrónica en la letra en papel sin comprar el folio antes. Aquí en Madrid, estas compras se hacen en una central de compras nada menos que de la Comunidad de Madrid. Yo la última vez que me quise comprar un roller de 2 euros desistí. Me fui a la papelería y puse los dos euros de mi bolsillo. Nunca los he recuperado y no creáis que no me duele.

Cuando el mundo era joven y yo también, le pregunté a Lou Hegedus cómo gestionaban los fondos de la NSF (en aquel momento de unos 1.500.000\$ solo de un proyecto, y es que en Estados Unidos se pueden pedir varios proyectos al mismo tiempo y encima, si son buenos te los financian). Me miró como si fuese un extraterrestre y me dijo, “yo elijo un banco y me ingresan allí los fondos, no tengo que dar explicaciones, solo la justificación final de gastos”. Vamos, como aquí, que tienes que demostrar tu inocencia porque culpable ya eres. La diferencia es muy simple, allí si haces algo raro te ponen en la lista negra y no vuelves a tener financiación nunca más, eso sí, por el camino aparece el FBI y acabas en Sing Sing. Aquí te dan un tirón de orejas y te dicen “nene malo, no vuelvas a hacerlo”. Mientras tanto relléname estos tres impresos y que no se te olvide el ticket de gasolina (no se si valdría como justificación una cucaracha de la pensión la Trucha).

Esta editorial parece más un guion de una película de los Hermanos Marx llevado al absurdo. Pero es la realidad de un sistema de investigación gripado por la burocracia, la desconfianza en el investigador, un sistema de gestión sobredimensionado, absurdo y decimonónico. Y no olvidemos que ahora tenemos Excel y, adicionalmente, te piden un Excel con horas trabajadas, gastos, etc. Que metan unos cuantos millones en el sistema está realmente bien. Que en estas condiciones va a servir para bastante poco parece obvio. Que se puede hacer de otra forma, seguro. Nuestros gestores no tienen que irse muy lejos, solo tienen que mirar a los sistemas de investigación paralelos que tiene este país y que, mira por dónde, sin prácticamente papeleo funcionan. No es que vaya a servir de mucho, pero me niego a aceptar que soy culpable y tener que demostrar mi inocencia, día a día y euro a euro.

Gracias por leer

MIGUEL A. SIERRA
Editor General de Anales de Química.

Carta del Presidente

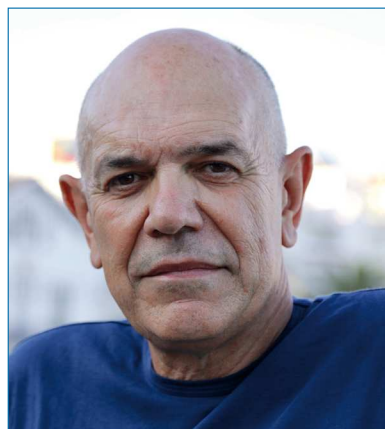
Antonio M. Echavarren

El pasado 30 de mayo tuve la oportunidad de participar en el evento "Honour Science & Chemistry", en el que un grupo de profesores y estudiantes de química europeos junto con líderes de la industria, fuimos invitados por la European Association for the Chemical Industry (Cefic) a recordar la famosa foto de la conferencia Solvay de 1927 en el Hotel Metropole de Bruselas, que reunió a personalidades del nivel de Einstein, Curie, Planck, Schrödinger, Bohr, Heisenberg, Langmuir y Debye, entre otros.

La parte central de la reunión consistió en una discusión de varios temas en una sesión moderada por Stephen Sakur, presentador del programa de la BBC HARDtalk. La cuestión principal que se planteó fue qué química contribuiría a cambiar nuestro futuro para alcanzar los objetivos del Green Deal. Aunque esta pregunta admite respuestas diversas, todas seguramente convergen en la invención de procesos que sean ambientalmente más sostenibles que los actuales, lo que incluye también el desarrollo de fuentes de energía cuyo impacto sobre el medio sea mínimo.

Alcanzado rápidamente ese consenso, el debate, si bien superficial dado el formato, se enfocó hacia los grandes retos a los que se enfrenta la investigación Química en los próximos 20-30 años. La discusión sobre este punto sería interminable y cada uno de nosotros, dependiendo de su formación propondría objetivos distintos. Personalmente, como ya he hecho en otros foros al tratar de responder a la pregunta de en qué dirección se mueve la Química, argumentaría que, parafraseando una reflexión formulada hace 50 años en el contexto de la síntesis orgánica por Gilbert Stork, profesor de la Universidad de Columbia fallecido en 2017, nuestra disciplina se comporta "*more like a glacier that gradually moves forward until it is has been finally covered an entire región*" y, que en ese frente del glaciar se encuentran bien representadas las distintas áreas en las que, por conveniencias pedagógicas, venimos a subdividir la Química. Es decir, por su propia naturaleza de ciencia central, la Química no se mueve en una única dirección sino en muchas, como cualquiera que lea regularmente las revistas generales más importantes puede constatar.

Ahora bien, ¿en todo lo anterior hay ideas suficientemente atractivas para captar la atención de los jóvenes a la hora de escoger Química como carrera? No hay duda que estos retos son científica y tecnológicamente formidables y obligarán a descubrir nuevas transformaciones, reinventando buena parte de los procesos industriales. Bien formulados,



pueden contribuir a despertar la vocación por la investigación en Química en los más jóvenes. A estos retos habría que añadir otros también apasionantes, aunque sean de interés más fundamental, como el comprender el origen de la vida en la tierra, la síntesis de sistemas autorreplicantes e, incluso, la creación de vida artificial.

Para abordar todos estos objetivos necesitamos atraer a los mejores estudiantes, presentando a la Química como la ciencia fascinante que es. En esta tarea, el papel de los profesores preuniversitarios es fundamental. Desde la RSEQ tenemos que poner un especial énfasis en ese colectivo, continuando el trabajo que se viene haciendo desde hace años por el grupo de Didáctica e Historia de la Física y la Química, reforzado en la actualidad por la nueva organización de las Olimpiadas de Química en sus fases locales, nacional e internacionales. En esta línea, la primera cuestión que se planteó en la discusión del 30 de mayo en el Hotel Metropole durante la reunión Cefic fue la de señalar qué figura de la Química del pasado destacaríamos como ejemplo para las generaciones futuras. Surgieron nombres como Emil Fischer, Robert Woodward y otros, pero al final la que recibió todos los aplausos de los participantes fue la propuesta de un estudiante que destacó a los profesores de Química preuniversitarios como esas figuras ejemplares e influyentes decisivas para el futuro de nuestra ciencia.

ANTONIO M. ECHAVARREN

Presidente de la Real Sociedad Española de Química

INVESTIGACIÓN
QUÍMICA



M. Poyatos¹

S. Gonell¹



S. Ibáñez²

E. Peris¹

Institute of Advanced Materials (INAM)
Centro de Innovación en Química
Avanzada (ORFEO-CINQA)
Universitat Jaume I
Av. Vicente Sos Baynat s/n
Castellón E-12071
C-e: eperis@uji.es
Recibido: 14/02/2022
Aceptado: 31/03/2022
ORCID: 0000-0001-9022-2392

Catalizadores con ligandos conmutables- rédox: una buena herramienta para elucidar mecanismos de reacción^[1]

Macarena Poyatos, Sergio Gonell, Susana Ibáñez
y Eduardo Peris 

Resumen: Durante las últimas décadas, los ligandos con propiedades conmutables han demostrado su utilidad como herramientas eficaces para modificar las propiedades electrónicas de los complejos de transición al responder a un estímulo introducido en el medio de reacción. En particular, los complejos con ligandos conmutables-rédox tienen la capacidad de cambiar la acidez de Lewis del complejo mediante procesos de oxidación/reducción, sin que las propiedades estéricas del ligando original se vean alteradas. Esta propiedad es particularmente interesante, ya que permite modular la actividad de los catalizadores de forma controlada, e incluso puede ayudar a elucidar aspectos mecanísticos importantes de algunas reacciones catalíticas.

Palabras clave: Química organometálica, catálisis homogénea, catalizador conmutable, mecanismos, reversibilidad rédox.

Abstract: During the last decades, ligands bearing switchable features have emerged as an effective tool to modify the properties of the transition metal complexes upon introduction of a stimulus in the reaction media. In particular, complexes featuring redox-switchable ligands have the ability of changing the Lewis acidity of the complex upon oxidation/reduction, leaving the original steric properties. This feature is particularly interesting because it can be used to modulate the activity of molecular catalysts, and even to shed light into mechanistic aspects of selected catalytic reactions.

Keywords: Organometallic chemistry, homogeneous catalysis, switchable catalyst, redox-reversibility, mechanism.

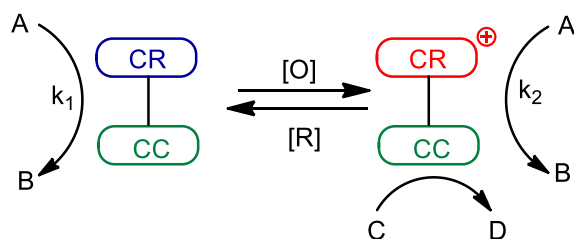
1. Catalizadores conmutables rédox: ¿Inocentes o culpables?^[2]

Las propiedades químicas de un complejo de un metal de transición pueden ser moduladas escogiendo cuidadosamente los ligandos de su esfera de coordinación. En general, todos los ligandos juegan un papel de gran importancia ya que determinan la reactividad del complejo en disolución, estabilizan estados de oxidación concretos y definen el tamaño y la forma de los huecos catalíticos (o 'catalytic pockets', según su definición en inglés). Una vez que los ligandos han sido escogidos, el entorno de coordinación del catalizador queda fijado, lo cual determina la actividad y la selectividad que éste tenga en una reacción catalítica concreta. Las propiedades de un catalizador pueden modificarse posteriormente si alguno de los ligandos presenta una funcionalidad adicional que pueda modificar sus propiedades como respuesta a un estímulo externo.^[3] Las funcionalidades más utilizadas para modular las propiedades del complejo son aquéllas que pueden responder a estímulos como el pH, enlaces de

hidrógeno, luz y procesos rédox. La presencia de ligandos que sean capaces de modificar sus propiedades (estéricas o electrónicas) como respuesta a un estímulo externo proporcionan un nivel de control sobre el catalizador que en muchos casos permite facilitar reacciones que son difíciles de realizar con catalizadores tradicionales y, por tanto, proporcionan un mayor nivel de adaptación del catalizador para necesidades específicas. La idea que subyace es que el ligando y el metal colaboren de forma sinérgica, de forma que esta colaboración facilite una determinada reacción. En el caso de los catalizadores conmutables (*switchable*),^[4] la desaparición del estímulo hace que el catalizador revierta a la situación inicial y, por tanto, que recupere su actividad original. En la literatura podemos encontrar catalizadores conmutables frente a estímulos rédox,^[5] luminosos^[6] o de pH.^[7] Los catalizadores conmutables rédox (*redox-switchable*) tienen ligandos que pueden participar en el ciclo catalítico aceptando o cediendo electrones que modifiquen su capacidad electrón-dadora y, por tanto, modificando la acidez de Lewis del metal. Alternativamente, los ligandos conmutables rédox pueden actuar como reservorio de electrones, de modo que el complejo pue-

de almacenar electrones en el ligando para así evitar estados de oxidación particularmente incómodos para el metal. Este último comportamiento es de particular importancia ya que, los metales de la primera serie de transición (generalmente mucho más baratos y abundantes que los del grupo del platino, para los que los procesos rédox de dos electrones son habituales), suelen preferir procesos rédox que involucren un solo electrón. Si el metal y el ligando combinan sus habilidades rédox, en principio, sería posible que los metales de la primera serie de transición participaran en procesos catalíticos multielectrónicos. Esta idea es la que utilizaron Chirik y Wieghardt en 2010 para sugerir que los ligandos conmutables rédox pueden conferir nobleza catalítica a los metales de la primera serie de transición,^[8] en referencia a que este tipo de ligandos puede aproximar la química de los metales de la primera serie a la de los metales nobles, al facilitar para los primeros procesos rédox multielectrónicos.

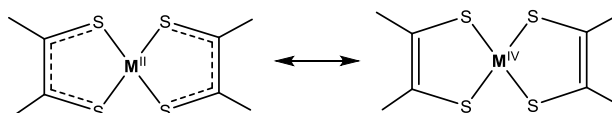
En un proceso típico (Esquema 1), un catalizador conmutable rédox facilita una reacción catalítica (e.g. $A \rightarrow B$) a una velocidad determinada, en el caso de que el centro rédox se encuentre en estado neutro. Sin embargo, al producirse la oxidación (o reducción), la actividad o selectividad del catalizador puede verse afectada ($k_1 \neq k_2$), o incluso puede llegarse a producir una transformación alternativa (e.g. $C \rightarrow D$).



Esquema 1. CR = centro rédox; CC = centro catalítico; [O] = oxidación; [R] = reducción

La presencia de los ligandos rédox conmutables también plantea cuestiones interesantes respecto a la asignación del estado de oxidación del metal. Algunos ligandos conmutables rédox permiten hacer asignaciones inequívocas del estado de oxidación del metal en un complejo. En estos casos el ligando se consideraría *inocente*. Por ejemplo, si oxidamos un complejo $M-L$, en el caso de que el ligando no sea rédox-activo, el producto de la oxidación debería representarse como $M^{+}L$. Por el contrario, si el ligando tiene actividad rédox, la representación más adecuada sería $M-L^{+}$. La realidad es más compleja, porque en cualquiera de los dos casos la oxidación (o reducción) generaría un electrón desapareado cuya probabilidad se extiende a todo el complejo y, por tanto, afecta a la reactividad de todo el sistema. Por esta razón algunos complejos con ligandos rédox conmutables plantean situaciones complejas con respecto a la asignación de los estados de oxidación generados tras el proceso de oxidación o reducción. El ejemplo típico es el de los complejos de níquel, paladio y platino con ligandos de tipo ditioleno descritos por Gray en los años 60.^[9] Para este tipo de complejos la asignación del estado de oxidación del metal depende de que consideremos que el ligando está en

su forma oxidada o reducida (Esquema 2). En estos casos, en los que la coordinación de un ligando con dos posibles estados de oxidación genera ambigüedad en la asignación del estado de oxidación del metal, se dice que el ligando es *no-inocente* (*non-innocent*).^[2, 10] Sin embargo, a pesar de todas estas consideraciones, en muchas ocasiones los ligandos que no tienen comportamiento rédox y que, por tanto, permiten realizar una asignación inequívoca del estado de oxidación del metal (NH_3 , PR_3 , Cl , etc.), se consideran inocentes, mientras que todos los que presentan actividad rédox se consideran *no-inocentes*.^[5d]



Esquema 2. Ejemplo de ligando 'no inocente'. La notación de la izquierda considera que el ligando ditiolato está en su forma oxidada, mientras que en la derecha el ligando se presenta en su forma reducida.

Este artículo de revisión pretende dar una visión general, aunque no exhaustiva, sobre aquéllos catalizadores que presentan ligandos capaces de modular su capacidad electrón-dadora a través de estímulos rédox. El artículo se centrará en describir algunas de las funcionalidades típicas que se utilizan para el diseño de ligandos conmutables rédox. En el último apartado se explica cómo el uso de este tipo de compuestos puede constituir una herramienta muy eficaz para elucidar aspectos relevantes sobre el mecanismo de algunos procesos catalíticos. Evidentemente, a lo largo del texto haremos especial hincapié en algunos ejemplos descritos en nuestro laboratorio recientemente.

2. Estrategias para obtener catalizadores conmutables rédox

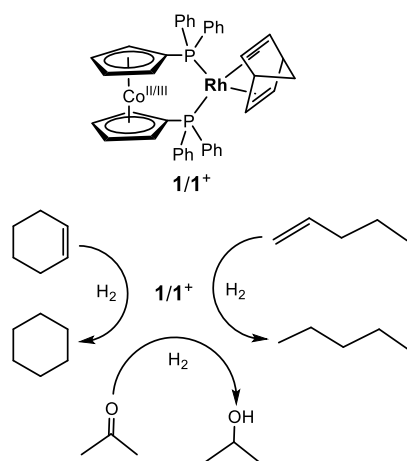
En general, los cambios producidos en la capacidad electrón-dadora de un ligando pueden tener consecuencias de gran importancia en la actividad de un catalizador. Estas modificaciones normalmente se realizan modificando el ligando a través de la introducción de sustituyentes electrón-dadores o electrón-aceptores, lo cual requiere un enorme esfuerzo sintético. Además, normalmente estos cambios vienen acompañados de una modificación de la estructura del ligando que hace que, además de modificar sus propiedades electrónicas, se alteren también sus propiedades estéricas. Esto hace que al evaluar cómo afecta el cambio de un ligando muy electrón-dador por uno menos electrón-dador, nunca tengamos una información completamente fiable de si el resultado es atribuible exclusivamente a cambios electrónicos del ligando, ya que el cambio también afectará a sus propiedades estéricas (además de, con toda probabilidad, a otras propiedades como estabilidad del complejo, solubilidad, etc.).

La utilización de un ligando conmutable rédox permite realizar estos cambios de manera muy sencilla, ya que la acidez de Lewis del metal se puede modular cambiando la

capacidad dadora del ligando a través del estímulo rédox. En este caso, el cambio de las propiedades electrónicas del metal se produce sin que se produzcan alteraciones en su esfera de coordinación, es decir, se modifican las propiedades electrónicas del metal manteniendo inalteradas las propiedades estéricas. Esta situación nos proporciona un escenario excepcional para evaluar de forma *neto* cómo afectan los cambios electrónicos del metal en el proceso catalítico.

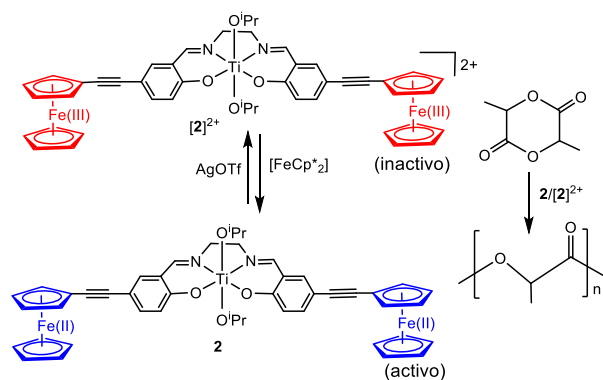
Uno de los primeros ejemplos de utilización de un complejo conmutable rédox en una reacción catalítica consistió en el uso del complejo $[\text{Rh}(\text{dppc})(\text{NBD})]^+$, **1** (dppc = difenildifosfinacobaltoceno; NBD = norbornadieno) en la hidrogenación de olefinas y cetonas (Esquema 3).^[11] En este caso, la funcionalidad que hace que el ligando tenga actividad rédox es el grupo cobaltoceno, que actúa como puente entre los dos átomos de fósforo de la difosfina. El cobaltoceno puede oxidarse a cobalticinio de forma reversible, de forma que constituye una funcionalidad adecuada para construir un complejo conmutable rédox. Los autores observaron que la actividad del catalizador se podía modificar de forma reversible al oxidarlo y volver a reducirlo. En concreto, se observó que el catalizador en su forma reducida (**1**) es más activo que el catalizador en su forma oxidada (**1⁺**). Esta observación es consistente con el mecanismo del proceso catalítico, en el que el paso lento de la reacción (*Rate Determining Step*, RDS) es la adición oxidante de la molécula de hidrógeno al compuesto de Rh(I), para generar un dihidruro de Rh(III). Para facilitar que este paso se produzca, es necesario que el ligando actúe con su máxima capacidad electrón-dadora para aumentar la energía de los orbitales frontera del metal y así facilitar su oxidación. Por el contrario, la forma oxidada del ligando dificulta la oxidación del metal y, consecuentemente, disminuye (o anula) su actividad catalítica al dificultar (o impedir) la adición oxidante de la molécula de hidrógeno.

Muchos de los catalizadores conmutables rédox se basan en la utilización de ligandos que contienen el fragmento ferroceno, debido fundamentalmente a la gran estabilidad del ferroceno y a la facilidad con que se pueden obtener



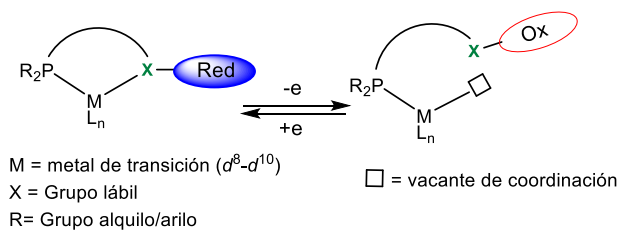
Esquema 3. Uno de los primeros ejemplos del uso de un complejo conmutable rédox en una reacción catalítica. El catalizador reducido (**1**) es más activo que el catalizador oxidado (**1⁺**).

derivados de este compuesto.^[12] Uno de los ejemplos que más se suelen citar en la literatura es el descrito por Gibson y Long en 2006,^[13] en el que se describe cómo el catalizador de polimerización de apertura de anillo (ROMP) de Ti(IV) **2** (Esquema 4) se puede desactivar y activar secuencialmente al oxidarlo y reducirlo los fragmentos ferroceno del ligando. En este caso se observa que el catalizador neutro es significativamente más activo que el catalizador dicatiónico ($[\mathbf{2}]^{2+}$) que resulta de la oxidación de los dos fragmentos ferroceno. La transformación $\mathbf{2} \rightarrow [\mathbf{2}]^{2+}$ se realiza utilizando Ag^+ como oxidante. La posterior reducción $[\mathbf{2}]^{2+} \rightarrow \mathbf{2}$ se realiza utilizando decametilferroceno ($[\text{FeCp}^*_2]$).



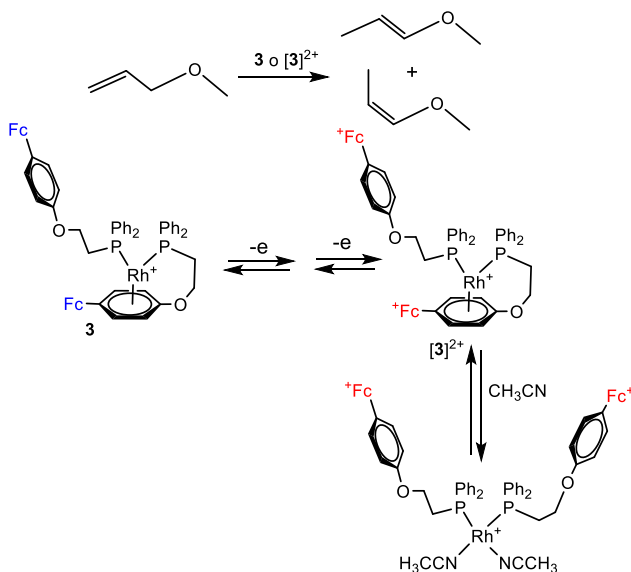
Esquema 4. Catalizador redox conmutable de Ti(IV) para la polimerización de apertura de anillo.

Pese a las características únicas que poseen, muchos ligandos con actividad rédox presentan serias limitaciones. La gran mayoría de ligandos con actividad rédox descritos hasta la fecha son bi- o multidentados, lo que, por una parte, conduce a complejos metálicos más estables, pero restringe significativamente el tipo de simetría que pueden presentar y requiere la utilización de más de una posición de coordinación (lo que puede condicionar la activación del catalizador). Esta limitación fue abordada de forma muy elegante por Rheingold y Mirkin, al diseñar una serie de ligandos de tipo redox-hemilábil.^[5a, 14] Este tipo de ligandos combina la función conmutable rédox con un brazo hemilábil, de tal forma que la labilidad de este brazo se controla ajustando el estado de oxidación del fragmento activo rédox. Tal como se muestra en el Esquema 5, la oxidación del ligando en el compuesto inicial, hace que éste modifique su coordinación de quelato a monodentado, abriendo una vacante de coordinación que puede ser muy útil para la activación del catalizador.



Esquema 5. Funcionamiento de un compuesto con un ligando redox-hemilábil.

A pesar de que la idea que representa la apertura de una vacante de coordinación a través de un estímulo rédox parecía muy prometedora, la realidad es que existen muy pocos ejemplos de su aplicación en reacciones catalíticas. Uno de los ejemplos más representativos del uso catalizadores con ligandos de tipo rédox hemilábil lo constituye la utilización del compuesto **3**, que se utilizó para la isomerización de etilalil éter a *cis*- y *trans*-1-propenil éter, tal como se muestra en el Esquema 6.^[15] En esta reacción, el compuesto **3** es muy activo, pero su actividad se incrementa considerablemente cuando los dos fragmentos ferrocenilo se oxidan para generar **[3]²⁺**. El aumento de la actividad del compuesto dioxidado se atribuye a la mayor labilidad de la fosfina cuando el compuesto neutro **3** se oxida para generar **[3]²⁺**.



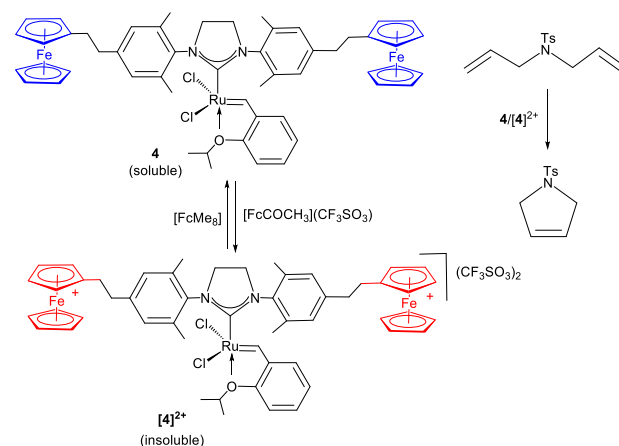
Esquema 6. Ejemplo de la utilización de un compuesto con un ligando rédox-hemilábil en catálisis. El compuesto dioxidado **[3]²⁺** es más activo en la reacción de isomerización debido a que el ligando es más lábil que en el compuesto neutro **3**.

Otras limitaciones habituales de los ligandos conmutables rédox son las asociadas a su poca tendencia a coordinarse al metal, o a su incapacidad para provocar cambios electrónicos significativos en el centro metálico una vez modificado el estado de oxidación del centro rédox. Además, algunos complejos presentan un comportamiento químico irreversible, lo que también limita el uso de este tipo de ligandos. Por todos estos motivos, el desarrollo de nuevos ligandos con actividad rédox podría ayudar a superar estas limitaciones.

Los carbenos N-heterocíclicos (NHCs, según sus siglas en inglés), han sido reconocidos como una herramienta fundamental en el diseño de catalizadores homogéneos.^[16] La capacidad de los NHCs para adaptarse a los requerimientos específicos para el diseño de catalizadores más activos y más selectivos les ha llevado a ser calificados como *SMART-ligands*, siendo SMART el acrónimo de *Switchable, Multifunctional, Adaptable* o *Tunable*,^[16a] y que refleja muy bien la capacidad de adaptación de los NHCs frente a los requisitos específicos de cada reacción catalítica. Como ejemplo de esta adaptabilidad, du-

rante los últimos años podemos encontrar muchos ejemplos de ligandos conmutables rédox basados en NHCs.^[17] Las ventajas que presentan los NHCs frente a otros ligandos son, fundamentalmente, su gran versatilidad coordinativa, la estabilidad que confieren al complejo una vez coordinados, y la facilidad con que este tipo de ligandos pueden ser sintetizados, lo que implica que pueden dar acceso a una gran variedad de geometrías y a la introducción de numerosos grupos funcionales. En general, los ligandos conmutables rédox basados en NHCs no suelen generar situaciones de ambigüedad con respecto a la asignación del estado de oxidación del metal al que se coordinan, por lo que suelen estar clasificados como *inocentes*.

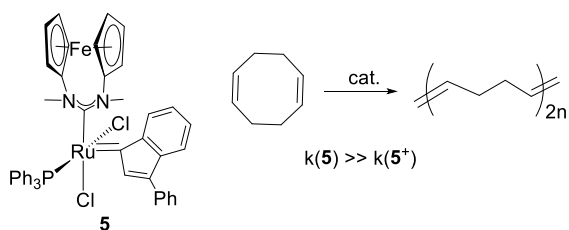
El primer ligando con actividad rédox basado en un NHC fue descrito por Plenio en 2005.^[18] Además, éste fue el primer compuesto con un ligando de tipo NHC con propiedades rédox en utilizarse en un proceso catalítico. Se trata de un catalizador de tipo Grubbs-Hoveyda de rutenio con dos fragmentos ferrocenilo que actúan como centros rédox (**4**, en el Esquema 7). La oxidación de los ferrocenilos genera un compuesto muy insoluble, que recupera su solubilidad al ser reducido a su forma original. Este catalizador fue probado en la reacción de metátesis de cierre de anillo (Ring-Closing-Metathesis, RCM), y se demostró que el catalizador se podía desactivar y activar secuencialmente y de forma reversible al pasar de la forma neutra **4** a la doblemente oxidada **[4]²⁺**.



Esquema 7. Catalizador de tipo Grubbs-Hoveyda con un ligando NHC conmutable rédox. Sólo el compuesto neutro (**4**), es activo en la reacción de RCM.

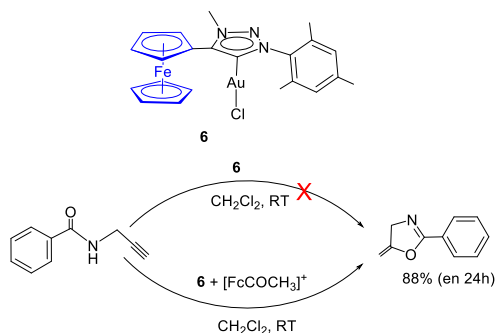
Sin duda, el grupo de Bielawski ha sido uno de los más activos en el diseño de ligandos conmutables rédox de tipo NHC y su aplicación en catálisis homogénea.^[17] En uno de sus trabajos más significativos, estudiaron la actividad del compuesto **5** en la metátesis de polimerización de apertura de anillo (ROMP, en sus siglas en inglés). Los autores observaron que la oxidación del fragmento ferrocenilo produce una disminución de la velocidad de reacción en aproximadamente un orden de magnitud. La reducción del producto oxidado restaura por completo su actividad catalítica (Esquema 8).^[19]

El grupo de Sarkar también ha sido muy activo en la obtención de ligandos NHC con centros activos rédox, si



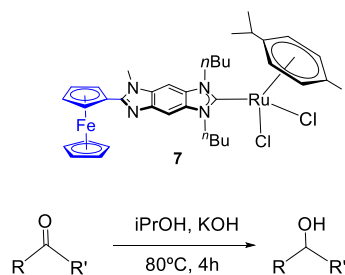
Esquema 8. Catalizador conmutable redox para la reacción de polimerización ROMP de 1,5-ciclooctadieno.

bien sus investigaciones siempre se han centrado en el uso de carbenos de tipo mesoiónico (MICs).^[20] Este grupo de investigación describió en 2015 un compuesto de Au(I) con un ligando MIC unido a un ferrocenilo, que se utilizó como catalizador en la ciclación de N(2-propin-1-il)benzamida para generar 5-metilen-2-fenil-4,5-dihidroxazol (Esquema 9). Los autores observaron que, mientras que el catalizador neutro (**6**) es inactivo, el compuesto oxidado ($[6]^+$) produce conversiones de hasta el 90% en 24 horas. Este hecho se atribuye a la mayor acidez de Lewis de $[6]^+$ en comparación con la de **6**.^[21]



Esquema 9. Catalizador conmutable redox con un ligando de tipo MIC

En nuestro grupo de investigación también hemos realizado aportaciones a este campo de investigación, al obtener varios compuestos de iridio,^[22] rodio,^[22b] oro^[22a] y rutenio^[23] con ligandos de tipo NHC con centros redox para el estudio de sus aplicaciones catalíticas. Por ejemplo, el compuesto **7** mostrado en el Esquema 10, se utiliza para la reducción de cetonas a alcoholes secundarios a través del método de la transferencia de hidrógeno, utilizando isopropanol como



7 es más activo que **7** + $[FcCOCH_3](BF_4)^-$ $[7]^+$

Esquema 10. Catalizador conmutable redox de Ru(II) utilizado en la reducción de cetonas.

fuente de hidrógeno.^[23] En este ejemplo, el compuesto neutro (**7**) es mucho más activo que el compuesto oxidado, y la actividad del catalizador puede ser 'apagada' o 'encendida', en función de que añadamos al medio un reactivo oxidante o un reductor.

3. Cuantificación de la modificación del carácter electrón-dador del ligando tras el estímulo redox

Una de las cuestiones más importantes a la hora de diseñar un catalizador con un ligando con actividad redox, es conocer cuál es la perturbación electrónica que provoca en el metal la oxidación o reducción del ligando. En este sentido, el grupo de Bielawski, utilizando una muy bien escogida selección de ligandos NHC, realizó una investigación muy exhaustiva para determinar cuál es el cambio producido.^[24]

La estrategia consistió en obtener una serie de carbonilos de Ir(I), Rh(I), W(0) y Mo(0), y medir cuál es el cambio en la frecuencia de tensión del enlace C-O al producirse el proceso redox. Este cambio se puede medir de forma muy sencilla por espectroscopía IR. La estrategia se basa en establecer el valor de la frecuencia de tensión C-O como una medida indirecta de la capacidad de retrodonación del metal sobre los orbitales antienlazantes de la molécula de C-O, de modo que cuanto mayor sea la acidez de Lewis del metal menor será su capacidad retrodonadora y, por tanto, mayor será la frecuencia de tensión C-O. En este sentido, el Prof. Bielawski y colaboradores decidieron plantear sus estudios con objeto de determinar, *i)* cuál es el efecto de introducir uno o más fragmentos de tipo ferrocenilo en la molécula, y *ii)* determinar los efectos producidos de fusionar el centro redox al ligando NHC a través de un sistema policonjugado. Los resultados de estos estudios se muestran en la Tabla 1. A partir de estos datos, se puede concluir que la oxidación de los fragmentos de ferrocenilo en los compuestos de Ir(I) producen prácticamente la misma variación $\Delta\nu(CO)$, independientemente de cuál sea el tipo de ligando utilizado. Esta variación se encuentra en el intervalo de $13 > \Delta\nu(CO)$, $> 15 \text{ cm}^{-1}$. Este dato es particularmente interesante en el caso del compuesto de Ir **9**, para el que la variación es de 12 cm^{-1} , a pesar de que la comunicación electrónica entre el ferrocenilo y el ligando NHC está interrumpida por la presencia de un grupo metileno.^[26] Para el caso de las reducciones de los grupos naftoquinona en **14**, la variación es similar en magnitud, aunque en sentido contrario (-12.5 cm^{-1}), ya que en este caso la reducción aumenta la capacidad dadora del ligando.^[25] También es interesante observar el cambio producido cuando se produce la oxidación de dos grupos ferrocenilo, como en los complejos **8** y **10**. En estos casos se observa que la oxidación produce un cambio $\Delta\nu(CO) = 10 \text{ cm}^{-1}$, siendo este aumento independiente del número de grupos ferrocenilo que se oxida.^[24] El análisis de los cambios producidos en la vibración de tensión C-O α_1 de los pentacarbonilos de molibdeno y wolframio también es muy útil, ya que en este caso las variaciones son mucho mayores (del orden de $\Delta\nu(CO) = 91-102 \text{ cm}^{-1}$). En este caso

Tabla 1. Variaciones en la frecuencia $\nu(\text{CO})$ de una serie de carbonilos metálicos con ligandos conmutables rédox de tipo NHC. Los datos han sido obtenidos de las referencias ^[24], ^[25] y ^[26].

| | Variación (CO) |
|-----------|--|
| <p>8</p> | $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = +15 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>9</p> | $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = +12 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>10</p> | $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = +13 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{W}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = +91 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{Mo}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = +93 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{W}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = +93 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>11</p> | $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = +13 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>12</p> | $\text{ML}_n = \text{W}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = +93 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>13</p> | $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = +13 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>14</p> | $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = -12.5 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{W}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = -93 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{Mo}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = -102 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{W}(\text{CO})_5; \Delta\nu\text{A}_1 = -98 \text{ cm}^{-1}$ |
| <p>15</p> | $\text{ML}_n = \text{RhCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = -14 \text{ cm}^{-1}$ $\text{ML}_n = \text{IrCl}(\text{CO})_2; \Delta\nu(\text{CO})_{\text{av}} = -15 \text{ cm}^{-1}$ |

Fc = ferrocenilo; Mes = Mesitylo

también se observa que la variación producida es independiente del número de grupos rédox que se oxida o reduce, y también de la naturaleza del grupo rédox (ferrocenilo o naftoquinona). Esta observación sugiere que la modulación de las propiedades electrónicas en el metal no depende ni de la naturaleza ni el del número de centros rédox en el complejo, sino que se deben fundamentalmente a la carga neta que se genera en el complejo tras el proceso rédox.

Recientemente, en nuestro grupo de investigación hemos obtenido una serie de compuestos de Ir(II) con un ligando NHC funcionalizado con un grupo naftalen-di-imida (NDI). ^[22b] La presencia del grupo NDI en el ligando permite que

éste pueda sufrir de forma sucesiva dos reducciones mono-electrónicas, tal como se muestra en la Figura 1. Los estudios electroquímicos de IR sobre estos compuestos nos permitirían determinar que cada reducción mono-electrónica produce una disminución de la frecuencia $\nu(\text{CO})$ de aproximadamente 10 cm^{-1} , lo cual nos permite disponer de un sistema con tres niveles de control electrónico, dependiendo de que tengamos el compuesto en su estado neutro (**16**), monoreducido (**[16]**) o doblemente reducido (**[16]²⁻**). Como veremos en la siguiente sección, esta observación tiene importantes consecuencias en el comportamiento catalítico de este complejo.

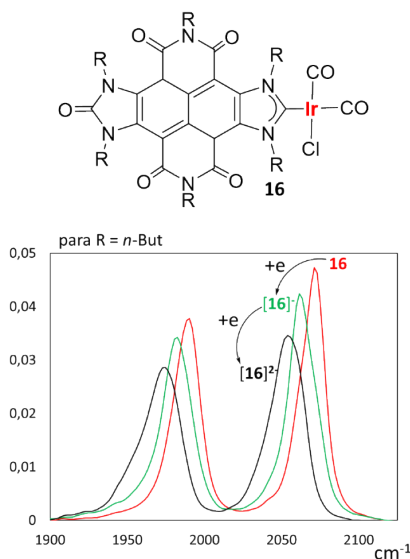


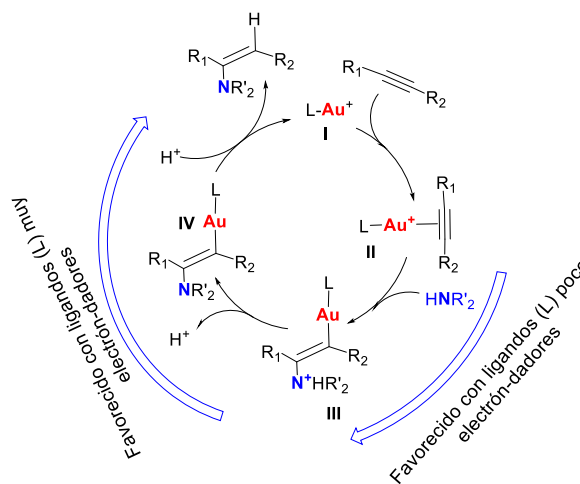
Figura 1. Cambios producidos en la frecuencia C-O ($\Delta\nu(\text{CO})$) de un compuesto de Ir(I) con un ligando de tipo NDI-NHC. La figura de la derecha muestra los espectros de IR obtenidos del análisis espectroelectroquímico.

4. Catalizadores conmutables redox como herramientas para elucidar mecanismos de reacción en catálisis

Tal como hemos comentado anteriormente, la utilización de ligandos conmutables redox proporciona una herramienta excepcional para modificar las propiedades electrónicas del metal sin alterar significativamente el resto de las propiedades del complejo. A continuación describiremos un par de ejemplos de reacciones catalíticas en las que este principio ha sido muy útil para clarificar aspectos clave en mecanismos de reacción que hasta el momento suscitaban controversia.

El primer ejemplo lo constituyen las reacciones de hidroaminación de alquinos, para las que los compuestos de Au(I) constituyen el grupo de catalizadores más eficaces.^[27] Esta reacción se considera el proceso de mayor economía atómica para la incorporación de fragmentos nitrogenados en compuestos orgánicos.^[28] Para este tipo de reacción se han realizado numerosos estudios experimentales y computacionales con el fin de evaluar de forma detallada cuál es la influencia de las propiedades estéricas y electrónicas de los ligandos de tipo fosfina^[29] y NHC^[30] en la actividad del catalizador. El mecanismo de la reacción (Esquema 11) implica en primer lugar la coordinación del alquino al metal. El segundo paso del ciclo es el ataque nucleofílico de la amina al triple enlace del alquino. Este paso (II→III) está favorecido por ligandos electron-deficientes, que aumenten la acidez de Lewis del metal. El siguiente paso de la reacción es la protonólisis (o protodeaurización), en la que el protón unido al nitrógeno (en III) migra hasta el carbono unido al átomo de oro, formando la imina del producto final. Este paso del ciclo está favorecido por ligandos fuertemente electrón-dadores. Los estudios mecanísticos sugieren que la protonólisis (III-IV)

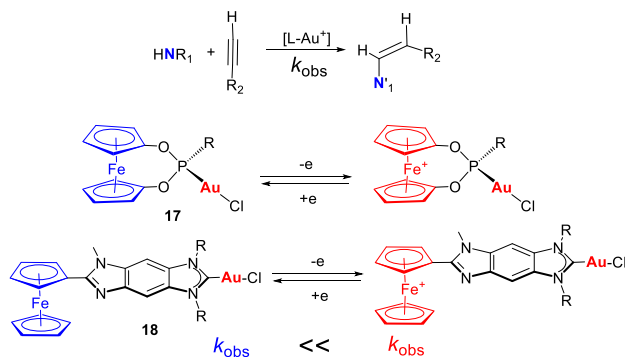
es el paso lento de la reacción (RDS), una conclusión que también está apoyada por varios estudios experimentales.^[31] Sin embargo, existen estudios que indican que hay excepciones que sugieren que el mecanismo podría ser diferente. Por ejemplo, los estudios realizados con una selección de fosfinas, indican que las fosfinas más electron-dadoras dificultan la hidroaminación,^[32] y la misma tendencia se observa al utilizar carbenos mesoiónicos (MICs) muy electrón-dadores.^[33] Sin embargo, estos resultados no son concluyentes, ya que los estudios realizados modificando ligandos implican que los cambios producidos en el catalizador no son sólo electrónicos, sino también estéricos, por lo que los resultados pueden no ser completamente fiables. Para este caso concreto, utilizar ligandos conmutables redox puede resultar de gran utilidad.



Esquema 11. Mecanismo de la hidroaminación de alquinos catalizada por catalizadores de Au(I).

Los estudios realizados con compuestos de Au(I) con ligandos conmutables redox muestran que la actividad de los catalizadores aumenta cuando los ligandos se oxidan.^[22a, 34] En concreto, un trabajo reciente realizado por Paradies y Breher muestra de forma muy evidente, como la oxidación del fragmento ferrocenilo en el ligando del compuesto **17** aumenta significativamente la actividad del catalizador debido al aumento del carácter electrofílico del alquino cuando éste se une al metal (Esquema 12). Los estudios cinéticos realizados por este grupo de investigación sugieren de forma muy evidente, que el RDS para esta reacción es el ataque nucleofílico de la amina al triple enlace del alquino coordinado, contrariamente a lo que se considera el mecanismo más aceptado.^[34] Los trabajos realizados en nuestro grupo también apuntan en el mismo sentido. El compuesto **18**, con un ligando NHC funcionalizado con un ferrocenilo,^[22a] aumenta su actividad catalítica de forma significativa al producirse la oxidación del grupo ferrocenilo, muy en la línea de los resultados publicados por Paradies y Breher.

Si bien estos estudios constituyen un claro indicio a favor de que el RDS del proceso es el ataque nucleofílico al triple enlace del alquino, no pueden considerarse una prueba definitiva ya que el cambio producido en el metal se realiza úni-



Esquema 12. Catalizadores de Au(I) con ligandos conmutables redox en reacciones de hidroaminación de alquinos.

camente entre dos estados electrónicos muy concretos (neuro y oxidado). La cuestión quedaría clarificada si, además de producirse una mejora en la actividad del catalizador al aumentar la acidez de Lewis del metal, observáramos que la disminución de la acidez de Lewis produce el efecto contrario. Para probar esta hipótesis deberíamos disponer de un ligando cuyo proceso redox implicara la transición desde un estado neutro a un estado reducido. Muy recientemente, en nuestro grupo de investigación hemos obtenido un compuesto de Au(I) con un ligando de tipo NHC funcionalizado con un fragmento naftalen-di-imida (NDI) (**19**, en la Figura 2).^[35] La presencia del grupo NDI permite la reducción monoeléctrica del ligando, que se produce de forma reversible. Cuando este compuesto se utiliza en la hidroaminación de fenilacetileno, se observa que el catalizador neutro permite la formación del compuesto hidroaminado en rendimientos elevados tras ocho horas de reacción a 90°C, utilizando una carga de catalizador del 1 mol %. Cuando la reacción se realiza en presencia de un reductor (cobaltoceno), se produce la reducción monoeléctrica del ligando y, consecuentemente se reduce la acidez de Lewis del metal. En esta situación el catalizador deja de ser activo. La reacción puede desactivarse y activarse de forma consecutiva por adición secuencial de un reductor (cobaltoceno) o un oxidante (acetilferrocinio), de forma que el catalizador funciona como un interruptor redox a lo largo del avance de la reacción (Figura 2). Estos resultados se justifican debido a que el aumento de la capacidad dadora del ligando en su estado reducido disminuye la capacidad del alquino coordinado para sufrir el ataque nucleofílico de la amina, en consonancia con que el RDS del proceso es el paso **II**→**III** mostrado en el ciclo catalítico del Esquema 11.

La reacción de cicloisomerización de ácidos alquinóicos es un proceso de gran economía atómica que constituye uno de los recursos más eficaces para la obtención de lactonas enólicas exocíclicas. Las lactonas enólicas exocíclicas son compuestos de gran importancia debido a que son frecuentes en productos naturales y presentan actividad biológica.^[36] Algunos investigadores,^[35] entre los que se incluye nuestro grupo,^[37] han dedicado mucha atención al desarrollo de catalizadores para la síntesis de lactonas penta- y hexacíclicas a través de la ciclación de ácidos alquinóicos. Entre los catalizadores que se utilizan para facilitar este proceso, los de

rodio e iridio han sido los que han demostrado una mayor eficacia.^[38] La mayoría de autores reconoce el ciclo presentado en el Esquema 13 como el más aceptado,^[38e, 39] si bien este mecanismo no está exento de alguna controversia. Tal como se observa en el Esquema 13, el ciclo comienza con la coordinación del alquino al centro metálico, para formar la especie **I**. Seguidamente, se produce la adición oxidante del O-H del grupo carboxílico para generar un hidruro **II** (M = Ir, Rh). En el siguiente paso de la reacción se produce la inserción del triple enlace del alquino en el enlace M-H, generando el intermedio **III**, que finalmente libera el producto a través de una eliminación reductora que regenera el catalizador. La mayoría de autores sugiere que el RDS de esta reacción es el paso **I**→**II** que implica la adición oxidante del ácido carboxílico,^[38e, 39b-e] si bien esta hipótesis no ha sido probada de forma definitiva. Resulta evidente que si la adición oxidante es el RDS del ciclo, entonces la utilización de ligandos muy electrón-dadores debería aumentar la velocidad de la reacción.

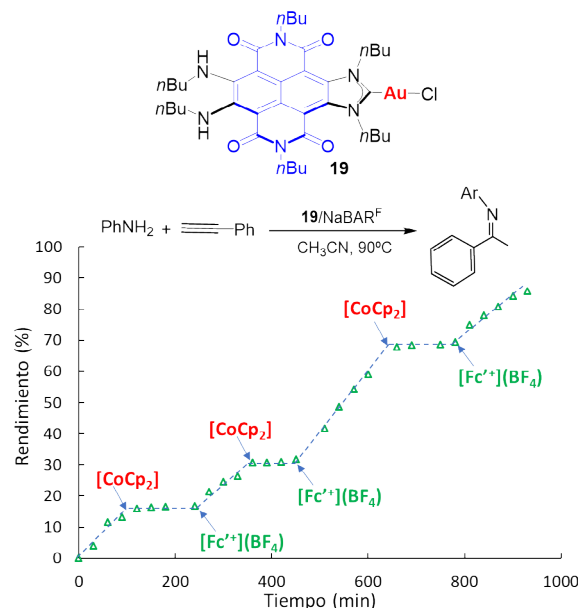
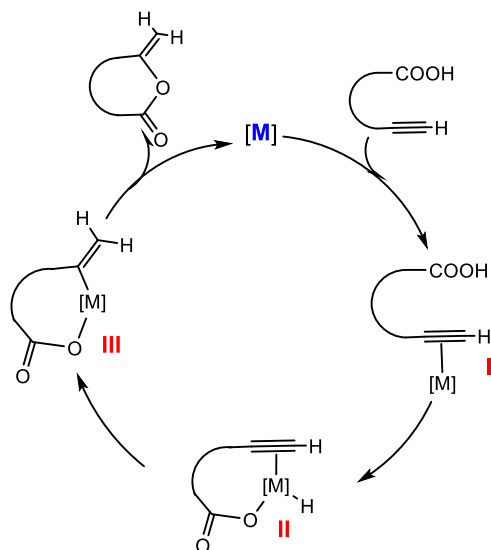


Figura 2. Comportamiento del compuesto **19** como interruptor (o conmutador) redox. La actividad del catalizador se interrumpe al añadir un reductor, y se reactiva al añadir un oxidante.

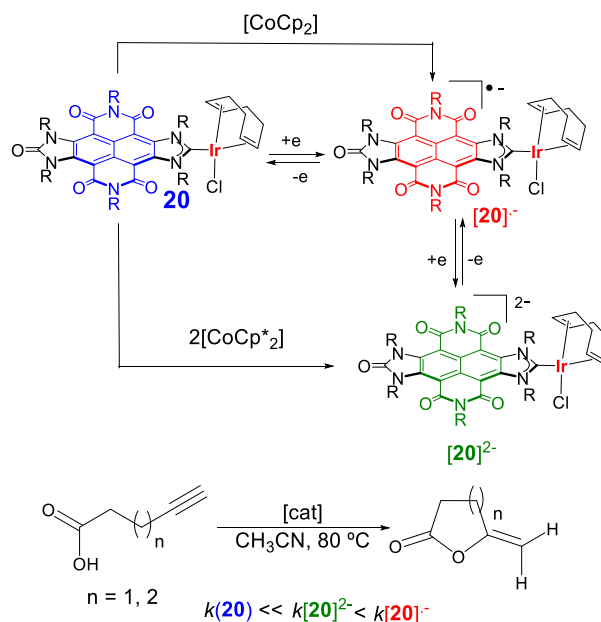
En nuestro grupo de investigación hemos obtenido recientemente una serie de catalizadores de rodio e iridio con un ligando de tipo NDI-NHC, que hemos utilizado para la ciclación de ácidos alquinóicos.^[22b] Tal y como hemos mostrado anteriormente (Figura 1), la utilización de este ligando nos permite tres niveles de control electrónico sobre el catalizador, ya que el ligando puede transformarse de forma reversible entre su forma neutra, y las reducidas con uno y dos electrones. En los experimentos realizados en nuestro laboratorio, observamos que la actividad del catalizador neutro de iridio **20** es muy baja, al realizar la reacción a 80°C utilizando una carga de catalizador del 0.25 mol% (Esquema 14). Sin embargo, si producimos la reducción monoeléctrica



Esquema 13. Ciclo catalítico de la ciclación de ácidos alquínicos.

del ligando NDI-NHC (por adición de cobaltoceno, $[\text{CoCp}_2]$) formando la especie $[\mathbf{20}]^{\bullet-}$ (Esquema 14) el catalizador aumenta su actividad en casi dos órdenes de magnitud. Esta observación es una clara evidencia de que el paso lento de la reacción es la adición oxidante $\text{I} \rightarrow \text{II}$ (Esquema 13), en clara consonancia con las conclusiones propuestas por otros autores. La consecuencia lógica de nuestros experimentos es que el aumento de la capacidad dadora del ligando, facilita la adición oxidante del ácido carboxílico con el consiguiente aumento de la velocidad de reacción. Tal como se muestra en los estudios electroquímicos de la Figura 1, la reducción de dos electrones del ligando NDI-NHC para formar $[\mathbf{16}]^{2-}$ conlleva a una mayor capacidad electrón-dadora que la reducción monoelectrónica. En principio, esto nos llevaría a pensar que la reducción del ligando con dos electrones debería producir un aumento mayor de la velocidad de reacción que el provocado por la reducción monoelectrónica. Cuando las reacción de ciclación la realizamos utilizando el catalizador dianiónico di-reducido $[\mathbf{20}]^{2-}$ (generado por adición de decametilcobaltoceno $[\text{CoCp}^*_2]$), observamos que la velocidad de reacción es sensiblemente mayor que la del catalizador neutro $\mathbf{20}$, pero significativamente inferior a la del catalizador monoreducido $[\mathbf{20}]^{\bullet-}$.^[22b] Este resultado, aparentemente contra-intuitivo, tiene su explicación en el ciclo catalítico mostrado en el Esquema 13. Efectivamente, un aumento de la capacidad dadora del ligando tiene como consecuencia una aceleración de la reacción debido a la mayor facilidad con que el catalizador experimenta la adición oxidante del ácido carboxílico. Esta situación es válida para el compuesto monoreducido, y con más motivo para el compuesto doblemente reducido. Sin embargo, el hecho de que el metal tenga una mayor tendencia a sufrir la oxidación, tiene también como consecuencia que disminuya su capacidad para reducirse, por lo que un ligando muy dador debe dificultar el último paso de la reacción, que es la eliminación reductora del producto. Llegados al límite,

podríamos llegar a una situación en la que un ligando excesivamente electrón-dador hiciera que el RDS del ciclo fuera la eliminación reductora del producto. Estos resultados ilustran cómo el ajuste de las propiedades de un catalizador están condicionadas por la relación existente entre los diferentes pasos del ciclo catalítico, de forma que la optimización de los parámetros que determinan el buen funcionamiento de un catalizador está siempre condicionada a todos los pasos que se incluyen en el mecanismo del proceso.



Esquema 14. Utilización del compuesto $\mathbf{20}$ con un ligando NDI-NHC, en la ciclación de ácidos alquínicos.

5. Conclusiones

En este artículo hemos pretendido dar una visión general de los últimos avances en la obtención de compuestos con ligandos conmutables redox y su aplicación en procesos catalíticos. A lo largo del texto hemos intentado demostrar que, si bien los primeros compuestos con actividad conmutable redox se obtuvieron hace casi tres décadas, su estudio sigue despertando un gran interés, fundamentalmente debido a las enormes aplicaciones que se pueden derivar de su uso en catálisis homogénea. Además de destacar algunos de los ejemplos más significativos descritos en la literatura reciente (y no tan reciente), nuestro trabajo también pretende resaltar cómo el uso de los catalizadores conmutables redox puede utilizarse para elucidar aspectos importantes sobre los mecanismos de reacción en ciertos procesos catalíticos. Como ya hemos destacado en más de una ocasión a lo largo del texto, los catalizadores con ligandos con actividad redox pueden modificar las propiedades electrónicas del metal sin apenas alterar el resto de las propiedades del complejo, lo cual constituye una herramienta fundamental para evaluar de forma *neto*, cuál es el efecto producido por las modifi-

caciones electrónicas del catalizador sobre la eficacia del proceso catalítico. Esperamos que el texto sea útil tanto para el investigador especializado en la investigación dentro del campo de la catálisis homogénea, como para los estudiantes de postgrado que estén interesados en este tema de investigación. En cualquier caso, esperamos que este trabajo haya sido de tu agrado, lector de *Anales de la Química*.

Agradecimientos

Los autores deseáramos agradecer la financiación otorgada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PGC2018-093382-B-I00). Sergio Gonell agradece el contrato recibido dentro del programa Juan de la Cierva, Incorporación (JC2019-039982-I).

Bibliografía

- [1] En este artículo hemos considerado conveniente traducir el término 'redox-switchable' por 'conmutable-rédox', aplicable para definir la propiedad de un ligando o un catalizador. La expresión 'interruptor-rédox', es más común en la literatura científica en español, pero no refleja una propiedad atribuible a un ligando, sino una función que puede ir adherida a éste.
- [2] Los términos 'innocent' y 'non-innocent' en inglés, deberían traducirse más apropiadamente al castellano como 'inocente' y 'culpable', respectivamente. Sin embargo, en este artículo hemos preferido mantener la expresión 'no-inocente' para intentar respetar el sentido del término en inglés, referido a su implicación en la ambigüedad en la asignación de estados de oxidación.
- [3] R. H. Crabtree, *New J. Chem.* **2011**, *35*, 18-23.
- [4] V. Blanco, D. A. Leigh and V. Marcos, *Chem. Soc. Rev.* **2015**, *44*, 5341-5370.
- [5] a) A. M. Allgeier and C. A. Mirkin, *Angew. Chem. Int. Ed.* **1998**, *37*, 894-908; b) B. de Bruin, *Eur. J. Inorg. Chem.* **2012**, 340-342; c) L. A. Berben, B. de Bruin and A. F. Heyduk, *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 1553-1554; d) V. Lyaskovskyy and B. de Bruin, *Acs Catalysis* **2012**, *2*, 270-279.
- [6] a) B. M. Neilson and C. W. Bielawski, *Acs Catalysis* **2013**, *3*, 1874-1885; b) Z. Freixa, *Catal. Sci. Technol.* **2020**, *10*, 3122-3139.
- [7] a) C. Y. Wu, H. Q. Chen, N. Corrigan, K. Jun, X. N. Kan, Z. B. Li, W. J. Liu, J. T. Xu and C. Boyer, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 8207-8220; b) A. Walczak and A. R. Stefankiewicz, *Inorg. Chem.* **2018**, *57*, 471-477; c) P. F. Zhan, J. Y. Wang, Z. G. Wang and B. Q. Ding, *Small* **2014**, *10*, 399-406; d) M. A. Dunbar, S. L. Balof, A. N. Roberts, E. J. Valente and H. J. Schanz, *Organometallics* **2011**, *30*, 199-203; e) S. L. Balof, S. J. P'Pool, N. J. Berger, E. J. Valente, A. M. Shiller and H. J. Schanz, *Dalton Trans.* **2008**, 5791-5799.
- [8] P. J. Chirik and K. Wieghardt, *Science* **2010**, *327*, 794-795.
- [9] a) Bakerhaw.Mj, E. Billig and H. B. Gray, *J. Am. Chem. Soc.* **1966**, *88*, 4870-4875; b) R. Eisenberg and H. B. Gray, *Inorg. Chem.* **2011**, *50*, 9741-9751.
- [10] W. Kaim and B. Schwederski, *Coord. Chem. Rev.* **2010**, *254*, 1580-1588.
- [11] I. M. Lorkovic, R. R. Duff and M. S. Wrighton, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 3617-3618.
- [12] J. Wei and P. L. Diaconescu, *Acc. Chem. Res.* **2019**, *52*, 415-424.
- [13] C. K. A. Gregson, V. C. Gibson, N. J. Long, E. L. Marshall, P. J. Oxford and A. J. P. White, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 7410-7411.
- [14] a) E. T. Singewald, C. A. Mirkin and C. L. Stern, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1995**, *34*, 1624-1627; b) C. S. Slone, C. A. Mirkin, G. P. A. Yap, I. A. Guzei and A. L. Rheingold, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 10743-10753; c) C. S. Slone, D. A. Weinberger and C. A. Mirkin, *Progress in Inorganic Chemistry, Vol 48* **1999**, *48*, 233-350; d) A. M. Allgeier, C. S. Slone, C. A. Mirkin, L. M. LiableSands, G. P. A. Yap and A. L. Rheingold, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, *119*, 550-559.
- [15] C. A. Sassano and C. A. Mirkin, *J. Am. Chem. Soc.* **1995**, *117*, 11379-11380.
- [16] a) E. Peris, *Chem. Rev.* **2018**, *118*, 9988-10031; b) M. Poyatos, J. A. Mata and E. Peris, *Chem. Rev.* **2009**, *109*, 3677-3707; c) M. N. Hopkinson, C. Richter, M. Schedler and F. Glorius, *Nature* **2014**, *510*, 485-496; d) F. E. Hahn and M. C. Jahnke, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 3122-3172; e) S. Diez-Gonzalez, N. Marion and S. P. Nolan, *Chem. Rev.* **2009**, *109*, 3612-3676; f) P. de Fremont, N. Marion and S. P. Nolan, *Coord. Chem. Rev.* **2009**, *253*, 862-892.
- [17] Y. Ryu, G. Ahumada and C. W. Bielawski, *Chem. Commun.* **2019**, *55*, 4451-4466.
- [18] M. Sussner and H. Plenio, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 6885-6888.
- [19] C. D. Varnado, Jr., E. L. Rosen, M. S. Collins, V. M. Lynch and C. W. Bielawski, *Dalton Trans.* **2013**, *42*, 13251-13264.
- [20] L. Hettmanczyk, S. Manck, C. Hoyer, S. Hohloch and B. Sarkar, *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 10949-10952.
- [21] L. Hettmanczyk, L. Suntrup, S. Klenk, C. Hoyer and B. Sarkar, *Chem. Eur. J.* **2017**, *23*, 576-585.
- [22] a) S. Ibáñez, M. Poyatos, L. N. Dawe, D. Gusev and E. Peris, *Organometallics* **2016**, *35*, 2747-2758; b) C. Ruiz-Zambrana, A. Gutierrez-Blanco, S. Gonell, M. Poyatos and E. Peris, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60*, 20003-20011.
- [23] a) S. Ibáñez, M. Poyatos and E. Peris, *ChemCatChem* **2016**, *8*, 3790-3795
- [24] E. L. Rosen, C. D. Varnado, A. G. Tennyson, D. M. Khramov, J. W. Kamplain, D. H. Sung, P. T. Cresswell, V. M. Lynch and C. W. Bielawski, *Organometallics* **2009**, *28*, 6695-6706.
- [25] A. G. Tennyson, R. J. Ono, T. W. Hudnall, D. M. Khramov, J. A. V. Er, J. W. Kamplain, V. M. Lynch, J. L. Sessler and C. W. Bielawski, *Chem. Eur. J.* **2010**, *16*, 304-315.
- [26] K. Arumugam, C. D. Varnado, S. Sproules, V. M. Lynch and C. W. Bielawski, *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 10866-10875.
- [27] a) E. Mizushima, T. Hayashi and M. Tanaka, *Org. Lett.* **2003**, *5*, 3349-3352; b) N. T. Patil, R. D. Kavthé, V. S. Raut, V. S. Shinde and B. Sridhar, *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 1277-1280; c) J. L. Zhang, C. G. Yang and C. He, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 1798-1799; d) R. A. Widenhoefer and X. Han, *Eur. J. Org. Chem.* **2006**, *2006*, 4555-4563; e) C. H. Leung, M. Baron and A. Biffis, *Catalysis* **2020**, *10*, 1210; f) V. Lavallo, G. D. Frey, B. Donnadiou, M. Soleilhavoup and G. Bertrand, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2008**, *47*, 5224-5228; g) J. A. Akana, K. X. Bhattacharyya, P. Mueller and J. P. Sadighi, *J. Am. Chem. Soc.* **2007**, *129*, 7736-7737.

- [28] T. E. Mueller, K. C. Hultsch, M. Yus, F. Foubelo and M. Tada, *Chem. Rev.* **2008**, *108*, 3795-3892.
- [29] W. Wang, G. B. Hammond and B. Xu, *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 5697-5705.
- [30] a) S. Yazdani, G. P. Junor, J. L. Peltier, M. Gembicky, R. Jazzar, D. B. Grotjahn and G. Bertrand, *Acs Catalysis* **2020**, *10*, 5190-5201; b) A. Couce-Rios, G. Kovacs, G. Ujaque and A. Lledos, *Acs Catalysis* **2015**, *5*, 815-829; c) G. Kavas, A. Lledos and G. Ujaque, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2011**, *50*, 11147-11151.
- [31] a) A. S. K. Hashmi, A. M. Schuster and F. Rominger, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2009**, *48*, 8247-8249; b) A. S. K. Hashmi, T. D. Ramamurthi and F. Rominger, *Adv. Synth. Catal.* **2010**, *352*, 971-975; c) C. A. Gaggioli, G. Ciancaleoni, D. Zuccaccia, G. Bistoni, L. Belpassi, F. Tarantelli and P. Belanzoni, *Organometallics* **2016**, *35*, 2275-2285.
- [32] T. Witteler, H. Darmandeh, P. Mehlmann and F. Dielmann, *Organometallics* **2018**, *37*, 3064-3072.
- [33] J. Beerhues, R. R. M. Walter, H. Aberhan, M. Neubrand, M. Porre and B. Sarkar, *Organometallics* **2021**, *40*, 1077-1085.
- [34] E. Deck, H. E. Wagner, J. Paradies and F. Breher, *Chem. Commun.* **2019**, *55*, 5323-5326.
- [35] C. Ruiz-Zambrana, M. Poyatos and E. Peris, *ACS-Catalysis* **2022**, *12*, 4465-4472.
- [36] a) A. Kurume, Y. Kamata, M. Yamashita, Q. L. Wang, H. Matsuda, M. Yoshikawa, I. Kawasaki and S. Ohta, *Chem. Pharm. Bull.* **2008**, *56*, 1264-1269; b) A. N. Pearce, E. W. Chia, M. V. Berridge, E. W. Maas, M. J. Page, V. L. Webb, J. L. Harper and B. R. Copp, *J. Nat. Prod.* **2007**, *70*, 111-113; c) J. J. Beck and S. C. Chou, *J. Nat. Prod.* **2007**, *70*, 891-900; d) T. Nomura, T. Kushiuro, T. Yokota, Y. Kamiya, G. J. Bishop and S. Yamaguchi, *J. Biol. Chem.* **2005**, *280*, 17873-17879; e) S. Richter and M. Palumbo, *Mini Rev. Med. Chem.* **2003**, *3*, 37-49; f) A. Hirota, M. Nakagawa and H. Hirota, *Agric. Biol. Chem.* **1991**, *55*, 1187-1188; g) N. Yanagihara, C. Lambert, K. Iritani, K. Utimoto and H. Nozaki, *J. Am. Chem. Soc.* **1986**, *108*, 2753-2754.
- [37] a) A. Gutierrez-Blanco, E. Peris and M. Poyatos, *Organometallics* **2018**, *37*, 4070-4076; b) E. Mas-Marza, E. Peris, I. Castro-Rodriguez and K. Meyer, *Organometallics* **2005**, *24*, 3158-3162; c) M. Viciano, E. Mas-Marza, M. Sanau and E. Peris, *Organometallics* **2006**, *25*, 3063-3069; d) E. Mas-Marza, M. Sanau and E. Peris, *Inorg. Chem.* **2005**, *44*, 9961-9967.
- [38] a) L. W. Zeng, R. J. Chen, C. Zhang, H. J. Xie and S. L. Cui, *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 3093-3096; b) S. P. Wei, J. Pedroni, A. Meissner, A. Lumbroso, H. J. Drexler, D. Heller and B. Breit, *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 12067-12076; c) H. Nakagawa, Y. Okimoto, S. Sakaguchi and Y. Ishii, *Tetrahedron Lett.* **2003**, *44*, 103-106; d) P. Koschker, M. Kahny and B. Breit, *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 3131-3137; e) D. M. T. Chan, T. B. Marder, D. Milstein and N. J. Taylor, *J. Am. Chem. Soc.* **1987**, *109*, 6385-6388.
- [39] a) U. Gellrich, A. Meissner, A. Steffani, M. Kahny, H. J. Drexler, D. Heller, D. A. Plattner and B. Breit, *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 1097-1104; b) Y. Huang, X. H. Zhang, X. Q. Dong and X. M. Zhang, *Adv. Synth. Catal.* **2020**, *362*, 782-788; c) A. Lumbroso, N. Abermil and B. Breit, *Chem. Sci.* **2012**, *3*, 789-793; d) T. B. Marder, D. M. T. Chan, W. C. Fultz and D. Milstein, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1988**, 996-998; e) T. B. Marder, D. M. T. Chan, W. C. Fultz, J. C. Calabrese and D. Milstein, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1987**, 1885-1887.



Chemistry Europe

European Chemical Societies Publishing

ENSEÑANZA
DE LA QUÍMICA



G. Pinto¹

Grupo Especializado de Didáctica
e Historia de la Física y la Química,
Reales Sociedades Españolas de Física
y de Química
Ciudad Universitaria
28040 Madrid.
E.T.S. de Ingenieros Industriales
Universidad Politécnica de Madrid
28006 Madrid.
E-mail: gabriel.pinto@upm.es
Recibido: 09/02/2022
Aceptado: 20/04/2022
ORCID: 0000-0002-8961-7255

El Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para la enseñanza y la divulgación

Gabriel Pinto Cañón 

Resumen: Tras introducir el significado general de los “años internacionales”, se informa de la proclamación por la ONU del año 2022 como *Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible* (IYBSSD, en sus siglas en inglés). Se comentan sus fines, que principalmente se enfocan a proyectar la relevancia de la ciencia básica en la consecución de los conocidos como Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y se resalta cómo la efeméride es una oportunidad para la promoción de actividades educativas y divulgativas sobre la ciencia en general, y la química en particular.

Palabras clave: Año Internacional, Desarrollo Sostenible, IYBSSD.

Abstract: After introducing the meaning of “international years”, it is reported that the UN has proclaimed 2022 as the *International Year of Basic Sciences for Sustainable Development* (IYBSSD). The aims, which mainly focus on projecting the relevance of basic science in the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs), are discussed, and it is highlighted how the event is an opportunity to promote educational and outreach activities on science in general, and chemistry in particular.

Keywords: International Year, IYBSSD Sustainable Development.

Introducción

Recientemente, en 2019, se celebró el *Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos* (IYPT, en sus siglas en inglés), que tuvo mucho eco en la comunidad química mundial y, de forma específica, en España.^[1-5] El objetivo fue conmemorar el sesquicentenario de la primera propuesta de ordenación de los elementos conocidos entonces, en forma de tabla, por el ruso Dimitri Ivánovich Mendeléiev (1834–1907). Desde la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) se señaló que también coincidía con el centenario de su fundación. En todo caso, con la efeméride se pretendía reconocer también la relevancia de las ciencias básicas en el desarrollo sostenible y en la solución de problemas globales (energía, educación, agricultura, salud...). Precisamente, ahondando en este objetivo, durante 2022 se celebra el *Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible* (IYBSSD, en sus siglas en inglés).

En este artículo, se introduce lo que significan los ‘años internacionales’ y se informa someramente de los objetivos del IYBSSD (cuyo logotipo se recoge en la figura 1), dado que están muy relacionados con el ámbito de la química (área fundamental de esta revista) y de los conocidos como Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), iniciativa desarrollada por la ONU para solventar los principales problemas del mundo. La idea es difundir el conocimiento del IYBSSD, para aprovecharlo en la extensión de actividades educativas



Figura 1. Logotipo (en español) del IYBSSD.

y divulgativas que redunden en un mejor conocimiento de la función de las ciencias básicas en nuestra sociedad.

Los años internacionales

Aparte de que cualquier organización puede desarrollar, en su ámbito, la celebración de un “año internacional”, se entiende por ello, en general, a los que están vinculados a la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Este organismo designa espacios temporales (días, semanas, años e incluso décadas) para destacar temas particulares que promuevan la consecución de algunos de sus objetivos. En general, lo propone algún estado miembro (actualmente pertenecen 193 de los 197 que reconoce la propia ONU), y debe ser aprobado por la Asamblea General, mediante una

resolución. Algunas veces son organismos especializados y agencias de la ONU, como la UNESCO (*Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*) u otros (FAO, OMS...) los que declaran la celebración, sobre algún tema de su ámbito y, posteriormente, pueden ser también adoptados por la Asamblea General.^[6]

Desde 1959, aparte del dedicado de forma específica a la química en 2011,^[7] y del ya citado sobre la tabla periódica, se han celebrado los siguientes años internacionales fuertemente relacionados con temas de química (se incluye entre paréntesis el año): de la salud y las investigaciones médicas (1961), de la educación (1970), del espacio (1992), del agua dulce (2003), de la física (2005), del planeta Tierra (2008), de la energía sostenible para todos (2012), de la cooperación en la esfera del agua (2013), de la cristalografía (2014), de los suelos (2015), de la luz y de las tecnologías basadas en la luz (2015), de la sanidad vegetal (2020), y del vidrio (2022). Como se aprecia, en un mismo año pueden celebrarse simultáneamente temáticas distintas. Algunos de los logotipos de estos años internacionales se muestran en la figura 2.

Normalmente, se proponen con ocasión de algún aniversario. Así, el dedicado a la química conmemoraba el centenario de la concesión del premio Nobel en esa área a Marie Curie y, el de la cristalografía, el centenario del descubrimiento de la aplicación de los rayos X a dicha ciencia, gracias a los trabajos de William Henry Bragg, William Lawrence Bragg y Max von Laue.

Lejos de quedarse en una conmemoración, el objetivo de estos 'años' es el fomento del conocimiento de ciertas áreas por el público en general. Para ello, aprovechando la circunstancia, sociedades científicas, asociaciones y todo tipo de entidades más afines a la temática que se celebra, promueven iniciativas variadas, como reuniones y encuentros, emisiones (de sellos, monedas, billetes de lotería, etc.), anuncios publicitarios, concursos, conferencias, reportajes en medios de comunicación, páginas web, etc. Así, no solo se concientiza a la población, sino que se generan propuestas y herramientas que pueden ser más permanentes en el tiempo.

El Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible

En 2005 se iniciaron las actividades del *International Basic Sciences Programme* (IBSO), un programa multidisciplinar establecido por la UNESCO para promover la cooperación

entre gobiernos y organizaciones con objeto de fortalecer las capacidades en ciencias básicas y en la educación científica. Desde entonces, se han desarrollado unos 40 proyectos dentro de este programa, centrados normalmente en la promoción de la educación de diferentes disciplinas científicas en todas las etapas educativas y su divulgación.^[8] Estos proyectos se dirigen a áreas de matemáticas, física, química y ciencias de la vida, así como sus áreas interdisciplinares. Para promover también la cooperación Norte-Sur, para que un proyecto se pueda presentar en el marco de IBSO, debe abordar un tema de prioridad regional o internacional y presentarse a la UNESCO por socios de al menos dos países, uno de ellos en desarrollo.

Por otra parte, como es bien conocido dada su amplia difusión, en 2015, la Asamblea General de la ONU aprobó la Agenda 2030 y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para transformar el mundo (ver iconos al respecto en la figura 3).^[9]

En todo este contexto, durante la celebración de un encuentro promovido por IBSO en 2017, Michel Spiro, presidente de la *Société Française de Physique* y, entonces, presidente electo de la IUPAP (*International Union of Pure and Applied Physics*), propuso que los científicos de las disciplinas básicas se movilizaran para mostrar la importancia de sus contribuciones al progreso hacia los ODS. Destacó que un año internacional dedicado a ese fin, mostraría que la investigación en esas áreas es vital para garantizar buena salud para todos, superar el hambre, luchar contra el cambio climático, preservar la biodiversidad, así como promover la paz mundial y luchar contra las desigualdades. Además, Spiro sugirió que, así, se facilitarían que los investigadores se acercaran al público en general y a los responsables de tomas de decisiones, para apoyar el desarrollo de las ciencias básicas. El año que sugirió, 2022, suponía la mitad de la Agenda 2030 y, además, coincidía con el centenario de dos sociedades científicas, la propia IUPAP y la IMU (*International Mathematical Union*). La propuesta se acogió con entusiasmo por las otras sociedades que participaban en la reunión: IUPAC, IUBS (*International Union of Biological Sciences*) e IAU (*International Astronomical Union*). Pronto, se fueron adhiriendo varias decenas más de organizaciones y uniones científicas.

La *International Mineralogical Association* (IMA) propuso celebrar también en 2022 el *Año Internacional de la Mineralogía*, en el contexto del IYBSSD, para resaltar la importancia de esta ciencia en nuestras vidas y en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, con ocasión del bicentenario del



Figura 2. Logotipos de algunos de los años internacionales vinculados con la química, citados en el texto.

OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 3. Iconos que representan los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

fallecimiento de René Just Haüy (1743-1822), considerado el fundador de la mineralogía y de la cristalografía.^[10]

El embajador de Jordania en la UNESCO, con el apoyo de sus colegas de Vietnam, Rusia, Nigeria y otra decena de países, elevaron la propuesta de celebración del IYBSSD que, finalmente, se aprobó por la Conferencia General de la UNESCO en noviembre de 2019. Tras cierto retraso promovido por la situación de pandemia generada por el COVID-19, el 2 de diciembre de 2021, la Asamblea General de la ONU, en su 76ª sesión, adoptó la resolución para su celebración.

Entre los motivos para celebrar el IYBSSD, se destacan en la resolución los siguientes hechos:

- El reconociendo al alto valor de las ciencias básicas para la humanidad, y de que la conciencia mundial y una mayor educación en las ciencias básicas son vitales para lograr un desarrollo sostenible y mejorar la calidad de vida de las personas en todo el mundo.
- Que las aplicaciones de las ciencias básicas son vitales para los avances en medicina, industria, agricultura, recursos hídricos, planificación energética, medio ambiente, comunicación y cultura. Y que estas ciencias, junto con las tecnologías emergentes, responden a las necesidades de la humanidad proporcionando acceso a la información y aumentando la salud y el bienestar de las personas, las comunidades y las sociedades.
- Se enfatiza la importancia de las ciencias básicas para promover el pensamiento racional e innovador y una sociedad basada en el conocimiento.
- Se brinda la oportunidad de resaltar la necesidad de colaboración científica internacional, al celebrarse el centenario de la fundación de la IUPAP.

Además, con la proclamación, se invita a todos los estados miembros, organizaciones del sistema de las Naciones Unidas y otras organizaciones mundiales, regionales y subregionales, así como otras organizaciones pertinentes internacionales y nacionales (incluidos el mundo académico y la sociedad civil), organizaciones no gubernamentales, particulares y el sector privado, para observar y sensibilizar sobre la importancia de las ciencias básicas para el desarrollo sostenible, de acuerdo con las prioridades nacionales. También se invita a la UNESCO a que sea el organismo principal y el centro de coordinación del IYBSSD y que organice actividades, en colaboración con otras entidades relevantes del sistema de la ONU y organizaciones internacionales gubernamentales y organizaciones científicas, como la IUPAP y el Laboratorio Europeo de Física de Partículas.

A través de la web desarrollada *ad hoc*,^[11] se informa de los objetivos y los avances del IYBSSD. Por ejemplo, se señala que se promueven una participación inclusiva en la ciencia reforzando la presencia y visualización de las mujeres, la formación científica, la financiación de la ciencia básica y la generalización de la difusión de la ciencia en abierto. También se informa del comité ejecutivo formado por representantes de las uniones científicas principales, un calendario con programas (que admite propuestas para incluir y destacar iniciativas), novedades y noticias, así como la posibilidad de contribuir a la financiación.

De forma complementaria al IYBSSD, también 2022 ha sido declarado por la ONU como *Año Internacional del Vidrio* (IYOG, por sus siglas en inglés), para celebrar el papel esencial que juega este material en la historia y en nuestra sociedad.^[12]

Conclusiones

Durante 2022, el ámbito de la docencia y de la divulgación de las ciencias en general, y de la química en particular, se ve favorecido por haberse declarado el *Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible*, así como de la mineralogía y del vidrio. Entre otros colectivos, el profesorado de las diferentes etapas educativas puede encontrar así, tanto la posibilidad de dar más resonancia y repercusión a ciertas actividades (ferias científicas, retos para alumnos...), como de participar en otras que se promuevan con tal motivo (concursos escolares, congresos, encuentros...).

En un mundo complejo, sometido aún a la pandemia (ya bienal) causada por el COVID-19 y, muy lamentablemente, cuando se escriben estas líneas, a una guerra terrible en Europa, toda acción que contribuya al progreso de las ciencias básicas en pos de los objetivos de desarrollo sostenible, como "la paz, la justicia e instituciones sólidas" (objetivo número 16 de los ODS), merecerá la pena. Y en toda esta tarea, los docentes y divulgadores de las ciencias básicas juegan un importante papel.

Agradecimientos

Se agradecen las ayudas recibidas de: Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (proyecto de innovación educativa IE22.0506), Obra Social «la Caixa» (proyecto divulgativo «Ciencia y Tecnología al alcance de tod@s»), y Comunidad de Madrid, a través del Convenio Plurianual con la UPM, en su línea de actuación Programa de Excelencia para el Profesorado Universitario, en el marco del V PRICIT (V Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica).

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. Fís.* 2019, 33(1), 10-18.
- [2] G. Pinto, "Editorial: Número Monográfico sobre el Año Internacional de la Tabla Periódica", *An. Quím.*, 2019, 115(2), 54-55.
- [3] G. Pinto, M. Prolongo, "Algunas Aportaciones al Año Internacional de la Tabla Periódica desde España", *Educació Química*, 2019, 25, 6-9.
- [4] G. Pinto, "El Concurso Escolar "Nuestra Tabla Periódica": Una Iniciativa para Fomentar la Motivación de Profesorado y Alumnado en Áreas STEAM", *An. Quím.*, 2019, 115(4), 332-343.
- [5] G. Pinto, M. Martín, M. Prolongo, "El Año Internacional de la Tabla Periódica desde la Filatelia: Implicaciones Didácticas y Divulgativas", *An. Quím.*, 2020, 116(3), 164-172.
- [6] Naciones Unidas, Años Internacionales. Accesible en: <https://bit.ly/34uvQQS> (visitada el 09/03/2022).
- [7] International Year of Chemistry, 2011. Accesible en: <https://bit.ly/3tEc6Tr> (visitada el 09/03/2022).
- [8] UNESCO, International Basic Sciences Programme: Harnessing Cooperation for Capacity Building in Science and the Use of Scientific Knowledge; IBSP. Accesible en: <https://bit.ly/3vS8xeP> (visitada el 09/03/2022).
- [9] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, UNPD, ODS en Acción. Accesible en: <https://bit.ly/3pOXmQz> (visitada el 09/03/2022).
- [10] International Mineralogical Association. Accesible en: <https://ima-minerology.org/> (visitada el 09/03/2022).
- [11] International Year of Basic Sciences for Sustainable Development. Accesible en: www.iybssd2022.org (visitada el 09/03/2022).
- [12] International Year of Glass. Accesible en: <https://www.iyog2022.org/> (visitada el 09/03/2022).



Vídeo-Tabla Periódica: una herramienta educativa desarrollada por alumnos y profesores

Alberto Aguayo Díaz y Covadonga Gutiérrez

ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA



A. Aguayo Díaz¹

C. Gutiérrez García¹

¹ Departamento de Física y Química
IES Valle del Saja, c/Tresano, s/n,
39500 Cabezón de la Sal (Cantabria)
C-e: fqsaja@gmail.com

Recibido: 03/02/2022

Aceptado: 18/04/2022

Resumen: Se presenta una tabla periódica elaborada como actividad motivante para los estudiantes de ciencias, contribuyendo, así, a la conmemoración del Año Internacional de la Tabla Periódica (AITP) en 2019. En su creación también han participado varios profesores. Consiste en una tabla en la que, enlazado a la casilla correspondiente a cada elemento químico, se encuentra un vídeo en el que un estudiante o profesor relata las características más relevantes de dicho elemento. Se enumeran los detalles de la información que se expone, el aspecto visual que presenta la tabla con los rostros de los 120 participantes y la plataforma de Internet en la que se encuentra alojada.

Palabras clave: Tabla Periódica, Año Internacional de la Tabla Periódica 2019, vídeos, elementos químicos, códigos QR.

Abstracts: As a contribution to the commemoration of the International Year of the Periodic Table (IYPT) 2019, a periodic table designed as a motivating activity for science students is presented. Moreover, several teachers have participated in its creation. It consists of a table in which, linked to the box corresponding to each chemical element, there is a video of a student or a teacher telling the most relevant characteristics of that element. The details of the information exposed, the visual aspect of the table with the faces of the 120 participants and the Internet platform where it is hosted are described.

Keywords: Periodic Table, International Year of the Periodic Table 2019, videos, chemical elements, QR codes.

Introducción

La Asamblea General de las Naciones Unidas proclamó el año 2019 como el Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos (AITP), como conmemoración del 150 aniversario de la primera publicación al respecto por el científico ruso Dmitri Mendeléyev.

Los profesores del Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja, de Cabezón de la Sal (Cantabria), participamos en la celebración del Año Internacional con algunas actividades. Entre todas ellas cabe destacar, tanto por su extensión como por la circunstancia relevante de cubrir objetivos más ambiciosos, la creación de una tabla periódica (TP) audiovisual. Siendo conscientes de la cantidad de tablas periódicas de excelente calidad, además de con

variada y extensa información, que en la actualidad se encuentran disponibles tanto en la bibliografía como en Internet, desde un principio nos pareció que un proyecto novedoso y estimulante para nuestro alumnado podría consistir en la creación de una TP diferente a la mayoría de las que hoy se encuentran a disposición del público en general. Además, y considerando el consumo y el gusto por los medios y recursos audiovisuales, principalmente entre nuestros jóvenes, pensamos que el modo de llegar mejor a ellos, tanto como protagonistas como público receptor del trabajo resultante, podría consistir en la utilización de lo audiovisual como herramienta primordial en la confección de nuestra TP. Estos han sido los incentivos más relevantes que

han dado modelado al proyecto y trabajo que aquí contamos y que hemos denominado *Vídeo-Tabla Periódica*.

Objetivos

No existe proyecto didáctico ni pedagógico que se precie como tal sin un adecuado y oportuno planteamiento del conjunto de objetivos que, con su desarrollo y ejecución, se pretendan alcanzar.

En nuestro caso podría resumirse la lista de objetivos señalando aquél que incluye a todos los que, en lo que sigue, se irán enumerando. Se trata, sin lugar a dudas, de lograr estimular a nuestros alumnos en algo tan fundamental para nosotros, profesores de Física y Química, como es incentivar su gusto e interés por las disciplinas y cuestiones científicas y, más concretamente, por lo relacionado con esas materias. Para conseguir esto decidimos, en el curso 2019-2020, participar en la celebración del AITP proponiendo varias actividades a nuestros alumnos. El principal exponente de estas actividades lo constituyó la creación de la TP ya mencionada; actividad que se alargó en el tiempo y no pudimos concluir hasta el curso 2020-2021, entre otras causas por las relacionadas con la pandemia asociada a la COVID-19, principalmente. A lo largo del desarrollo del proyecto nos propusimos conseguir que los estudiantes se sintieran protagonistas absolutos de su obra y, para ello, que asumieran un

compromiso firme y responsable frente a la parte del trabajo que les correspondiera realizar. Por otra parte, la participación del estudiante conduciría a la adquisición de competencias tanto en el conocimiento de la TP como en lo relativo a los detalles de algunos de los elementos químicos; también contribuiría a mejorar sus dotes expositivas, aunque esto se realizara a través de una cámara. Y, por último, la voluntad de todos, profesores y estudiantes, consistió en contribuir a la conmemoración de la TP de Mendeléyev con nuestra visión propia y personal aportación a través de una vídeo-tabla.

Antecedentes

Ya en el año 2011, durante el Año Internacional de la Química (AIQ), participamos con una TP, además de otras diversas actividades. La TP y un buen número de estas actividades quedaron expuestas y recogidas en un artículo publicado en *Anales* en 2012.^[1] En aquella ocasión a la tabla que elaboramos, y cuya imagen se muestra en la Figura 1, la denominamos *Tabla Periódica Gigante*, por ser de gran formato (6 m x 3 m).

En la TP de 2011 se priorizó la difusión de los elementos químicos en el aspecto visual, de tal modo que, junto con los detalles concernientes a la información más relevante (etimología del nombre, descubrimiento, usos...), se mostraban las imágenes del elemento en estado puro y de algunas de sus aplicaciones, como en el ejemplo que se aprecia en la Figura 2.

El detalle de todos los elementos está disponible en la página web del Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja.^[2] También algunas imágenes de la TP completa, así como la información acerca de la participación en el concurso nacional de 2019 *Nuestra Tabla Periódica*,^[3] en el que resultó ganadora del segundo premio.^[4]

Decidimos ampliar la información correspondiente a cada elemento a partir de la expuesta en esta tabla, aunque manteniendo el carácter de hacerla asequible a cualquier público re-



Figura 1. Tabla Periódica Gigante del IES Valle del Saja.



Figura 2. Elemento de la Tabla Periódica Gigante del IES Valle del Saja.

lacionado con la ciencia, sin el requisito de estar especialmente versado en su vertiente físico-química. Además, procedimos a grabar en vídeos la información concerniente a cada elemento.

Planteamiento y desarrollo metodológico

Se dio inicio a este trabajo planteando las características generales, además de las líneas básicas de lo que se pretendía conseguir, a los estudiantes de Bachillerato de la modalidad de Ciencias y Tecnología. Se les explicó que la participación sería voluntaria pero, también, que debían comprometerse con la finalización de la parte del trabajo que se les propusiera e iniciaran. Este extremo era importante ya que su contribución al proyecto implicaría tiempo de dedicación extra, es decir, ajeno al horario lectivo. En cualquier caso, la respuesta resultó muy satisfactoria: un elevado porcentaje de los alumnos de la etapa indicada aceptaron la propuesta con gran ilusión. También se planteó la propuesta a los estudiantes de la ESO, aunque, en este caso, la selección fue realizada por los profesores puesto que las tareas a realizar implicaban algunas dificultades, de cierto nivel de exigencia, para la mayoría de los estudiantes de dicho nivel educativo.

Posteriormente, y una vez analizado y decidido el modo en el que desarrollaríamos los diferentes aspectos del proyecto, propusimos a otras personas la participación en el mismo; esto queda detallado en un epígrafe posterior de este artículo. Además, añadimos un nuevo periodo a la TP, el número 8, en el que incluimos los elementos químicos números 119 y 120. Estos elementos aún no han sido descubiertos o sintetizados, sin embargo, desde hace unos años, hay científicos realizando experimentos con el objetivo de encontrarlos. En ese aspecto emulamos con nuestra tabla la *Tabla Periódica de los Elementos* creada por Pascual Román Polo en 2010, y editada ese mismo año por la *Editorial Tebar, S.L.* Una imagen de esta última puede verse en la Figura 3.

En el 2011 fueron los propios estudiantes los que se encargaron de investigar, seleccionar y redactar los diferentes aspectos de la información correspondiente a cada uno de los elementos químicos que debían aparecer en la TP Gigante, así como las imágenes que lo ilustraban; esa información era posteriormente analizada y contrastada por los profesores y, en los casos necesarios, corregida y modificada.

En el 2019, sin embargo, se decidió la elaboración por parte de los profesores de la información de cada elemento químico debido al carácter más extenso, completo y preciso con el que nos propusimos presentarla en la nueva TP. Por otra parte se procuró el máximo rigor, directriz que también caracterizó el contenido que muestra la TP Gigante.

Concedores de la cantidad de tablas repletas de datos físico-químicos, se priorizó otro tipo de información no por ello menos rigurosa. Finalmente, la información concerniente

Figura 3. Tabla Periódica de los Elementos. Pascual Román Polo, 2010.

MAGNESIO

Fue descubierto por Joseph Black, médico, físico y químico escocés. Desde la antigüedad eran conocidos y utilizados muchos de los compuestos de este elemento, pero la primera persona en reconocerlo como tal fue Joseph Black, en Edimburgo, en 1755. Humphry Davy, químico británico considerado el fundador de la electroquímica, fue el primero en aislarlo puro, aunque en cantidades muy pequeñas, por métodos electroquímicos en 1808. En 1831 el científico francés Bussy lo obtuvo en cantidades apreciables y estudió sus propiedades.

El nombre deriva del de una ciudad de la región de Tesalia oriental en Grecia.

Su aspecto es gris metálico y brillante. Es dúctil, maleable y muy ligero, con una densidad 2/3 la del aluminio. Es menos reactivo que los alcalinos y su química es similar a la de otros alcalinotérreos. En contacto con el aire se recubre de una capa de óxido de color blanco y arde con una llama blanca muy brillante.

Se trata de un elemento clave en la fabricación de aleaciones ligeras, junto con el aluminio, como base de las industrias automovilística y aeronáutica o en implantes cardiovasculares y ortopédicos. También se usa en protección y en bombas incendiarias, como mordiente para tintes, en la fabricación de ladrillos resistentes al calor y agregado a los plásticos para hacerlos ignífugos así como a la alimentación del ganado y a los fertilizantes. Otros compuestos se usan en medicina o en la industria química.

Es un elemento esencial tanto en la vida vegetal como animal. Sin él la fotosíntesis no podría tener lugar, ya que es elemento constituyente de la clorofila, y la vida tal como la conocemos no existiría. En humanos, es esencial para el funcionamiento de cientos de enzimas. Debemos ingerir entre 250 y 350 miligramos por día y almacenamos unos 20 gramos, principalmente en los huesos.

Es el octavo elemento más abundante en la corteza terrestre y el tercero en el agua del mar, pero no se encuentra libre en la naturaleza. Se extrae de grandes depósitos en minerales terrestres y del mar, que contiene billones de toneladas, siendo la fuente de gran parte de las 850 000 toneladas que en la actualidad se producen cada año.

ARSÉNICO

Fue aislado puro por primera vez por Alberto Magno, alrededor de 1250, aunque ya los antiguos egipcios lo utilizaban. Lo obtuvo por calentamiento de una muestra del mineral oropimente con cierto jabón. Más tarde, en 1649, fue aislado en su forma metálica por el químico alemán Johann Schröder.

Parece ser que el nombre de este elemento proviene del vocablo griego, que a su vez deriva del indoeuropeo, que hace referencia a lo masculino, lo vigoroso.

Se trata de un semimetal que se presenta en tres formas alotrópicas: amarilla, gris y negra. La gris es su forma metálica y es brillante, gris plateada, quebradiza y bastante estable. La amarilla y la negra se comportan como no metales.

Mucho se ha hablado sobre su efecto tóxico a través de historias como el supuesto envenenamiento de Napoleón con sales del elemento, pero poco se habla de alguno de sus efectos beneficiosos a nivel metabólico. Muchos preparados han sido utilizados a lo largo de la historia como medicamentos, como el "Salvarsan", desarrollado por Paul Ehrlich, que constituyó el primer tratamiento para la sífilis y el primer agente de quimioterapia conocido, o su uso como tónico de cura popular en la Inglaterra de la época victoriana.

Entre los usos más notables está la preservación de la madera en el que se usa el 70 %, como aditivo para endurecer balines de plomo, como agente de dopaje en semiconductores, para la construcción de circuitos más rápidos que los de silicio y para la generación de diodos láser y LED. Recientemente se está estudiando su uso en el tratamiento de un tipo de leucemia.

Es esencial para la vida y se estima necesaria una ingesta diaria de 12-15 µg a través de la dieta, pues parece intervenir en el metabolismo del zinc y en la síntesis de proteínas. En dosis tóxicas se une a los átomos en el cabello.

En la naturaleza, además del oropimente que se puede encontrar en las fumarolas de los volcanes y en fuentes hidrotermales templadas, también podemos encontrarlo en forma nativa o en otros minerales en conjunción con otros metales como Pb, Fe o Cu.

En España se encuentra en diversos yacimientos de los que destaca el de Guadalcanal (Sevilla) en el que se halla formando nódulos esféricos con plata nativa. China es el mayor productor. Ocupa la posición número 52 en abundancia en la corteza terrestre y no se prevé su disponibilidad en un plazo superior a los próximos 100 años.

YODO

Fue descubierto en 1811 por el químico francés Bernard Courtois, en París, de manera accidental, mientras fabricaba salitre. Observó humos púrpuras que se condensaron para formar cristales con un brillo metálico. Courtois supuso que se trataba de un elemento nuevo y Joseph Gay-Lussac lo demostró. Humphry Davy, quien estaba de visita en París, lo confirmó. Davy envió un informe a la Royal Institution en Londres, donde se asumió erróneamente que él era el descubridor, una creencia que persistió durante más de 50 años.

Su nombre procede del vocablo griego de significado "color violeta".

Es negro, brillante, cristalino y el único halógeno sólido a temperatura ambiente. Cuando se calienta, se sublima para formar un vapor púrpura.

Actualmente sus usos comerciales son muchos. Sus compuestos se utilizan en productos farmacéuticos y desinfectantes, tintes, catalizadores, suplementos para piensos, filtros de mascarillas antiguas o productos químicos fotográficos. También se usa para hacer filtros polarizadores para pantallas LCD. En medicina se utiliza para desinfectar heridas y como medio de contraste en rayos X. También tiene aplicaciones en la fabricación de baterías utilizadas, por ejemplo, en los marcapasos. En los últimos años se ha puesto la atención en el uso para el diseño farmacéutico, cristales líquidos e impresoras 3D. Además, representa la base molecular de materiales electrónicos e informáticos.

Se trata de un elemento esencial para los humanos, principalmente para la glándula tiroidea. La falta del elemento conduce al bocio, razón por la que a muchas sales de cocina se le añade. Uno de sus isótopos radiactivos se utiliza en ocasiones para tratar glándulas tiroideas cancerosas.

En el pasado se obtenía de las algas. Ahora las principales fuentes son los depósitos de salmuera natural que deja la evaporación de los mares y las aguas salobres de los pozos de petróleo y sal. En la actualidad la principal producción se encuentra en Chile y Japón.

XENÓN

Fue descubierto en julio de 1898, por William Ramsay y Morris Travers del University College de Londres, a partir de un líquido obtenido del aire. Al destilar la mezcla repetidamente, aislaron un gas más pesado, y cuando lo examinaron a través de un espectrómetro, observaron un hermoso resplandor azul. Se dieron cuenta de que se trataba de un nuevo elemento.

El nombre deriva de la palabra griega que significa "extraño".

En la naturaleza se presenta como un gas incoloro e inodoro y muy poco reactivo. Inicialmente considerado inerte, en 1962 se demostró que no lo era al sintetizar un derivado del flúor. En la actualidad se conocen más de 100 compuestos distintos cuando se combina, por ejemplo, con el flúor o el oxígeno.

Cuando se examina un tubo de descarga lleno del elemento, se observa una emisión azul intensa que se extiende hasta el ultravioleta cercano. Por ello, no solo se emplea en los faros de algunos automóviles, proyectores de cine y flashs de cámaras fotográficas, sino también en fotocopiadoras, impresoras, sistemas de broncoado, láseres de rubi o lámparas bactericidas para la preparación y procesado de alimentos. Sin embargo, alrededor del 15 % de su producción mundial se dirige a su uso como anestésico general debido a la escasez de sus efectos secundarios. En 1939 se observó que generaba cierto "estado de embriaguez" en los buzos que practicaban buceo profundo, pero no fue hasta 2007 cuando se comercializó el primer anestésico basado en este elemento. Además, se usa en tomografías de emisión fotónica que permiten examinar corazones, hígados y cerebros. Entre las aplicaciones más novedosas se encuentran los motores de propulsión que utilizan iones del elemento para viajes espaciales. En 2007, la nave espacial Dawn lanzada por la NASA, cuyo objetivo era analizar la superficie del asteroide Vesta y del planeta enano Ceres, iba equipada con un motor de este tipo y alcanzaba velocidades cercanas a 106 km/h. Se ha comprobado también que esta tecnología es capaz de alargar la durabilidad de un satélite de televisión en órbita durante más de 25 años.

Se encuentra presente a nivel de traza en la atmósfera terrestre, concretamente hay alrededor de 0,09 partes por millón en volumen. Comercialmente se obtiene como subproducto de la destilación fraccionada del aire líquido, aunque el elevado coste dificulta su amplio uso.

Figura 4. Ejemplos de algunos elementos: metal (Mg), no metal (I), semimetal (As) y gas noble (Xe).

a los elementos de la Vídeo-Tabla responde al detalle que se enumera a continuación:

- Etimología del nombre.
- Descubrimiento.
- Propiedades físico-químicas destacables.
- Aplicaciones más importantes.
- Abundancia.
- Otras características específicas.

Las fuentes que utilizamos para extraer y seleccionar la información relativa a los elementos fueron varias: páginas web^[5-8] en algunos casos y bibliografía escrita en otros^[9-13].

En la Figura 4 se muestran las imágenes de los archivos de texto en los que se presenta la información de algunos elementos químicos. Esta información se exponía a cada uno de los participantes; todos ellos debían analizarla, comprenderla e interiorizarla para relatarla y explicarla delante de la cámara.



Figura 5. Imágenes de algunos vídeos grabados por estudiantes.



Figura 6. Imágenes de algunos vídeos grabados por profesores.

Para llevar a cabo las grabaciones en vídeo, profesores y alumnos nos citábamos durante las tardes, fuera del horario lectivo. Esto nos permitía disponer de la concentración, el

silencio y el tiempo necesarios para ese cometido, además de no sufrir menoscabo las horas lectivas de dedicación a los contenidos de la asignatura. En las Figuras 5 y 6 pueden verse capturas de pantalla de algunos de los vídeos grabados y de sus protagonistas. Todos ellos están alojados tanto en el canal de YouTube del Departamento como en su página web.^[14,15]

Participantes

Como ya quedó antes indicado, la propuesta de participación en la Vídeo-Tabla no quedó limitada a los estudiantes sino que también se confió a otros colectivos. De manera primordial a nuestros propios alumnos pues ellos constituían el primer objetivo como protagonistas y creadores de la TP. No obstante, y con la intención de dotar al trabajo de una dimensión más global, se involucró a un reducido grupo de alumnos que cursaban sus estudios en otros centros de nuestra comunidad; también a antiguos alumnos de nuestro centro. En segundo lugar fueron los profesores de Física y Química, tanto de nuestro Instituto como de otros centros de Cantabria, los que también participaron. De este modo conseguimos el vínculo y la unidad que supone un proyecto colaborativo, lo que contribuye notablemente a la difusión y el uso de este trabajo. Y, por último, se involucraron distintos profesores de nuestro centro pertenecientes a disciplinas no científicas. La razón era la de conseguir un aumento de la cultura y la sensibilidad científicas de los compañeros que, a diario, no tienen ninguna relación con la enseñanza de las ciencias. Al igual que ocurre con los alumnos, el interés de ellos hacia los elementos de los que han informado en la tabla sobrevive al momento de la grabación. Es habitual que recojamos comentarios de personas que, a partir de este trabajo y su participación, se mantienen alerta ante cualquier información que tiene que ver con el elemento que han presentado haciéndolo, de algún modo, un patrimonio personal. Con todo esto creemos que el presente trabajo contribuye, cuanto menos, a mejorar la actitud y el interés hacia la ciencia de toda la comunidad educativa.

Resultado final

Finalmente, y con el objetivo de mostrar una TP en la que presentar los vídeos grabados, que recogen la información de cada elemento químico, asociados a la casilla correspondiente de la tabla, decidimos alojarla en la plataforma *Thinglink*.^[16] Resultó, así, una TP audiovisual rigurosa, ágil y tremendamente cómoda, ya que con un gesto tan sencillo como el consistente en clicar en el símbolo de un elemento químico en particular, se accede al vídeo en el que un estudiante o profesor, según el caso, relata la información correspondiente.

Por otra parte, y dado lo impactante y estético que resulta un mosaico con 120 rostros, decidimos crear la TP con la presentación que se contempla en la Figura 7. En ella puede también observarse la distinción mediante colores de los elementos metálicos (rojo), los no metálicos (azul) y los semimetálicos (verde). Además, se quiso marcar la peculiaridad de los gases nobles con un color propio, naranja en esta ocasión. Tanto la

imagen de la Vídeo-Tabla como alguna otra información relativa a ella puede consultarse en la web del Departamento.^[17]

Otro de los recursos digitales que en la actualidad nos facilitan las tecnologías de la información lo constituyen los códigos QR. Esta herramienta que permite remitir nuestros vídeos a una dirección web y, de manera tan sencilla, conseguir el acceso a ellos, hizo que también elaborásemos una TP con los correspondientes códigos enlazados a las casillas de los diferentes elementos. Esa TP, cuya imagen puede apreciarse en la Figura 8, se encuentra disponible en las paredes del IES Valle del Saja con la finalidad de que cualquiera de los miembros de la comunidad educativa pueda disponer

cómoda y rápidamente de la información que contiene; también se encuentra alojada en la web del Departamento.^[18]

Aproximación a la Vídeo-Tabla Periódica

Una manera de presentar y acercarse a lo que es la Vídeo-Tabla la constituyen dos vídeos editados y creados para conseguir dicho efecto. Vídeos que hemos denominado promocional y resumen; una captura de pantalla del primero que se cita se muestra en la Figura 9. Ambos pueden encontrarse en el canal de YouTube del Departamento.^[19, 20]



Figura 7. Imagen de la Vídeo-Tabla Periódica.



Figura 8. Imagen de la Tabla Periódica con códigos QR.

Conclusiones

La realización de trabajos como el aquí relatado contribuyen de manera notable a la didáctica de la química y de la física, en general, y de las características de los elementos químicos en particular, así como, de modo relevante, a la comprensión de la utilidad de la TP como herramienta indiscutible en ciencia.

Por otro lado, Implicar al alumno en un proyecto de divulgación de información científica supone que mantenga su vínculo con esa actividad más allá de su paso por el instituto. Nuestra experiencia con los trabajos realizados durante la celebración del AIQ de 2011, y más tarde, en 2019, con motivo del AITP, así lo demuestran.

Y haciendo referencia específica a la Vídeo-Tabla mostrada en este artículo, puede afirmarse que este modo de presentar la información sobre los elementos químicos no tiene en la actualidad muchos ejemplos similares y menos aún en español. Nos sentimos muy orgullosos en la medida en la que este proyecto pueda contribuir a la divulgación de un logro intelectual tan imprescindible como supone la TP. Además, el uso de esta herramienta, tal y como se ha concebido, creemos que será muy sencillo a la par que motivante para los estudiantes de generaciones presentes y futuras, dada la facilidad y frecuencia con que estos utilizan y reclaman los medios audiovisuales, no solo para el ocio personal, también para el aprendizaje.



Figura 9. Imagen del vídeo promocional de la Vídeo-Tabla Periódica.

Agradecimientos

No existe proyecto que pueda proseguir y llegar a ejecutarse sin la colaboración y el trabajo de personas y/o instituciones. El que aquí ha quedado expuesto ha requerido de muchas personas, 120 en concreto, tantas como elementos químicos presentados. A todas ellas, estudiantes y profesores, dedicamos estas líneas. El hecho de que a partir de la propuesta inicial que se les planteó, respondieran afirmativa y positivamente, sin poner ningún tipo de cortapisa, a pesar de los inconvenientes que, en más de un caso, hubo que salvar (tiempo disponible, dificultades en la comprensión de la información de los elementos, etc.), hace que nos sintamos

especialmente agradecidos con todos y cada uno de ellos. Comprobar la positividad y el optimismo de estas personas, su implicación, su contribución en la elaboración de una herramienta de tanta utilidad y sus ganas de colaborar y de aprender, han conseguido que nos sintamos no solo agradecidos sino también orgullosos de la comunidad educativa a la que pertenecemos. Sin todas y cada una de esas personas esta tabla no habría sido posible.

Bibliografía

- [1] A. Aguayo y C. Gutiérrez. El Año Internacional de la Química: una celebración útil para la docencia de la química en la educación secundaria. An. Quím., 2012.
- [2] Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja (página web). Sistema Periódico. <http://www.fqsaja.com/?p=7757>
- [3] G. Pinto Cañón. El concurso escolar "Nuestra Tabla Periódica": una iniciativa para fomentar la motivación de profesorado y alumnado en áreas STEAM. An.Quim., 2019.
- [4] Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja (página web). Sistema Periódico: Imágenes. <http://www.fqsaja.com/?p=9294>
- [5] Real Sociedad Española de Química. <https://rseq.org/> (visitada el 01/02/2022).
- [6] The Royal Society of Chemistry. <https://www.rsc.org/> (visitada el 01/02/2022).
- [7] American Chemical Society. <http://www.acs.org/> (visitada el 01/02/2022).
- [8] Webelements. <https://www.webelements.com/> (visitada el 01/02/2022).
- [9] H. Aldersey-Williams. *La Tabla Periódica*, Ariel, 2011.
- [10] S. Kean. *La Cuchara Menguante*, Ariel, 2010.
- [11] A. Navarro Yáñez. *El Secreto de Prometeo y otras historias sobre la Tabla Periódica de los Elementos*, Guadalmazán, 2015.
- [12] J. Elguero Bertolini, P. Goya Laza, P. Román Polo. *La tabla periódica de los elementos químicos*, Catarata, 2019.
- [13] R. Prego Reboredo. *Las tierras raras*, Catarata, 2019.
- [14] Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja (canal de YouTube). Vídeos Vídeo-Tabla Periódica. <https://www.youtube.com/channel/UC1OZGbzXo9TgNgHlufaQbiw>
- [15] Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja (página web). Vídeos Vídeo-Tabla Periódica. http://www.fqsaja.com/?page_id=7430
- [16] Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja (canal de Thinglink). Vídeo-Tabla Periódica. <https://www.thinglink.com/scene/137476623444234754>
- [17] Departamento de Física y Química (página web). Vídeo-Tabla Periódica. <http://www.fqsaja.com/?p=9797>
- [18] Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja (página web). Vídeo-Tabla Periódica y los códigos QR. <http://www.fqsaja.com/?p=10319>
- [19] Departamento de Física y Química (canal de YouTube). Vídeo promocional Vídeo-Tabla Periódica. https://www.youtube.com/watch?v=mMTitGxu_t0
- [20] Departamento de Física y Química (canal de YouTube). Vídeo-resumen Vídeo-Tabla Periódica. <https://www.youtube.com/watch?v=uaKpRv4hlu8>

ENSEÑANZA
DE LA QUÍMICA



Josep Corominas¹

Aureli Caamaño²

^{1,2} Centre Didàctic de Ciències
Experimentals

Col·legi de Doctors i Llicenciats
de Catalunya

Rambla de Catalunya, 8
08007 Barcelona

¹Ce.: jcoromi@xtec.cat

²Ce.: aurelicaamano@gmail.com

Recibido: 26/01/2022

Aceptado: 12/05/2022

De la pila Bagdad a una pila con un sacapuntas y una mina de lápiz, pasando por la pila Daniell y la pila de Volta

Josep Corominas y Aureli Caamaño

Resumen: A principios del siglo XIX, Alessandro Volta presentó la primera pila electroquímica; desde entonces el conocimiento de las reacciones que generan corriente eléctrica no ha cesado de progresar. Este artículo presenta la construcción de diversas pilas electroquímicas usando materiales cotidianos. Se comienza reconstruyendo un supuesto dispositivo electroquímico, la pila de Bagdad, que data del siglo II aC, y se continúa con la construcción de una pila Daniell portátil, una pila tipo Volta y una pila casera mediante un sacapuntas y un lápiz.

Palabras clave: Pilas galvánicas, pila de Volta, fuerza electromotriz, reacciones redox.

Abstract: At the beginning of the 19th century, Alessandro Volta presented the first electrochemical cell; Since then, the knowledge of the reactions that generate electric current has not stopped progressing. This article presents the construction of various electrochemical cells using everyday materials. It begins by rebuilding a supposed electrochemical device, the Baghdad battery, dating from the second century BC, and continues with the construction of a portable Daniell battery, a Volta-type battery and a homemade battery using a pencil sharpener and pencil.

Keywords: Galvanic cells, Volta's cell, electromotive force, redox reactions.

Introducción

Las pilas electroquímicas han sido uno de los más importantes descubrimientos de la historia. En todos los países los respectivos currículos tienen uno o varios capítulos dedicados a los conceptos relacionados con la producción de electricidad mediante reacciones químicas de oxidación-reducción. En la mayoría se señala la importancia de contextualizar situaciones relacionadas con la vida cotidiana de los estudiantes haciendo ver su interés en los aspectos personales, profesionales y sociales^{1,2}.

En este artículo se describen diferentes maneras de montar pilas electroquímicas, usando materiales al alcance de cualquier estudiante, indicando en cada uno de los experimentos la reacción química que tiene lugar. Cada una de las actividades descritas puede servir para diferentes niveles de la enseñanza, según la forma en que se presentan.

1. La llamada "pila de Bagdad"

El año 1936 unos arqueólogos encontraron en las afueras de la ciudad de Bagdad una jarra datada en el siglo II antes de nuestra era, que consideraron podía ser la primera pila electroquímica conocida. Un recipiente de arcilla que contenía un tubo cilíndrico de cobre y dentro un cilindro de hierro, aislado del cobre por un tapón (Figuras 1 y 2).



Figura 1. La "pila de Bagdad" (<https://www.bbc.com/mundo/noticias-39558387>, visitada el 31/05/2022)



Figura 2. Reconstrucción de la pila de Bagdad (<https://www.bbc.com/mundo/noticias-39558387>, visitada el 31/05/2022)

El hecho de que hubiera dos metales y fuera posible rellenar el espacio entre ellos con un electrolito (vinagre o zumo de frutas) hizo pensar en un primitivo dispositivo electroquímico. Sin embargo, no se pudo determinar si el dispositivo tuvo la utilidad que se le había supuesto al no haberse encontrado restos de cables para conexión ni objetos plateados o dorados cerca. La jarra estuvo en las vitrinas del museo de Bagdad hasta que, tras sucesivos disturbios y expolios, desapareció en 2003.

En primer lugar, reconstruiremos la supuesta "pila" y mediremos su fuerza electromotriz (FEM, E°_{pila}). Este valor lo compararemos con el valor de E°_{pila} calculado a partir de los potenciales estándar de reducción (E°) de las semirreacciones que tienen lugar:

$$E^{\circ}_{pila} = E^{\circ}_{red,cátodo} - E^{\circ}_{red,ánodo}$$

o del potencial estándar de oxidación y el de reducción:

$$E^{\circ}_{pila} = E^{\circ}_{oxid,ánodo} + E^{\circ}_{red,cátodo}$$

Hay que tener en cuenta que ambos valores (E_{pila} i E°_{pila}) solo coincidirán si las concentraciones de las disoluciones usadas son de 1 mol dm⁻³. En caso contrario, el valor calculado de E°_{pila} solo coincidirá aproximadamente con el medido.

Material

- Un bote pequeño de barro, si puede ser parecido al de la Figura 1.
- Tubo de cobre, diámetro aproximado de 1 cm y longitud la altura del bote de barro.
- Clavo de hierro no galvanizado de longitud algo mayor que la del tubo de cobre.
- Vinagre comercial (6% en ácido acético, que corresponde aproximadamente a 1 mol/L).
- Vela.

Montaje de la pila

Con la vela encendida se deja caer cera en el fondo del bote. Antes de que solidifique, se fija el tubo de cobre al fondo y, a continuación, se fija dentro del tubo el clavo de hierro, sin que se toquen (Figura 3).

Se vierte vinagre en el espacio entre el tubo y el clavo.



Figura 3. Dos "pilas de Bagdad". Se pueden usar pequeñas jarras que se venden en mercados navideños para decoración del Belén.

Medida del voltaje

Se conecta un voltímetro a los electrodos de la pila: el polo positivo del voltímetro se conecta al tubo de cobre (supuesto polo positivo) y el negativo al clavo de hierro (supuesto polo negativo de la pila) (Figura 4).

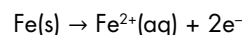


Figura 4. Se llena el espacio entre el tubo de cobre y el clavo de hierro con vinagre y se conectan los electrodos a un voltímetro. En los primeros instantes, la diferencia de potencial es de 0,54 V. Al cabo de unos minutos sube a 0,60 V.

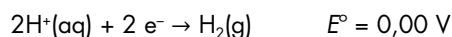
Interpretación de la reacción

El hecho de que la diferencia de potencial medida sea positiva nos indica que efectivamente el clavo de hierro es el ánodo (electrodo negativo), donde tiene lugar la oxidación, y el cobre el cátodo (electrodo positivo), donde tiene lugar la reducción.

La semirreacción de oxidación que tiene lugar en el ánodo es:

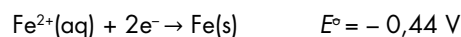


Pero, ¿cuál es la semirreacción de reducción que puede tener lugar en el cátodo? Puesto que se utiliza un medio ácido, puede suponerse que se reducen los iones hidrógeno:



La observación de un ligero desprendimiento de burbujas parece confirmar esta hipótesis.

El potencial estándar de reducción de la semirreacción de reducción del $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ es:



Por tanto, los potenciales estándar de reducción confirman que el Fe(s) se oxidará y los iones $\text{H}^{+}(\text{aq})$ se reducirán, y que la FEM de la pila en condiciones estándar será:

$$E^{\circ}_{pila} = E^{\circ}_{red,cátodo} - E^{\circ}_{red,ánodo}$$

$$E^{\circ}_{pila} = 0,0\text{V} - (-0,44 \text{ V}) = +0,44 \text{ V}$$

Una medida de la intensidad suministrada por la pila da valores muy pequeños, alrededor de 5 mA. Ello nos lleva a la conclusión de que el dispositivo no fue concebido como pila electroquímica. Queda abierto el debate de cuál fue su verdadera utilidad.

2. Un puente salino eficaz y original para una pila galvánica clásica

La Figura 5 muestra un esquema de una pila galvánica con electrodos de Zn y Cu (pila Daniell), sumergidos en disoluciones de $ZnSO_4$ y $CuSO_4$, respectivamente, de concentración $1,0 \text{ mol dm}^{-3}$. El puente salino permite mantener el flujo de iones que equilibran las cargas eléctricas generadas en los procesos de oxidación y de reducción.

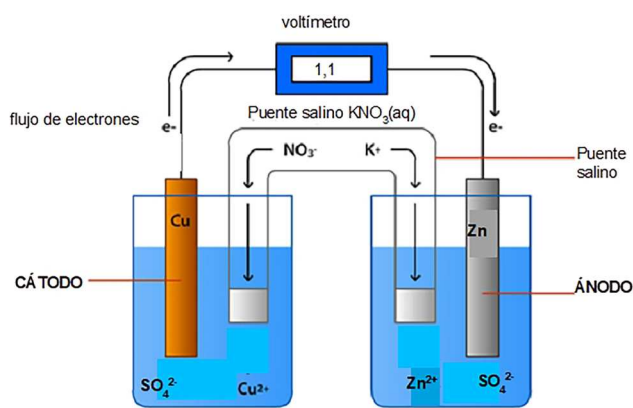


Figura 5. Pila galvánica con los metales cobre y zinc en contacto con las respectivas disoluciones de sus iones. http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Voltaic_Cells

Como se ve en el esquema de la figura 5, la pila tiene el inconveniente de su difícil transporte al estar formada por recipientes con líquidos. En el siguiente dispositivo (Figura 6A) se muestra cómo se puede solucionar este problema usando espuma floral, impregnada con las soluciones iónicas³.

La **espuma floral** es una resina de fenol-formaldehído esponjosa. Se usa en floristería para mantener flores en buen estado sin necesidad de introducirlas en un jarro con agua. La comercializa OASIS Floral Products®. OASIS Bio Maxlife® también produce una esponja con iguales características de absorción de agua y biodegradable a partir de polvo de roca volcánica.

Construcción de una pila Daniell con espuma floral

Material

- 3 bloques de espuma floral (en la Figura 6A miden $5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$), pero las medidas son indiferentes.

- Láminas de cobre y zinc (unos $5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$).
- Disoluciones $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ de sulfato de cobre (II), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, y de sulfato de zinc ($ZnSO_4$).
- Disolución de nitrato de potasio, KNO_3 . Se recomienda concentración $1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, pero puede ser de valores inferiores.
- 3 recipientes para dejar en remojo los bloques de espuma floral en las disoluciones.
- Voltímetro.

Usar guantes para manejar las espumas una vez empapadas de solución.

Montaje de la pila

Se deja en remojo varias horas cada uno de los bloques en sus respectivas disoluciones.

Se introduce la lámina de cobre en el bloque impregnado con la solución de sulfato de cobre y la lámina de zinc en el bloque impregnado con la solución de sulfato de zinc.

Se monta la pila tal como muestra las Figuras 6 A y 6B.

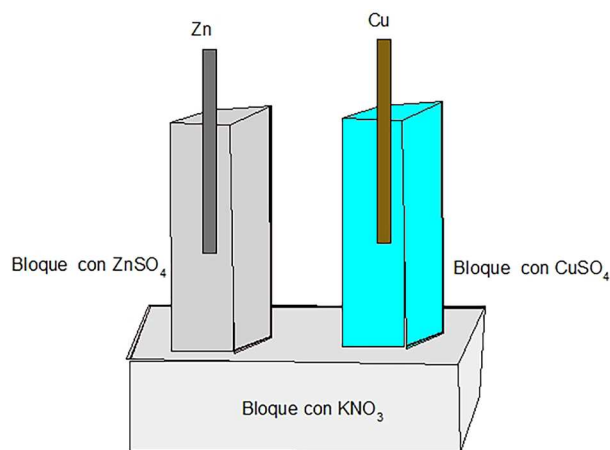


Figura 6A. Pila de Daniell "portátil" con bloques de espuma floral.

Medida del voltaje

Se conecta un voltímetro con el polo positivo unido al electrodo de cobre y el negativo al electrodo de zinc.

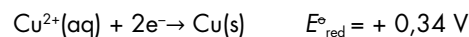
El voltaje medido varía entre 1,0 y 1,1 V (Figura 6B).

Interpretación de la reacción

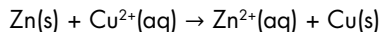
La semirreacción de oxidación que tiene lugar en el ánodo es:



La semirreacción de reducción que tiene lugar en el cátodo es:



La reacción global es:



$$E_{\text{pila}}^{\circ} = 0,76 \text{ V} + 0,34 \text{ V} = 1,10 \text{ V}$$

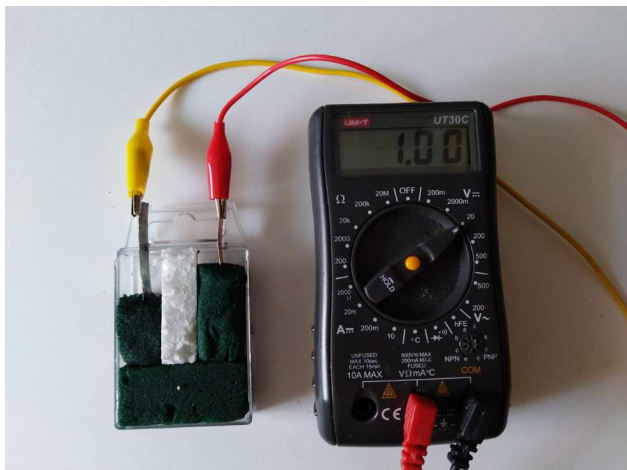


Figura 6B. Pila de Daniell "portátil". Se ha montado aprovechando una caja que contenía tornillos de ferretería. Un trozo de porexpan mantiene fijos los elementos.

Aspectos de seguridad y gestión de los residuos

Las disoluciones de sulfato de cobre (II) y sulfato de zinc pueden provocar irritación cutánea y ocular. Los restos deben depositarse en los correspondientes contenedores.

La espuma floral se corta fácilmente con un cuchillo. Deben tomarse precauciones por posibles alergias e irritaciones.

Los bloques, una vez usados, se guardan en bolsas o en frascos que cierren herméticamente. Se pueden usar varias veces.

Evidentemente cualquier material poroso y con cierta consistencia sirve en lugar de la espuma floral. Se ha probado con patata, preparados de gelatina y tofu con resultados muy parecidos a los de la espuma floral. El inconveniente es que cualquier tipo de alimento se estropea y no es posible reutilizarlo.

3. La pila de Volta

En una carta con fecha 20 de marzo de 1800 dirigida a la *Royal Society* en Londres⁴, Alessandro Volta detalló por primera vez la construcción de su pila. Sus observaciones partían de los informes de Luigi Galvani de unos años antes sobre las contracciones de la pata de una rana al entrar en contacto con dos metales diferentes. Para Volta es el contacto de dos metales distintos a través de una solución salina lo que crea una tensión eléctrica. Volta usó zinc y plata (Figura 7). Esta última se puede reemplazar por cobre.

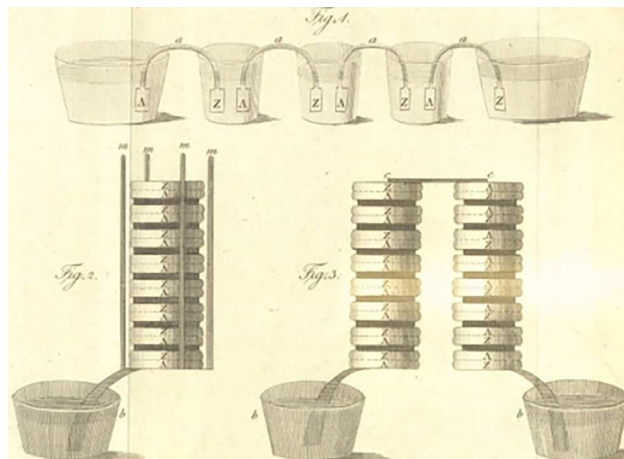


Figura 7. Los dibujos de la pila de Volta se encuentran en la carta dirigida a la Royal Society. Empezando por abajo la sucesión de elementos es: A(plata), Z (zinc), disco de fieltro o cartón empapado en una solución salina...

¿Que indujo a Volta a interponer discos de fieltro o cartón empapados en solución salina? Seguramente Volta razonó que, si el apilamiento fuera plata/zinc/plata/zinc/plata/zinc..., el primer contacto plata /zinc (A/Z) generaría una tensión eléctrica, pero el siguiente par Z/A generaría una tensión nula⁵. Por tanto, el papel de los discos era impedir los contactos directos entre los pares A/Z y Z/A

No fue hasta los experimentos de Michael Faraday que quedó claro que la causa de la corriente generada era la oxidación del zinc ya fuera por el oxígeno disuelto en el agua salada o por los iones hidrógeno del agua acidulada, si se usara esta para mojar los discos.

Construcción de una pila de Volta con monedas

Material

- Monedas de 1, 2 o 5 céntimos de euro (son de acero recubierto de cobre).
- Discos de fieltro de un diámetro igual al de la moneda escogida.
- Discos o trozos de zinc del tamaño equivalente a las monedas empleadas.
- Soporte para mantener apiladas las monedas.
- Agua salada.
- Voltímetro.

Montaje de la pila y medida del voltaje

Es importante tener algún tipo de soporte para apilar las monedas e impedir que la columna se desplome. En las Figuras 8A y 8B se ha usado un tubo de metacrilato seccionado a lo largo, dejando una abertura de unos milímetros para permitir la correcta colocación de los elementos.

Se mojan los discos de fieltro en agua salada (una cucharadita de sal de cocina en un vaso pequeño con agua del grifo).

Se van colocando en el siguiente orden las piezas: moneda-fieltro-pieza de zinc-moneda-fieltro-pieza de zinc... (Figuras 8A y 8B).

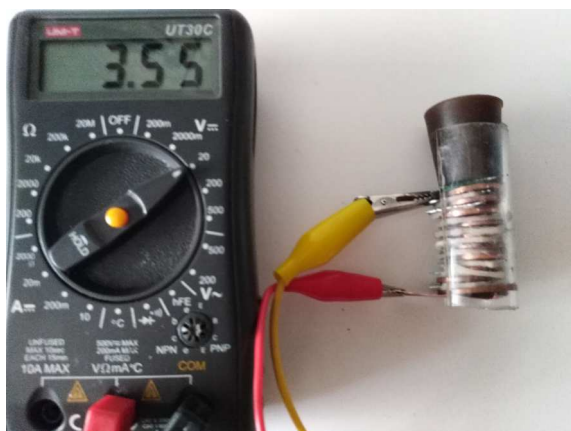


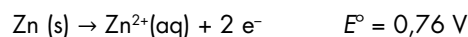
Figura 8A. Pila de Volta con 10 monedas de 2 céntimos de euro y los correspondientes fieltros y trozos de zinc. Los fieltros se han mojado con agua salada. Una pequeña placa de cobre en contacto con la moneda inferior facilita la conexión con pinzas de cocodrilo. Voltaje obtenido: 3,55 V.



Figura 8B. Pila de Volta con 100 monedas de 2 céntimos de euro y los correspondientes fieltros y trozos de zinc. Los fieltros se han mojado con agua salada. La columna mide 30 cm. Voltaje obtenido: 77 V. La intensidad es muy pequeña, del orden de 31 mA

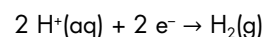
Interpretación de la reacción

En el ánodo se produce la oxidación del zinc:

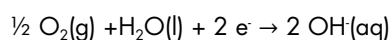


Surge la pregunta de qué especie química recoge los electrones que se liberan en el ánodo. Tanto la plata como el cobre se comportan como electrodos inertes. La pila de Volta difiere en ese aspecto de la pila Daniell, en la cual la presencia de iones $\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$ explica la semirreacción de reducción.

Una hipótesis podría ser que se reducen los iones H^{+} de la solución salina que se forman por la autoionización del agua. La semirreacción de reducción en el cátodo sería entonces:



Sin embargo, no se observa desprendimiento de gas. De hecho, la concentración de iones H^{+} es muy baja en una solución salina. En realidad, es el oxígeno disuelto en la solución salina la especie que interviene en la semirreacción de reducción⁵:



Una comprobación de la intervención del oxígeno lo podemos hacer mediante el experimento siguiente.

El papel del oxígeno en la pila de Volta

Material

- Una pila de Volta.
- Voltímetro.
- Frasco que cierre herméticamente y en el que pueda extraerse el aire. Se pueden encontrar en tiendas para accesorios de cocina. Debe tener un volumen suficiente para poner dentro el voltímetro, la pila y los cables de conexión.
- Pequeña bomba de vacío manual para extraer el aire del frasco.

Procedimiento

Una vez preparada la pila de Volta, se introduce en el frasco junto con un voltímetro con las correspondientes conexiones. Se cierra el frasco.

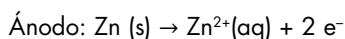
Se toma nota del voltaje que indica el voltímetro (Figura 9 A). Este valor corresponde a la pila funcionando en contacto con aire a presión atmosférica.

A continuación, se extrae una cierta cantidad de aire usando la bomba de vacío manual y se toma nota del nuevo voltaje (Figura 9B).

Como se puede apreciar en los valores indicados de voltaje, al extraer una cierta cantidad de aire el voltaje disminuye de 3,92 V a 3,16 V, es decir, en un 19%. Por tanto, se ha constatado que el voltaje de la pila depende de la

concentración de oxígeno presente en el aire (y también en la disolución) y que, por tanto, el oxígeno es la especie química que se reduce. Experimentos más cuidadosos y con mejor material dan lugar a resultados parecidos⁶.

En conclusión, en la pila de Volta, las dos semirreacciones que tienen lugar son:



Y la reacción total es:

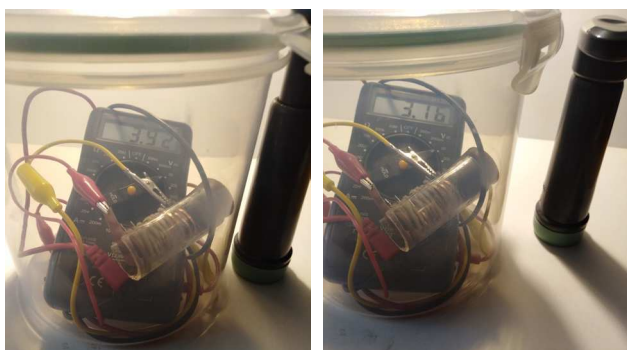
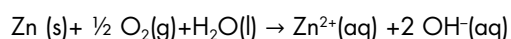


Figura 9A (izquierda). Pila de Volta con 5 monedas de 2 céntimos de euro y los correspondientes filtros y discos de zinc. La pila se ha colocado en un frasco de 2 L en el que puede extraerse el aire. El voltímetro marca 3,92 V.

Figura 9B (derecha). Se extrae un pequeño volumen de aire. El voltímetro marca ahora 3,16 V. Al dejar entrar aire de nuevo, el valor inicial se recupera. La bomba manual se aprecia a la derecha del frasco. Al ser de polipropileno, solo se pueden hacer unos 10 extracciones antes de que la presión exterior lo deforme. Un sencillo cálculo indica que solo se ha extraído un 15% de oxígeno.

4. Pila con sacapuntas y lápiz

Muchos estudiantes se sorprenden cuando se les dice que pueden montar una pila con objetos que llevan para trabajar en clase. Buscando en su estuche escolar siempre hay lápices y sacapuntas. Con ellos pueden montar una pila^{7,8}.

Podemos tener una pequeña colección de metales con diversos sacapuntas que venden en papelerías (Figura 10). Los sacapuntas de magnesio (marca KUM®) se consiguen en comercios especializados en material de dibujo artístico.



Figura 10. Pequeña colección de sacapuntas metálicos. De izquierda a derecha: de magnesio, de aluminio, de zinc y de latón.

En la pila de Volta, es el metal zinc el reductor ($E^{\circ}_{\text{red}} = +0,76 \text{ V}$). De la colección de metales de la Figura 10, el magnesio actuará como un reductor más eficaz al ser su $E^{\circ}_{\text{red}} = +2,38 \text{ V}$. Como cátodo se utiliza el grafito de una mina de lápiz.

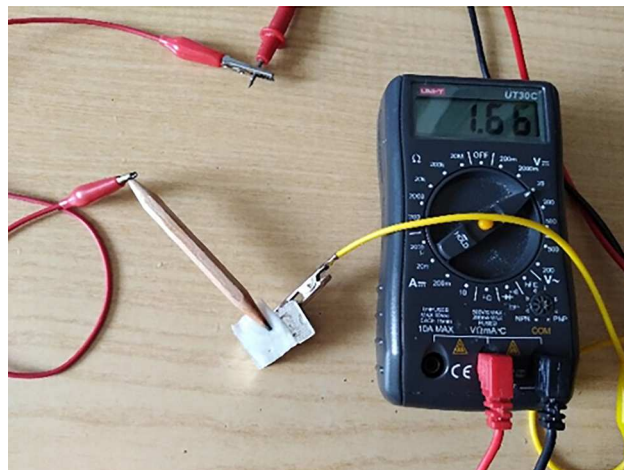


Figura 11. Entre el sacapuntas y el lápiz, se intercala un trocito de papel de cocina mojado en agua salada. Previamente con el sacapuntas, se descubre la mina del lápiz por los dos extremos.

Como electrolito se puede utilizar una solución salina, obteniéndose un voltaje de 1,66 V (Figura 11), o una solución ácida –por ejemplo, de vinagre–, en cuyo caso el voltaje obtenido es todavía algo mayor, llegando a los 1,80 V. En este caso la reacción de reducción forma gas hidrógeno, $\text{H}_2(\text{g})$, a partir de los iones $\text{H}^{+}(\text{aq})$.

El voltaje y la intensidad proporcionada por una pila de este tipo permiten activar un reloj digital (Figura 12).

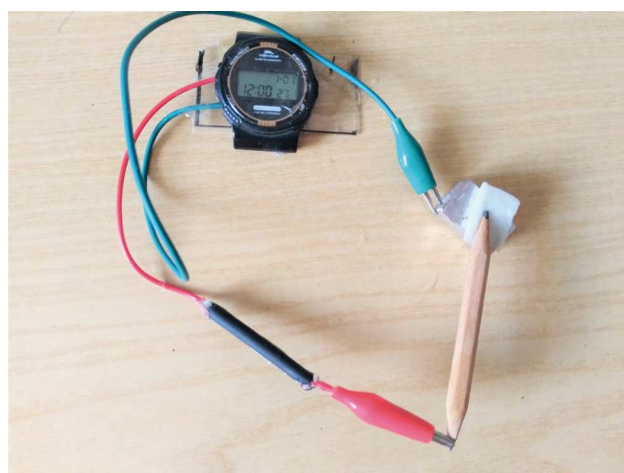
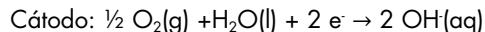
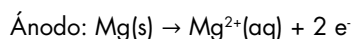


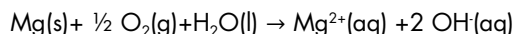
Figura 12. El voltaje y la intensidad de una pila con sacapuntas de magnesio permiten activar un reloj digital.

Interpretación de la reacción

Las semirreacciones de oxidación y de reducción que tienen lugar, utilizando un papel impregnado de una solución salina, son:



La reacción total es:



Usando un trozo de papel indicador humedecido con agua desionizada entre el sacapuntas y la mina del lápiz, se observa el cambio de color a medio básico, lo que confirma la producción de iones OH⁻ en el cátodo (Figura 13).

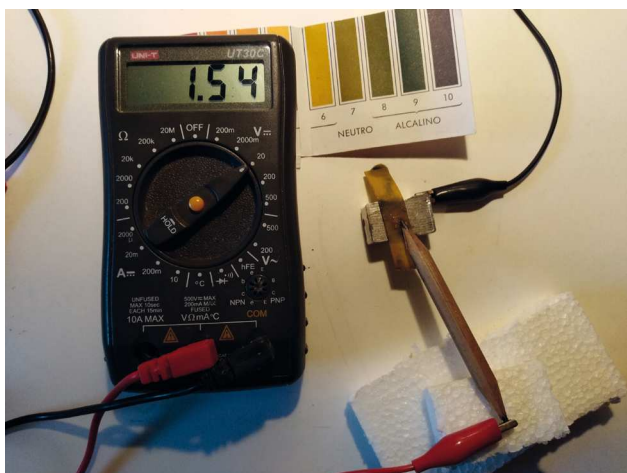


Figura 13. Evidencia de la formación de un medio básico en el cátodo.

5. Conclusiones

Los experimentos y montajes presentados en este artículo pueden utilizarse en 4º de ESO y en cursos del bachillerato. Todos ellos se han presentado en diversos cursos de formación, organizados en Cataluña por el *Departament d'Educació* y por la *Fundació Catalana per a la Recerca i la Innovació*.

Debido a las restricciones Covid de los dos últimos cursos, la presentación se hizo *on line*. Los profesores participantes realizaron los experimentos con sus alumnos con los recursos de que disponían en sus centros.

Es importante hacer notar a los estudiantes cómo evolucionó la interpretación inicial de los dos metales como agentes causantes de la generación de electricidad a una idea basada en la separación de las semirreacciones de oxidación y reducción en un dispositivo, independientemente de cuáles sean las especies químicas que intervienen en las semirreacciones.

6. Bibliografía

- [1] D. C. Orlich, R. J. Harder, R. C. Callahan, M. S. Trevisan, A. H. Brown, D. E. Miller; *Teaching Strategies. A Guide to Effective Instruction*, 10.ª ed., 2012, Wadsworth Cengage Learning. Belmont. California.
- [2] M. Rocard, *Science Education Now: A Renewed Pedagogy for the Future of Europe* (2007). <http://bit.ly/1ixEQz5> (visitada el 31/11/2021).
- [3] Este montaje fue presentado por Brigitte Leyh-Nihant, profesora en el Athénée Royal d'Eupen en el congreso de la asociación ABPPC (*Association belge des professeurs de physique et chimie*), Mons, 2019. Fue presentado también por la delegación belga en *Science on Stage 2019*, Cascais, Portugal.
- [4] On the Electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In a letter from Mr. Alexander Volta (...). <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1800.0018>
- [5] G. Cosentino, La pile de Volta comme vous ne l'avez (peut-être) jamais vue, *Bulletin de l'ABPPC*, 57, 213, 2019.
- [6] T. Clarke, M. Glasscott, J. Dick, The role of oxygen in the voltaic pile. *J. Chem. Educ.*, 2021, 98, 2927–2936.
- [7] J. Corominas, El sorprenent comportament d'algunes maquinetes de fer punta al llapis. *Revista Ciències*, 1, abril, 2005. UAB. <https://revistes.uab.cat/ciencies/issue/view/n1>
- [8] J. Corominas, Química en la oficina. *Alambique*, 54, p. 109-114. Octubre, 2007.

HISTORIA
DE LA
QUÍMICA



G. Pinto^{1,2}

M. Martín^{1,3}

¹ Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química Reales Sociedades Españolas de Física y de Química Ciudad Universitaria 28040 (Madrid)

² E.T.S. de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid 28006 (Madrid)

³ Facultad de Educación Universidad Complutense de Madrid 28040 (Madrid)

C-e: gabriel.pinto@upm.es

Recibido: 25/02/2022

Aceptado: 28/03/2022

ORCID: 0000-0002-8961-7255

Centenarios de la Primera Conferencia Solvay de Química y del fallecimiento de Ernest Solvay

Gabriel Pinto Cañón  y Manuela Martín Sánchez

Resumen: En 2022 se celebra el centenario de la primera Conferencia Solvay de Química, que tuvo lugar entre el 21 y el 27 de abril de 1922, en el Instituto Internacional de Química Solvay de Bruselas. Un mes después falleció su impulsor, Ernest Solvay. En este trabajo, se hace eco de las dos efemérides, se resume la biografía de este conocido industrial belga, con especial énfasis en su amplia relación con profesores e instituciones de química, y se refiere a la citada reunión, explicando por qué se celebró más tarde que las primeras de física y lo que supuso.

Palabras clave: Conferencias Solvay, Ernest Solvay, Historia de la Química, Químicos del primer tercio del siglo xx.

Abstracts: 2022 marks the centennial of the first Solvay Chemistry Conference, which took place from 21 to 27 April 1922 at the Solvay International Institute of Chemistry in Brussels. Its founder, Ernest Solvay, died a month later. In this work, which highlights the two anniversaries, the biography of this well-known Belgian industrialist is summarized, with special emphasis on his extensive relationship with chemistry educators and institutions, and refers to the aforementioned conference, explaining why it was held later than the first physics ones and what it represented for the advance of science.

Keywords: Chemists of the first third of the 20th century, *Conseils Solvay*, Ernest Solvay, History of Chemistry.

Introducción

Puede resultar sorprendente que siendo la química aplicada el área que le valió a Ernest Solvay para llegar a ser conocido en todo el mundo y alcanzar una situación económica que le permitió ser un mecenas ejemplar de iniciativas científicas, comenzase a organizar reuniones internacionales sobre física en 1911, una década antes que la análoga de química. Así, no fue hasta 1922 cuando se celebró la primera Conferencia Solvay de Química (*Premier Conseil de Chimie*), aunque al retraso, sin duda, contribuyó el desarrollo de la Primera Guerra Mundial.

Al estudiar su trayectoria queda claro que Solvay estaba convencido que, en ese momento, era la física la rama del saber que encontraría de forma más determinante la solución a los principales problemas científicos. Por ejemplo, le llamaba la atención el “problema” de los isótopos, que desde la química no se sabía muy bien cómo ubicar en la tabla periódica y que fueron los físicos los que lo resolvieron. Además, en la época, se consideraba que las nuevas herramientas de física, como los rayos X, permitirían llegar a un conocimiento más preciso de la estructura de la materia.

En abril de 1922, cuando después de muchos avatares comienza la primera conferencia Solvay relacionada con la química, su salud ya no es buena y, aunque participa en ella, su fallecimiento se produce poco después, el 26 de mayo.

Por estos motivos el año 2022 se conmemoran tanto el centenario de su fallecimiento como el de la citada conferencia. Por ello, decidimos participar de algún modo en la difusión de dicha conmemoración, completando estudios anteriores sobre la génesis, importancia, características e implicaciones en la didáctica e historia de las ciencias de las Conferencias Solvay.^[1-4]

Los objetivos de este trabajo son recoger someramente la fructífera relación de Solvay con profesionales e instituciones relacionadas con el ámbito de la química, especialmente de Bélgica, así como resumir los contenidos de esa primera reunión sobre esta ciencia. En ese *Premier Conseil de Chimie*,^[5] prácticamente todos los ponentes hacen un interesante relato de cómo se ha llegado a los conocimientos científicos del momento, por lo que el análisis de las ponencias puede ser un buena fuente para los historiadores de química.

Ernest Solvay y su relación con profesionales de la química de su época

Ernest Gaston Joseph Solvay fue un destacado empresario y filántropo belga (Rebecq-Rognon, 1838-Ixelles, Bruselas, 1922).^[6,7] Después de adquirir una formación básica no pudo ir a la universidad por una pleuresía de cierta gravedad.

Autodidacta, vive desde niño la realidad industrial, pues la vivienda familiar estaba ubicada en las instalaciones de la refinería de sal propiedad de su padre. Comenzó a trabajar a los 21 años, como director adjunto de una fábrica de gas propiedad de un tío suyo, próxima a Bruselas. En 1861 patentó un nuevo proceso para la obtención del carbonato de sodio (conocido a nivel industrial como sosa), a partir de disolución saturada de sal común, amoníaco y dióxido de carbono, por tratamiento en continuo. Este proceso, desbancaría en unos años al método Leblanc, que había permitido la obtención industrial de sosa (fundamental para la obtención de vidrio, papel, jabón y otros productos) en las décadas anteriores. Los principios del proceso ya eran conocidos, pero nadie lo había llevado a la práctica por las complicaciones que implicaba para realizarlo a gran escala.

El 26 de diciembre de 1863, junto con su hermano Alfred (1840–1894) (ambos, que tenían también tres hermanas, se muestran en la figura 1) fundaron la *Société Solvay et Cie.*, instalando la primera fábrica en Couillet (Bélgica). El nuevo método, perfeccionado a nivel técnico por los dos hermanos, es considerado como uno de los hitos de la conocida como Segunda Revolución Industrial, ciclo de innovaciones industriales que involucró el desarrollo de nuevos inventos y que se sucedió en Europa durante el último tercio del siglo XIX y el principio del siglo XX, hasta el inicio de la Primera Guerra Mundial.[8]

La compañía se expandió con nuevas instalaciones por los principales países industrializados, lo que permitió a Solvay monopolizar la obtención mundial de sosa y, así, obtener una enorme riqueza, que empleó en una gran variedad de actividades filantrópicas. Entre estas, se incluyen la fundación de diversos institutos de investigación (fisiología, sociología, comercio, física y química) y la financiación de las conocidas como Conferencias Solvay (en francés, *Conseils Solvay*) sobre física y química. De hecho, desde la muerte de su hermano, dejó de involucrarse directamente en los asuntos de la empresa para volcarse en actividades de carácter social, filantrópicas y de mecenazgo.

Deelstra y Mahieu pormenorizan la descripción de los contactos frecuentes que mantuvo Solvay con investigadores de química de su época, muy principalmente (pero no de forma exclusiva) en su entorno belga;^[9] algunas de sus aportaciones se resumen en los siguientes párrafos.

Así, Solvay estuvo relacionado con profesores de la Universidad Libre de Bruselas (ULB) que participaron y serían piezas importantes en las reuniones Solvay de química como Henri Bergé (1835–1911), profesor de química aplicada, y Henri Wuyts (1872–1966), profesor especialista en compuestos orgánicos de azufre, que sería presidente de la *Société Chimique de Belgique* y que participó en las citadas reuniones desde sus inicios, durante tres décadas.

Otros profesores de la ULB relevantes en las Conferencias Solvay, pero de física, fueron: Théophile De Donder (1872–1957), conocido por sus trabajos de termodinámica y afinidad química, que fueron la base de las teorías de Ilya Prigogine (premio Nobel de química en 1977); Robert Goldschmidt (1877–1935), pieza clave en la organización de las dos primeras reuniones (de 1911 y 1913) por su

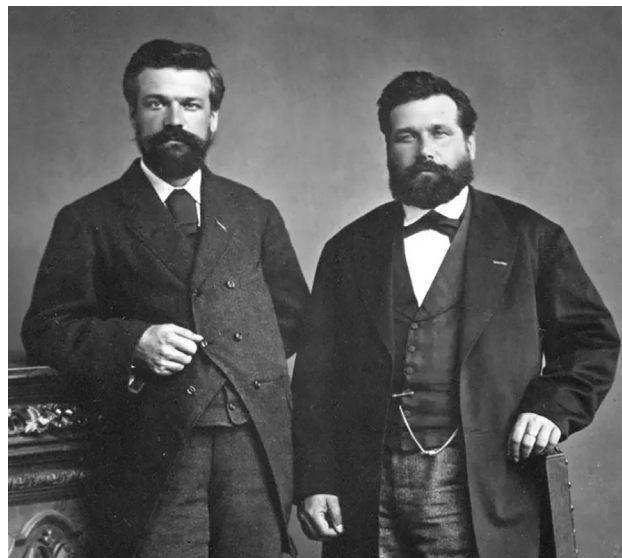


Figura 1. Fotografía de Ernest (izda.) y Alfred Solvay. Fuente: Solvay Heritage Foundation.

amistad con Walter Nernst (1864–1941, premio Nobel de química en 1920) que presentó a Solvay; y Émile Henriot (1885–1961), que fue administrador del Instituto Solvay de Física durante tres décadas y participó en las conferencias desde 1924 a 1951.

De la Universidad de Gante, destaca por su participación en las Conferencias Solvay de Química Frédéric Swarts (1866–1940), profesor de química orgánica especializado en compuestos fluorados.

Como otros químicos relacionados estrechamente con Solvay, más allá de las propias conferencias, también se deberían citar a: Louis Melsens (1814–1886) profesor en la Escuela de Medicina Veterinaria de Cureghem (Bélgica), que aportó mejoras técnicas al procedimiento de obtención de sosa; el alemán August Kekulé (1829–1896), profesor de química en la Universidad de Gante; René Lucion (1854–1925), que montó un laboratorio en las instalaciones de la empresa que, como novedad, permitieron la investigación sobre el proceso además de meros análisis y que, a su vez, había sido recomendado a Solvay por Joseph Chandelon (1814–1885), profesor de química inorgánica en la Universidad de Lieja; Albert Meurice (1869–1939), fundador del Instituto de Química Práctica en Charleroi; y Georges Chavanne (1875–1941) que fue presidente de la *Société Chimique de Belgique* entre 1914 y 1921.

A todos estos profesionales, tendríamos que añadir a químicos e ingenieros que trabajaron en la propia Compañía Solvay. Citamos en primer lugar a Émile Tassel (1852–1922), uno de los más estrechos colaboradores de Solvay, que falleció el mismo año que él y que desde 1906 fue el encargado de todas las actividades de mecenazgo. Se distanció algo de Solvay por una carta en la que le comunicaba que no creía en su teoría “gravito-materialítica”.^[9] También trabajaron en los laboratorios de la empresa René Lucion (1854–1925), Désiré De Paepe (1874–1919) y Octave Dony-Hénault (1875–1952). Édouard Herzen (1877–1936) participó en

cinco reuniones de química y en siete de física. Georges Hostelet (1875–1960), otro colaborador de Solvay, participó en las conferencias de física de 1911 y 1913. Édouard Hanon (1853–1931) director técnico de la compañía desde 1883 y uno de sus directivos, fue director de la planta Solvay de Dombasle (Francia). Charles Lefébure (1862–1943) ocupó el cargo de jefe del laboratorio de las instalaciones de Ixelles y participaría en una decena de Conferencias Solvay.

Solvay, a propuesta del profesor de la ULB Paul Héger (1846–1925), compró la biblioteca, el laboratorio y recuerdos personales de Jean Servais Stas (1813–1891), relevante químico analítico, después de que el estado belga rechazara la oferta de sus herederos y, en 1893 lo depositó en su Instituto de Fisiología.

En el V Congreso Internacional de Química Aplicada, celebrado en Berlín en 1903, Solvay impartió una conferencia plenaria muy multitudinaria sobre la historia de su procedimiento para la obtención de sosa.

A propuesta de su presidente, A. J. J. Vandeveldel (1871–1956), la *Société Chimique de Belgique* nombró en 1905 a tres miembros honorarios: Louis Henry (1843–1913), de la Universidad de Lovaina, Walthère Spring (1849–1911), de la Universidad de Lieja y Ernest Solvay, como “industrial de Bruselas”. Además, en 1912, durante la celebración del 25 aniversario de la citada sociedad científica, Solvay impartió la conferencia «*Contribution à l'étude de la constitution de la matière, de l'éther et de l'énergie*» («Contribución al estudio de la constitución de la materia, del éter y de la energía»).

Esta sociedad belga se adhirió en 1913 a la Asociación Internacional de Sociedades Químicas (IACS, por sus siglas en inglés), fundada dos años antes por tres sociedades químicas de Inglaterra, Francia y Alemania, con los objetivos de unificar nomenclatura, notación y pesos atómicos, así como promover la normalización de artículos científicos para evitar repeticiones. El primer presidente de la IACS fue el alemán Wilhelm Ostwald (1853–1932, premio Nobel de química en 1909). Aunque su tercera reunión se había programado para celebrar en Londres en 1913, se cambió la sede a Bruselas, como parte de la celebración del cincuentenario de la creación de la Sociedad Solvay y se le hizo entrega a Solvay de la prestigiosa medalla “Jean Servais Stas”. En la citada reunión participaron los españoles José Casares, José Rodríguez Mourelo y Enrique Hauser, en representación de la Sociedad Española de Física y Química (aún faltaban 15 años para que se le añadiera la distinción de “Real”), como se señaló en un trabajo anterior.^[10] Aunque no se trató de un *Conseil Solvay*, la fotografía de los participantes y el contexto son análogos. Solvay no solo donó una importante suma de dinero para la organización de la reunión, sino que también lo hizo para la propia IACS, con el compromiso de que se celebrarían sus reuniones de forma bienal en Bruselas.

Pero la Primera Guerra Mundial truncó los planes e incluso la IACS se disolvió en 1919, reorganizándose en ese momento como la aún vigente en la actualidad *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC). Este cambio implicó la devolución a Solvay de parte del dinero que había donado y, con él, ayudó a la supervivencia de la *Société Chimique de Belgique*, que estaba en bancarota.

Preparación de las Conferencias Solvay de Química

Cuando estaban preparando la Primera Reunión Solvay de Física, en mayo de 1911, Ostwald propuso a Solvay la creación de una institución internacional de química que reuniera la bibliografía en una biblioteca de referencia mundial, pero no tuvo aceptación. Parece que había cierto enfrentamiento entre las ideas de lo que proponían William Ramsay (1852–1916, premio Nobel de química de 1904) y Ostwald, y Solvay no quiso terciar en la disputa. Además, como ya hemos indicado, Solvay tenía claro que, para él, era la física la ciencia que aportaría la solución más concluyente a los problemas científicos del futuro.

Como también se ha explicado, Solvay, a través de Goldschmidt conoció a Nernst quien, junto con Herzen, Max Planck (1858–1947, premio Nobel de física en 1918) y Hendrik Antoon Lorentz (1855–1928, premio Nobel de física en 1902), organizaron el primer *Conseil Solvay* de Física en 1911, bajo el nombre de «*La théorie du rayonnement et les quanta*» («Teoría de la radiación y los cuantos»).[1] Tras su éxito, al año siguiente se fundó el Instituto Internacional de Física Solvay y, al siguiente, a petición del francés Albin Haller (1849–1925), otro instituto análogo de Química. El objetivo de ambas instituciones fue promover la investigación en estas ramas del saber, a nivel internacional.^[2, 3]

En 1913 se celebró el segundo *Conseil* de Física.^[4] Solvay pensaba que la energía era la base de la filosofía y que la física tendría la solución de los aspectos más relevantes. Así, escribió a Lorentz refiriéndose a esta ciencia:

«antes de treinta años habrá dicho su última palabra y la civilización habrá progresado».

La Primera Guerra Mundial trastocó todos los planes y fue en 1919 cuando la recién creada IUPAC, después de organizar una comisión para el estudio de los pesos atómicos, preparó un congreso que se celebró en Bruselas (inicialmente se había pensado en Varsovia) del 25 al 30 de junio de 1921. Allí, Philippe Auguste Guye (1862–1922), científico francés que trabajaba en Suiza, propuso a Solvay celebrar el siguiente año un *Conseil* sobre el mismo tema, destacando la importancia de los isótopos, en el Instituto Internacional de Química. El inglés William Pope (1870–1939) sugirió que las discusiones se centraran en otros temas. Al final se celebró el primer *Conseil de Chimie Solvay* del 21 al 27 de abril de 1922 en el Instituto de Fisiología de Bruselas (la recepción se llevó a cabo en la ULB), con el título de «*Cinq Questions d'Actualité*» («Cinco Cuestiones de Actualidad»).[8, 11]

Primer *Conseil Solvay* de Química

En la fotografía de la reunión, tomada como en otras reuniones Solvay por el fotógrafo Benjamin Couprie aparecen 28 participantes (ver figura 2) y, entre ellos, el propio Ernest Solvay, en primera fila, entre Pope y Haller.^[12] Los informes del evento se publicaron en 1925, por la editorial *Gauthier-Villars et Cie* en París (ver la portada en la figura 3).^[5, 13]

Sobre los temas, fue complicado ponerse de acuerdo y se discutió largamente. Los químicos sobre todo Ostwald, Ramsay y Philippe Auguste Guye pensaban que las reuniones de física habían tenido una orientación también hacia temas de química, debido a van't Hoff. Al final los temas elegidos fueron: Isotopía y radioactividad, estructura molecular y rayos X, estructura molecular y actividad óptica, la valencia, y la movilidad química. En la apertura de la reunión Sir William Pope advierte que habrá unas ponencias, seguidas de los correspondientes informes (*rapport*) y discusiones. Fueron las siguientes:

1) Isótopos. Introducción general a la discusión sobre la estructura atómica, por Frederick Soddy. Destacó que: *“La existencia de isótopos demuestra que el carácter químico no depende directamente del núcleo, sino sólo del sistema electrónico externo. Este último, a su vez, sólo depende de la carga total y no de la*

constitución interna del núcleo.” En la discusión, M. Urbain indica: *“Hay dos categorías de científicos en esta reunión, los físicos y los químicos. La cuestión debe orientarse de manera que pueda producirse una estrecha colaboración entre ellos.”*

2) Determinación de pesos atómicos por el método de los rayos positivos, por F. W. Aston. Jaeger indica en la discusión: *“Desde un punto de vista práctico, creo que la propuesta del Dr. Aston de mantener la palabra elemento para las mezclas de isótopos no radiactivos es perfectamente acertada. Si se quiere mantener la designación clásica de los elementos como sustancias que se comportan como sustancias homogéneas y no son separables por medios puramente químicos, sólo queda considerar todos los isótopos de un elemento juntos como un solo elemento que, en realidad, es una mezcla de constituyentes de masa variable. Sin embargo, desde el*



Figura 2. Fotografía de participantes en la Primera Conferencia de Química Solvay, por Benjamin Couprie (dominio público). Sentados, de izda. a der.: Charles Moureu, Francis William Aston, Sir William Henry Bragg, Henry Edward Armstrong, Sir William Jackson Pope, Ernest Solvay, Albin Haller, Svante Arrhenius, Frederick Soddy. Detrás, de izda. a der.: Marcel Delépine, Einar Biilmann, Georges Chavanne, Henri Wuyts, Octave Dony-Hénault, Thomas Martin Lowry, Frédéric Swarts, Georges Urbain, Charles-Victor Mauguin, Jean Perrin (agachado), Édouard Herzen, L. Flamache, Maurits Jaeger, Edouard Hannon, André Louis Debierne, Auguste Piccard, Hans Rupe, Alfred Berthoud, y Robert Howson Pickard.

Fuente: *The Solvay Science Project*.^[12]

punto de vista más general de la filosofía natural, esta noción (la de elemento) no puede considerarse perfecta, y no veo otro camino que reservar la palabra «elemento» para los protones y los electrones, y considerar entonces todos los demás como combinaciones.”

- 3) Acerca de la separación de isótopos, por J. Perrin y G. Urbain.
- 4) Análisis por medio de los rayos X y estructura molecular, por W. H. Bragg.
- 5) La configuración molecular y la actividad óptica, por W. Pope.
- 6) La relación entre el poder rotatorio y la longitud de onda, por T. M. Lowry.
- 7) Teoría electrónica de la valencia, por Ch. Mauguin.
- 8) La movilidad química por A. Job pero que, al ausentarse por enfermedad, presentó Perrin.

La publicación del primer *Conseil de Chimie* ocupa 336 páginas y, en la parte inicial, se recoge información sobre el *Institut International de Chimie*. Se señala que en el año de su celebración fallecieron Solvay, el fundador, y Tassel, su principal organizador. Se recogen también los estatutos del Instituto, indicando que se fundó el 1 de mayo de 1912 por un periodo de 30 años, pero que la esposa de Solvay, Pauline Josephine Adèle Winderickx (1845–1928) y sus cuatro hijos decidieron donar suficiente dinero como para asegurar su existencia hasta 1949, a través de la gestión de la Universidad de Bruselas. Los fines serían promover investigaciones y el progreso de la química, para lo que se habilitaría una zona del Instituto de Fisiología y se creaba una comisión administrativa de cinco miembros: dos de la familia Solvay o designados por ella, uno designado por el rey de los belgas y dos por la Universidad de Bruselas. El comité científico lo formarán 9 miembros que elegirán un presidente y se renovarán dos miembros cada 3 años.

Desde la época de Lavoisier, los químicos se fueron distanciando de cuestiones de filosofía natural y durante el siglo XIX se habían preocupado por análisis (composición), aislamiento y descripción de elementos y sus propiedades. Con el nuevo siglo, y el *Conseil de Chimie* es prueba de ello, la dinámica molecular y la termodinámica pasaron a figurar en el centro de la disciplina, predominando las discusiones fisicoquímicas. Además, desde la teoría atómica de Dalton de principios del siglo XIX, parecía que cada peso atómico era constante de la naturaleza, cuando a inicios del siglo XX se apreció que dependía de los isótopos. Las conferencias Solvay pusieron en evidencia la necesidad de aplicar la teoría física a problemas químicos y de desarrollar una química teórica complementaria a la física teórica.

Estos Consejos de química se han seguido organizando cada tres años aproximadamente hasta el día de hoy (excepto durante la Segunda Guerra Mundial de 1937 a 1947).^[3] El último Congreso, número 25, se celebró en 2019 bajo el título de «*Computational Modeling: from Chemistry to Materials to Biology*».

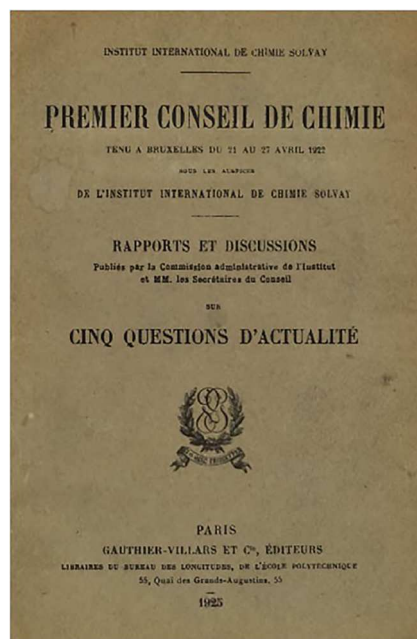


Figura 3. Portada de la publicación con las presentaciones y discusiones del *Premier Conseil de Chimie*.^[13]

Personajes ejemplares en los *Conseils Solvay*

Más allá de la importancia de las conferencias Solvay (tanto de física como de química) en el desarrollo de ámbitos clave en la historia de la ciencia, se puede afirmar que sirvieron para estrechar lazos personales entre los intervinientes que, en muchos casos, repetían la estancia en Bruselas cada tres años. Así, se profundizó la amistad entre Marie Curie y Albert Einstein, y de este con Bohr. También hubo sagas familiares que participaron y coincidieron en algún caso, como los hermanos de Broglie (Maurice y Louis-Victor), William Henry Bragg y su hijo William Lawrence Bragg, o la propia Marie Curie, que coincidió con su hija Irène y el esposo de esta, Jean Frédéric Joliot.

Un análisis de las biografías de los participantes puede ser un recurso educativo para el alumnado de las diversas etapas educativas y la divulgación científica. Así, por poner un ejemplo, tanto en la conferencia objeto de este trabajo, como en otras posteriores, destaca por su altura, en la fotografía de la figura 2, la imagen de Auguste Antoine Piccard, un científico peculiar. Nacido en Basilea (Suiza) en 1884, tuvo un hermano gemelo, Jean Felix Piccard (químico de formación, aeronauta e inventor de globos para vuelos de gran altitud, que desarrolló su actividad docente e investigadora en la Universidad de Chicago). Auguste estudió física en el ETH de Zúrich y en el mismo año 1922 se incorporó como profesor de física en la ULB, donde investigó sobre vuelos estratosféricos en globo y rayos cósmicos. Fue popular por sus ascensiones en globo, incluso con su mujer (ver figura 4). También inventó varios batiscafos para el estudio de las profundidades marinas (su hijo Jacques Piccard también destacó en este campo). Fallecido en Lausana (Suiza) en 1962, ha sido mencionado como la figura que inspiró al belga Georges Prosper Remi (Hergé) (1907–1983)

para crear el personaje, excéntrico y despistado, del profesor Silvestre Tornasol en las 'Aventuras de Tintín'.^[3]

El trato personal con grandes científicos de su época y con los propios empleados de su empresa fue esencial en la vida de Solvay, un ejemplo de emprendedor y de empresario, paradigma de bonhomía, que dedicó buena parte de sus ganancias a fomentar el desarrollo de la ciencia. Entre otros ejemplos, donó una importante cantidad de dinero para la alimentación del pueblo belga tras la guerra, por lo que el rey Alberto le otorgó el cargo honorífico de ministro de estado. Estaba convencido de que, con ello, se solucionarían los grandes problemas de la humanidad y se fomentaría una sociedad mejor. En la figura 5 se recoge una de sus últimas fotografías, ya octogenario, escalando un pico de los Alpes.

Conclusiones

Ernest Solvay alcanzó un elevado estatus social gracias a la aplicación práctica de la química y se relacionó estrechamente con químicos de su época, pero tenía muy claro que en aquel momento era la física la que disponía de las



Figura 5. Ernest Solvay en una de sus últimas ascensos alpinos, a los que era muy aficionado, con más de 80 años. Fuente: *Solvay Heritage Collection*.



Figura 4. Auguste Piccard con su esposa e hijas. *Creative Commons: Bundesarchiv, Bild 102-11755 / CC-BY-SA 3.0.*

herramientas adecuadas para encontrar explicación a los fenómenos que se iban descubriendo y por eso, como mecenas, empezó promoviendo los encuentros de física para que tuvieran oportunidad de relacionarse los físicos y buscar soluciones, aunque muchos de los temas pertenecían a ambas materias y de hecho a esas reuniones más de una vez asistieron científicos del área de la química.

Al retraso de la primera reunión Solvay de química contribuyó también la Primera Guerra Mundial y las disputas entre químicos conocidos de la época que no llegaban a ponerse de acuerdo sobre cuáles eran los temas a resolver para avanzar la ciencia.

Llama la atención cómo Solvay busca la asistencia a esas reuniones de los premios Nobel porque piensa que serán los que más pueden decir y, en general, cómo busca la excelencia.

Merece la pena la lectura de las conferencias de la reunión sobre *Cinco Cuestiones de Actualidad* porque las intervenciones son una buena fuente para los historiadores de la química de cómo se llegó a diferentes conceptos. A lo largo del texto se han citado numerosos científicos que participaron con sus trabajos en el avance de las distintas teorías y que no suelen recogerse en los estudios históricos, más limitados a científicos de renombre y que soslayan la importancia de trabajos anteriores menos conocidos.

Para mayor conocimiento y documentación de todo lo tratado, se recomienda la dirección web del denominado *The Solvay Science Project*, que incluye un buen número de documentos (cartas, fotografías, textos, etc.).^[13]

Sirva este trabajo como modesto homenaje a su persona y para promover un mayor conocimiento de la trayectoria de Ernest Solvay, en el centenario de su fallecimiento.

Agradecimientos

Se agradecen las ayudas recibidas por: Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (Proyecto de innovación educativa IE22.0506), Obra Social «la Caixa» (proyecto divulgativo «Ciencia y Tecnología al alcance de tod@s»), y Comunidad de Madrid, a través del Convenio Plurianual con la UPM, en su línea de actuación Programa de Excelencia para el Profesorado Universitario, en el marco del V PRICIT (V Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica).

Bibliografía

- [1] G. Pinto, M. T. Martín Sánchez, M. Martín Sánchez, «La Conferencia Solvay de 1911: Un Hito en el Desarrollo de la Física Cuántica», *An. Quím.*, 107, 266-273 (2011).
- [2] G. Pinto, M. Martín, M. T. Martín, «Las Conferencias Solvay de Física y de Química: Oportunidades para Enfoques Didácticos». Parte I. *Revista Con Ciencias*, 16, 46-63 (2015).
- [3] G. Pinto, M. Martín, M. T. Martín, «Las Conferencias Solvay de Física y de Química: Oportunidades para Enfoques Didácticos». Parte II. *Revista Con Ciencias*, 17, 4-21 (2016).
- [4] G. Pinto, M. Martín, M. T. Martín. «La Conferencia Solvay de 1913: Un Avance en el Conocimiento sobre la Estructura de la Materia». *Rev. Esp. Fís.*, 30(2), 42-46 (2016).
- [5] Commission administrative de l'Institut et MM. les Secretaires du Conseil, «Premier Conseil de Chimie tenu à Bruxelles du 21 au 27 Avril sous les Auspices de l'Institut de Chimie Solvay. Cinq Questions de Chimie», Gauthier et Villars, Paris 1925.
- [6] E. Gaston, «Joseph Solvay, a Prestigious Example of a Scientific Entrepreneur or *Labor Omnia Vincit Improbis*», *J. Compt. Rend. Chim.*, 2016.
- [7] M. Ruiza, T. Fernández, E. Tamaro, «Biografía de Ernest Solvay». En *Biografías y Vidas*. La enciclopedia biográfica en línea, Barcelona, 2004. Accesible en: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/s/solvay.htm> (visitada el 02/02/2022).
- [8] H. Deelstra, B. Mahieu, «Ernest Solvay, les Sociétés Chimiques et les Chimistes de Belgique à son Époque (1863-1922)», *Chimie Nouvelle*, 115 (Avril), 21-28 (2014).
- [9] E. Solvay, «Sur l'Établissement des principes Fondamentaux de la Gravito-Matérielle», Bothy, 1911.
- [10] G. Pinto, J. M. Hernández, M. Martín, M. T. Martín, «La reunión de la Asociación Internacional de Sociedades Científicas celebrada en Bruselas en 1913», *An. Quím.*, 110, 39-48 (2014).
- [11] B. Van Tiggelen, «Les Premiers Conseils de Chimie Solvay (1922-1928). Entre Ingérence et Collaboration: Les Nouvelles Relations de la Physique et de la Chimie», *Chimie Nouvelle*, 17, 3015-3018 (1999).
- [12] *The Solvay Science Project*. Instituts Internationaux de Physique et de Chimie Solvay et Benjamin Couprie, «Premier Conseil de chimie Solvay, photographie de groupe». Accesible en: <http://www.thesolvayscienceproject.be/items/show/1013>. (visitada el 02/02/2022).
- [13] *The Solvay Science Project*. Accesible en <http://www.thesolvayscienceproject.be> (visitada el 02/02/2022).

¿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 10 EUR



 Real Sociedad Española de Química

www.rseq.org

Crónicas del Antropoceno: el siglo del tetraetilo de plomo

Gabriela A. Vázquez Rodríguez



G. A. Vázquez Rodríguez

Área Académica de Química
Universidad Autónoma del Estado
de Hidalgo
Ciudad del Conocimiento, 42184,
Mineral de la Reforma, Hidalgo
(México)
E-mail: gvazquez@uaeh.edu.mx
Recibido: 30/06/2021
Aceptado: 21/03/2022

Resumen: Este artículo explora brevemente la historia del tetraetilo de plomo (TEP), desde su descubrimiento en 1921 como agente antidetonante en gasolina hasta su prohibición mundial. Se revisa cómo, gracias al cabildeo industrial, la publicidad y a la falta de investigación científica independiente, este compuesto pudo llegar a tener un uso tan extendido, a pesar de su extrema toxicidad. Se repasan también las alternativas al TEP que existían, y que fueron conocidas por las personas que impulsaron su uso. Finalmente, se presenta el papel de Clair Patterson en señalar los riesgos derivados de la contaminación global por plomo.

Palabras clave: Metal pesado, motor de combustión interna, Thomas Midgley, gasolina, contaminación global.

Abstracts: This article briefly explores the history of tetraethyllead, from its discovery as a gasoline antiknock agent in 1921 until its total world ban. It is examined how, thanks to industrial lobbying, advertising, and lacking independent scientific research, this compound could be so extensively used, despite its extreme toxicity. Also, the alternatives to tetraethyllead available at that time are reviewed, which were well known to the people that promoted its use. Finally, the role of Clair Patterson in drawing attention to the risks of global lead contamination is featured.

Keywords: Heavy metal, internal combustion engine, Thomas Midgley, gasoline, global pollution.

Introducción

El Antropoceno se ha definido como la era geológica presente, en la que el ser humano representa una fuerza de transformación con alcance planetario, y que en el futuro podría rastrearse en el registro geológico.^[1] Se trata sin duda de una idea poderosa, que invita a una transformación radical en la relación que la humanidad ha establecido con el medio ambiente.^[2] Sin embargo, entre otras críticas, se le ha reprochado que sea una generalización inexacta, que no cuestiona el papel diferenciado que han jugado ciertos países y sus élites en el cambio global.^[3] Así, no es posible aseverar que la especie humana es la causa de la crisis climática cuando el 10% más rico de la población mundial generó el 52% de las emisiones de carbono acumuladas en el periodo 1990-2015.^[4] Esta extrema desigualdad tiene su epítome en el caso del tetraetilo de plomo (TEP; Figura 1), en el que unas cuantas personas tuvieron un papel decisivo en crear un problema de contaminación global.

En 2021 se cumplieron 100 años del descubrimiento del TEP como agente antidetonante en los motores de combustión interna. A partir de este descubrimiento y durante más de nueve décadas, millones de automovilistas de todo el mundo llenaron sus tanques con gasolina a la que se le había añadido TEP, y dispersaron a la atmósfera enormes cantidades de un metal pesado cuya toxicidad era conocida desde la antigüedad. El artífice de la gasolina con plomo, Thomas Mid-

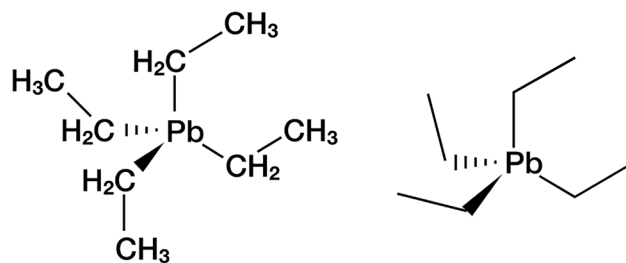


Figura 1. Estructura química del tetraetilo de plomo. Imagen de dominio público, tomada de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1065208>

gley, también lo fue del empleo de los clorofluorocarbonos en refrigeración que, como se sabría décadas más tarde, son los principales causantes de la destrucción de la capa de ozono estratosférico. Con justificada razón el historiador ambiental John McNeill ha dicho que, en toda la historia de la Tierra, Midgley es el organismo individual que más ha perjudicado a la atmósfera,^[5] aunque hay quien ha señalado que su influencia negativa se extiende a todo el medio ambiente.^[6]

En este artículo se hace un recuento histórico de las causas por las que la adición de plomo a la gasolina fue tan común, y algunas de las consecuencias de lo anterior. Se dedica también un espacio a las prácticas de cabildeo de las empresas implicadas, y a los científicos que encumbraron y combatieron al primer contaminante global conocido.

De automóviles y golpeteo

A finales del siglo XIX, las sociedades occidentales abrazaron con entusiasmo las tecnologías que representaran modernidad, tales como el ferrocarril. Luego, con el desarrollo del motor de combustión interna, fue el turno de los automóviles impulsados con gasolina. Las innovaciones introducidas por Henry Ford, entre las que destaca la línea de montaje, se materializaron en el Modelo T, lanzado al mercado en 1908 y del cual se venderían más de 16 millones de unidades.^[7] La movilidad garantizada por el automóvil lo convirtió en la máquina de la libertad por excelencia que, además, prometía estar al alcance de todos los norteamericanos.

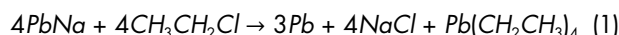
General Motors (GM) pretendía superar las altas ventas del Modelo T con su producto estrella, el Cadillac, para lo cual contrató a Charles Kettering. A través de su compañía, Delco (Dayton Engineering Laboratories), Kettering desarrolló el arranque eléctrico, que vendió a GM en 1911.^[8] Otra de las estrategias de GM se basó en fomentar las ventas gracias a cambios mínimos en la apariencia de las unidades, más que a innovaciones tecnológicas sustanciales. El cambio de modelo anual, que persiste hasta nuestros días, comenzó en 1927 y es un antecedente directo de la funesta práctica industrial conocida como obsolescencia programada.^[7]

Tras la invención del arranque eléctrico, Kettering se propuso mejorar la eficiencia del motor mediante un incremento en la compresión del combustible. Esto originaba una mayor potencia, pero también un golpeteo (*knocking*, en inglés) que, además de sacudir bruscamente al vehículo, disminuía la eficiencia del combustible, dañaba al motor y lo sobrecalentaba. Para resolver este problema, Kettering llamó a Thomas Midgley en 1916; este era un ingeniero mecánico egresado de la Universidad de Cornell, quien había sido recién contratado como químico en jefe de Dayton Research Laboratories Company, otra de las compañías que Kettering había fundado y que trabajaban para GM.^[8] Proveniente de una familia de inventores de Columbus, Ohio, Midgley era conocido por su obstinación al momento de resolver problemas, y se dio a la tarea de encontrar un compuesto que al añadirse a la gasolina redujera el golpeteo.

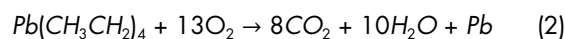
Después de varios experimentos de prueba y error, que Midgley calificaría más tarde como “un enfoque edisoniano”,^[9] llegó a la anilina en 1919 y descubrió su poder anti-detonante. Sin embargo, tuvieron que continuar la búsqueda porque este compuesto generaba olores desagradables y es corrosivo para metales.^[10] Por el consejo de un químico del Instituto de Tecnología de Massachussets, Midgley comenzó a considerar la periodicidad de las propiedades de los elementos. Tomando como base la anilina, Midgley y su equipo se enfocaron en probar compuestos que tuvieran elementos de los grupos 14 (del carbono) hasta el 17 (del flúor). Finalmente, encontraron los mejores resultados con los compuestos que tuvieran un elemento con alto número atómico (como el plomo, que es el elemento natural con mayor peso atómico del grupo 14, después del flerovio) unido al menos a un grupo etilo,^[10] y en diciembre de 1921 llegaron al TEP. Se dice que en total pudieron haber probado hasta 33,000 compuestos distintos, aunque este número varía según la fuente

consultada.^[11] Los resultados de la experimentación con el TEP se publicaron al año siguiente,^[12] e hicieron que Midgley recibiera la medalla William H. Nichols, otorgada por la sección de Nueva York de la American Chemical Society.

A diferencia de lo que sucede con el arsénico y el mercurio, los compuestos alquílicos del plomo no se forman naturalmente.^[13] El TEP había sido sintetizado por primera vez en forma impura por Carl Löwig, en 1853, al hacer reaccionar una aleación de plomo y sodio con yoduro de etilo.^[10] George Buckton lo aisló y lo caracterizó en 1859,^[10] y luego no despertó ningún interés sino hasta que, entre 1915 y 1925, se emprendieran estudios más detallados en laboratorios alemanes.^[14] Tras el éxito de los experimentos de Midgley, el TEP empezó a sintetizarse a partir de yodoetano y posteriormente de bromoetano; sin embargo, ambos compuestos debieron sustituirse por su alto costo. La asociación con GM impulsó a la compañía Standard Oil a financiar el desarrollo de un nuevo proceso a base de cloroetano, que fue ideado por Charles August Kraus y Conrad Callis y patentado en 1923. El proceso Kraus-Callis emplea una aleación PbNa en relación 1:1, y recupera el TEP (Reacción 1) por destilación con arrastre de vapor.^[15]



Los cuatro enlaces carbono-plomo del TEP (Figura 1) se rompen fácilmente a los 2800 K que se alcanzan en un motor de combustión interna,^[16] en donde se transforman en plomo, óxidos de plomo y radicales hidroperóxido de alquilo, estos últimos de vida corta. Las siguientes reacciones representan la combustión completa del TEP:



El golpeteo del motor se reduce a través de la inactivación de los intermediarios de la oxidación de los hidrocarburos de la gasolina (los radicales hidroperóxido de alquilo) que realizan el plomo (Reacción 2) y el óxido de plomo (Reacción 3) formados.^[15] Algún tiempo después, se observó que la acumulación de óxido de plomo en las válvulas de escape, las bujías y en la cámara de combustión causaba daños severos al motor, lo cual se resolvería en 1928. Ese año, además de TEP, empezó a añadirse 1,2-dicloroetano y 1,2-dibromoetano a la gasolina, los que al combinarse con el óxido de plomo y producir PbCl_2 y PbBr_2 , respectivamente, funcionaban como “neutralizadores” (*scavengers*, en inglés) del óxido.¹ Ambos halogenuros de plomo son volátiles y eran expeditos fácilmente desde el motor hacia la atmósfera.^[14,17]

Kettering le dio a la gasolina adicionada con TEP el nombre de *Ethyl* (que en lo sucesivo aparecerá en cursivas para designar al producto), que omitía mencionar al plomo porque “este término podía perjudicar su uso”.^[11] La venta de *Ethyl* arrancó en febrero de 1923, durante las 500 Millas

¹ La adición de 1,2-dicloroetano y 1,2-dibromoetano fue una idea propuesta por Earl Bartholomew a partir de un hallazgo inicial de Thomas Boyd, colaborador de Midgley.^[17]



Figura 2. “Este vehículo necesita Ethyl”. Cartel publicitario de Ethyl. Crédito: Saturday Evening Post, en G. Markowitz, D. Rosner, D. Deceit and denial. *The Deadly Politics of Industrial Pollution*. University of California Press, Berkeley, 2002, p. 31.

de Indianápolis. En lo que sería una estrategia de mercadeo inigualable, los ganadores de los primeros tres lugares de la carrera habían llenado los tanques de sus vehículos con Ethyl.^[18] La potencia impartida por Ethyl a los vehículos se convirtió en uno de los principales argumentos de venta que luego se usaron en los E.U.A. (Figura 2). Otro argumento aparecería al descubrirse que el TEP funcionaba como lubricante del asiento de la válvula de escape; sin el TEP, esta válvula sufría un desgaste abrasivo que causaba daños importantes en el motor.^[14]

Standard Oil, que poseía la patente de manufactura del TEP, y GM, que contaba con la patente de su aplicación como antidetonante, cofundaron en 1924 la Ethyl Gasoline Co. (en adelante, Ethyl, para designar a la compañía).^[18] Esta contrató a DuPont para que produjera el TEP en una unidad construida exprofeso en su planta de Deep Water, en Nueva Jersey. Standard Oil también producía TEP, aunque en menor cantidad, en una fábrica ubicada en Bayway, también en Nueva Jersey. Ethyl mezclaba el TEP con la gasolina en sus instalaciones de Dayton, Ohio.^[18]

Un “veneno rastrero y malicioso”

Desde la Grecia clásica y hasta la Revolución Industrial, las emisiones de plomo se debieron principalmente a la extracción de plata, cuya intensidad, a su vez, se correlaciona con periodos de auge económico, guerras, hambrunas y plagas.^[19] Existen papiros egipcios que relatan el envenenamiento con plomo con propósitos homicidas, así como descripciones de Hipócrates^[20] y de Nicandro^[21] (que datan ambas de antes de nuestra era) de dolencias atribuibles al plomo, en las que sin embargo no se reconocía su agente etiológico.^[6] Fue Dioscorides, en el primer siglo de la era presente, quien primero relacionó la exposición al plomo con sus efectos tóxicos.^[6,22] En el siglo XVI, después de varios siglos ausente de la literatura médica, el envenenamiento por plomo, también conocido como saturnismo, reapareció en la descripción de “la enfermedad del minero” realizada por Paracelso.^[6]

El plomo es un metal pesado que no se elimina del organismo con facilidad, por lo que es bioacumulativo. Se recomienda que sus niveles en sangre no superen los 10 µg/dL, aunque los valores menores a este umbral no están exentos de efectos tóxicos.^[23] En términos bioquímicos, el plomo presenta una alta afinidad por el grupo sulfhidrilo, y sustituye a cationes polivalentes como el calcio, el zinc y el magnesio, entre otros, en el metabolismo celular. Debido a lo anterior altera los canales iónicos de la membrana, y modifica la permeabilidad y la funcionalidad celulares. Afecta a proteínas como la calmodulina, que regula al calcio intracelular, así como a las enzimas involucradas en la síntesis del grupo hemo, lo que suele manifestarse como anemia; asimismo, altera la regulación inmunológica.^[24]

El plomo también es neurotóxico puesto que daña a los sistemas nerviosos central y periférico, tanto en etapas de desarrollo como en estado adulto. Las lesiones son promovidas por un incremento en la peroxidación de lípidos y una disminución de la actividad de enzimas antioxidantes.^[25] Los órganos hematopoyéticos (como la médula ósea), tracto gastrointestinal, riñones, hígado, pulmones, sistema óseo, bazo y prácticamente todos los órganos o tejidos pueden verse afectados por el plomo;^[25,26] de hecho, en cantidades lo suficientemente altas, es probable que afecte a todas las funciones biológicas.^[6]

Hoy sabemos que la exposición continua a bajas concentraciones de plomo se asocia con un incremento en el riesgo de tener diabetes tipo 2, hipertensión arterial, enfermedad renal crónica, daño cognitivo y retraso en el crecimiento infantil;^[22] a estos efectos se les llama subclínicos.^[27] Se ha señalado también una conexión entre los niveles de exposición crónica al plomo y la ocurrencia de delitos violentos,^[15] y que es posible que estos efectos neurológicos y conductuales sean irreversibles.^[28]

Los efectos subclínicos de la exposición al plomo eran desconocidos en las primeras décadas del siglo XX.^[27] No obstante, varios miembros del mundo académico de la época se opusieron al uso del TEP casi inmediatamente después del anuncio de su descubrimiento como agente antidetonante. Charles Kraus, de la Universidad de Potsdam, advirtió directamente a Midgley y a Kettering de las consecuencias

de usar este compuesto, al que llamaba “veneno rastrero y malicioso” por haber causado la muerte de un miembro de su comité doctoral.^[29] En octubre de 1922 William Mansfield Clark, bioquímico de la Universidad Johns Hopkins, escribió al Servicio de Salud Pública que “en las vías transitadas es muy probable que el óxido de plomo en polvo permanezca en la capa más baja de la atmósfera, y constituya una amenaza seria para la salud pública”.^[14] Esta preocupación era compartida por el Director General de Salud Pública de los E.U.A., quien solicitó pruebas de su inocuidad a GM. La compañía contrató a una dependencia oficial, la Oficina de Minas, que en ese entonces era la principal agencia de investigación de temas relacionados con los recursos mineros, para que hiciera estudios con animales en el otoño de 1923. En el contrato se estipulaba como prerrogativa de la empresa la aprobación de todo comentario o crítica que resultara de tales estudios antes de que se publicaran.^[14]

Siete trabajadores murieron entre los meses de septiembre de 1923 y 1924 en las fábricas de Dayton y de Nueva Jersey. Como más tarde reconocería DuPont, el proceso de manufactura del TEP era muy inseguro: los reactores funcionaban por lotes y al término de cada uno los operadores estaban expuestos a vapor altamente concentrado de plomo.^[29] El problema saltó a la opinión pública cuando, el 27 de octubre de 1924, en la planta de Standard Oil en Bayway, varios trabajadores fueran presa de espasmos musculares incontrolables, alucinaciones y delirios paranoicos tan violentos, que tuvieron que ser sometidos con camisas de fuerza. Cuando el primero de ellos murió en el hospital, el fiscal del distrito empezó una investigación. Al ser interrogado por la causa del accidente, el responsable de la planta negó que se debiera al TEP, y sugirió que “esos hombres probablemente perdieron la razón porque trabajaban demasiado”.^[18] Luego de terribles agonías, cinco trabajadores murieron en ese mes de octubre, tras lo cual la unidad en la que trabajaban comenzó a ser conocida como “el edificio del gas de chiflados” (*looney gas building*, en inglés). De igual manera, al lugar en donde se fabricaba el TEP en la planta de Deep Water de DuPont se le bautizó como “la casa de las mariposas”, por los manotazos que frecuentemente daban los trabajadores a los insectos voladores fruto de las alucinaciones causadas por el plomo.^[18,29] Según el *New York Times*, 300 trabajadores se habían vuelto psicóticos en “la casa de las mariposas”.^[18]

Estos hechos no debieron sorprender a Midgley, quien había sufrido dos explosiones en su laboratorio y un primer envenenamiento por plomo en el invierno de 1922.^[11] Sin embargo, el 30 de octubre de 1924, en una conferencia de prensa organizada por él mismo para convencer de la inocuidad de su creación, Midgley se untó TEP en las manos, se colocó una botella con el producto bajo la nariz, e inhaló sus vapores por un minuto. Terminó diciendo que “podría hacer esto cada día sin tener ningún problema de salud”, e insistió en que las intoxicaciones se debían a que los trabajadores no habían seguido correctamente las instrucciones de manejo del TEP.^[11] Al día siguiente, la Oficina de Minas publicó los resultados de su estudio, el cual concluía que, sobre la base de las pruebas con animales en jaulas abiertas, el peligro de que la población respirara plomo liberado por los escapes

de los automóviles era insignificante.^[11] Muy poco tiempo después de la conferencia de prensa, Midgley fue diagnosticado nuevamente con envenenamiento por plomo, del que le tomaría más de un año recuperarse.^[30] Ethyl reconocería 15 muertes debidas al TEP, lo que provocó que la planta de Bayway fuera clausurada a principios de noviembre de 1924, y que la venta de TEP se prohibiera en Nueva York, Nueva Jersey y Filadelfia.

Las alternativas al TEP

Antes y después del descubrimiento del TEP como antidetonante, el equipo de Midgley experimentó con el etanol, que producía el mismo efecto al mezclarse con la gasolina.^[31] No obstante, a diferencia del TEP, que bastaba agregar en una baja proporción (de dos a cuatro gramos por galón de gasolina) para evitar la detonación, el etanol y otros compuestos tales como el benceno debían representar entre 10% y 50% en volumen.

Las bondades del etanol como combustible eran conocidas por los fabricantes de automóviles desde antes de la Primera Guerra Mundial. Por ejemplo, el Modelo T de Ford, que poseía un motor de baja compresión, podía ajustarse para consumir gasolina, etanol o queroseno.^[31] Asimismo, en numerosos artículos de la prensa científica popular de la época se encuentran alabanzas al empleo de etanol como aditivo. Por ejemplo, en un artículo de *Scientific American* de 1918, se asentaba que:

Se ha establecido de modo definitivo que el alcohol [etílico] se mezcla con gasolina y produce un combustible de automóviles adecuado que previene las dificultades de arrancar un motor frío, como sucede usando solo alcohol [etílico], y sin ningún cambio en el carburador o en la compresión del motor.^[32]

En esos años también se veía a la eventual escasez de gasolina como una amenaza a la incipiente industria automotriz, por lo que la posibilidad de producir etanol de forma renovable lo volvía aún más atractivo. En 1917, la revista *National Geographic* consignaba las siguientes afirmaciones del inventor Alexander Graham Bell:

El alcohol [etílico] es un combustible hermoso, limpio y eficiente, que cuando no se destina al consumo humano, se produce muy económicamente... Se manufactura a partir de residuos de maíz, y de hecho casi de cualquier materia vegetal susceptible de fermentarse... No necesitamos temer el agotamiento de nuestras reservas de combustibles mientras podamos producir las cantidades anuales de alcohol [etílico] necesarias.^[33]

En memorandos internos de Ethyl, Midgley coincidía con lo anterior y aseguraba que el etanol era “incuestionablemente, el combustible del futuro”.^[11] En 1920 comisionó a su asistente T. A. Boyd para que se informara acerca de las investigaciones de un profesor de la Universidad de Yale

acerca de la hidrólisis de celulosa.^[29] A Midgley y a Boyd les pareció que esta alternativa no podría aplicarse en el corto plazo, y terminaron por descartarla cuando a finales de la década de 1920 se descubrieron nuevas reservas de petróleo en Texas y los precios disminuyeron.^[15]

En Europa, las escasas reservas de petróleo de varios países condujeron a que el interés por la producción de etanol y otros combustibles alternativos, así como por los motores pequeños y eficientes, se mantuviera muchos años después de la Primera Guerra Mundial.^[31] En cambio, la industria automotriz de los E.U.A. se concentró en los motores de alta compresión y potencia,^[14] y en el empleo del etanol como aditivo, más que como combustible.^[31] Una ventaja del empleo de la mezcla de gasolina con etanol era que no requería que se modificaran los motores diseñados para funcionar solo con gasolina. Por ello, en ese país se disponía de varias mezclas comerciales de gasolina con etanol.^[29] Mezclas similares eran bien conocidas en Europa, así como en Latinoamérica, y hacia 1925 se usaban rutinariamente en más de una veintena de países industrializados.^[29] En Francia, por ejemplo, era obligatorio adicionar etanol a la gasolina, mientras que en Irlanda, Suecia y Gran Bretaña esta práctica recibía beneficios fiscales.^[31] En los E.U.A. se comercializaban también mezclas de gasolina con butanol y con benceno. De hecho, Midgley y Kettering patentaron varias mezclas de este tipo, con las cuales no se presentaba el problema de la detonación.^[11]

El impulso a la gasolina adicionada con TEP vino sin duda de las enormes ganancias que reportaba. Por cada galón vendido de su producto, Ethyl recibía tres centavos de dólar; con solo contar con el 20% de las ventas de gasolina en los E.U.A., la compañía recibiría 60 millones de dólares anuales. Tras enumerar estos cálculos a Kettering en 1923, Midgley concluyó que “deberíamos ir tras el negocio tan pronto como podamos”.^[11] Para mantener este lucrativo negocio, los directivos de Ethyl mantuvieron una postura pública que negaba la existencia de aditivos alternativos al TEP. En un artículo publicado en abril de 1925, Midgley usaba argumentos como el siguiente:

El tetraetilo de plomo es el único material disponible que aporta estos resultados, que son de vital importancia para el uso público del automóvil, y a menos que exista un grave e inexcusable peligro en la manufactura del tetraetilo de plomo, su abandono no es justificable.^[34]

Así, en franca contradicción con sus memorandos internos y con las patentes que poseían, Ethyl se empeñaba en sostener que no había sustitución posible del TEP. Incluso, en ese mismo año de 1925, consiguieron la patente de una nueva mezcla a base de alcohol, benceno y un aditivo metálico no precisado, probablemente pentacarbonilo de hierro.^[31] Al poner el énfasis en el proceso de producción del TEP, Ethyl trataba de relanzar la producción y la venta de su producto con solo asegurar las condiciones de seguridad en sus plantas, negando las alternativas que conocían de sobra y por supuesto que la liberación de plomo a la atmósfera pudiera constituir un peligro de salud pública.

El “regalo del cielo”

En vista de los decesos ocurridos, el Director General de Salud Pública de los E.U.A. organizó una conferencia que tuvo lugar el 20 de mayo de 1925. Dado que no había precedentes regulatorios, la intención era encontrar evidencia incontrovertible de un riesgo serio e inmediato, que justificara posibles acciones contra la venta de *Ethyl*. Fueron convocadas cerca de una centena de personas, que podían agruparse en dos bandos: por una parte, los representantes de la industria, y por la otra, los expertos en salud pública^[11,14] Los primeros se enfocaron en sostener falsamente, como se expuso antes, que el TEP no tenía sustitutos. Uno de los ejecutivos de Standard Oil, Frank Howard, llegó a afirmar que:

La civilización presente se basa en el petróleo y los automóviles... No consideramos justificado abandonar algo que ha llegado a la industria como un *regalo del cielo* con base en la posibilidad de que implique un riesgo.^[29,35]

Por su parte, los médicos y toxicólogos insistieron en que la toxicidad del plomo no era una posibilidad, sino un hecho establecido.^[29] El principal resultado de esta conferencia fue la conformación de un comité, integrado en su mayoría por médicos expertos, que empezó a trabajar en junio de ese año.

A partir de datos proporcionados por Ethyl, que indicaban que el 70% del plomo añadido a la gasolina permanecía en el motor, y que del resto, la mitad se quedaba en el aceite del cárter, el comité estimó que la exposición al plomo diaria derivada del tráfico vehicular sería de 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dado que el valor límite de exposición laboral era de 0.5 a 1 mg/m^3 , en su informe de 1926 el comité concluyó que no había sustento para prohibir la venta de *Ethyl*, mas recomendó que se hicieran estudios adicionales y que se buscaran sustitutos al TEP.^[29] Ninguna de estas recomendaciones fue atendida, y la venta de *Ethyl* pudo relanzarse sin tropiezos en mayo de 1926 después de que se endurecieran las condiciones de seguridad en las plantas en donde se manufacturaba el TEP.

En los años subsecuentes las ventas de gasolina con plomo aumentaron en paralelo con el uso del automóvil. Esta empezó a venderse en Canadá en 1926, en Japón en 1927 y en Australia en 1932; en Cuba se introdujo algún tiempo antes de este último año.^[36] En Europa, Inglaterra comenzó a comercializar la gasolina con plomo en 1928, e Italia en 1935.^[36] Para 1936, *Ethyl* representaba el 90% de la gasolina vendida en los E.U.A., y el apoyo industrial al TEP había crecido tanto, que ese año la comisión de comercio de ese país prohibió cualquier crítica al TEP.^[37] También en 1936 arrancó la producción de TEP en una planta en Alemania, a la que seguirían otras en Francia (1938) y en Inglaterra (1940).^[36] Hasta la Segunda Guerra Mundial, el TEP se usó en los países europeos continentales principalmente como aditivo de combustible para aviación; para este propósito existían alternativas comerciales como el etanol, el metanol y el benceno, que se producían sobre todo en Francia y Alemania.^[36] En México, *Ethyl* comenzó a venderse en 1937, aunque las ventas se suspendieron en 1940 tras la nacionalización del petróleo y la rescisión de la patente.^[36,38] Ese

mismo año se construyó una planta de TEP cerca de Ciudad de México en la que se produjeron intoxicaciones letales y que tuvo que ser reconstruida en 1942 tras haber sido consumida por el fuego.^[38]

En 1925, Ethyl y el recién fundado Laboratorio Kettering contrataron a Robert Kehoe, profesor de fisiología en la Universidad de Cincinnati, para que estudiara los efectos de la exposición a la gasolina con plomo, que él mismo consideraba “válidos para ser investigados, aunque fueran hipotéticos”.^[14] A partir de la premisa errónea de que era natural encontrar el plomo en el organismo humano, Kehoe sostenía que había una línea precisa entre estar sano y padecer una intoxicación, que en adultos ocurría con niveles superiores a los 80 microgramos de plomo por decilitro de sangre.^[29] Sin que hubiera investigación independiente que sirviera como contrapeso, los resultados siempre *ad hoc* de Kehoe fueron considerados como los únicos válidos durante medio siglo y contribuyeron a que Ethyl justificara el empleo indiscriminado de este elemento tóxico. La patente del uso del TEP en gasolina expiró en 1947, lo que permitió que otras compañías además de Ethyl se dedicaran a su venta.²

La academia química norteamericana no dejó de respaldar a Midgley, quien en 1941 recibió la medalla Priestley, el más alto reconocimiento otorgado por la American Chemical Society por “sus hallazgos excepcionales en la ciencia química”,^[39] a los que en ese momento ya se había sumado el descubrimiento de los clorofluorocarbonos como gases de refrigeración.

Un geoquímico entra en acción

A finales de los años de 1940, Clair Patterson (véase Figura 3), geoquímico del Instituto de Tecnología de California, intentaba estimar la antigüedad de la Tierra a través de la medición de la velocidad a la que decae el uranio en plomo. Los análisis de Patterson se enfocaban en muestras de zirconio de las que conocía su edad, y por lo tanto también el contenido de plomo que el uranio debería haber producido, por el estrato geológico del que se habían extraído. Sin embargo, cada muestra que analizaba tenía más de 200 veces el valor esperado. Creyendo que las muestras se contaminaban en su laboratorio, estableció estrictos controles de limpieza en sus instalaciones y en sus análisis, los cuales le indicaron que la fuente de contaminación era la atmósfera.^[29] Gracias a estos controles, a partir del análisis del meteorito Canyon Diablo realizado en 1953, Patterson pudo calcular la edad de la Tierra en 4,550 millones de años, con un error de alrededor 70 millones de años. Los métodos de Patterson eran tan precisos que el valor considerado válido al día de hoy no es muy diferente (4,540 millones de años, con un error de 50 millones de años).^[40]

Patterson estaba convencido de que la ubicuidad del plomo era peligrosa, y se dedicó a demostrar la magnitud del



Figura 3. Clair Patterson en su laboratorio. Crédito de la imagen: *Caltech E&S Magazine* 1997, 60(1).

problema. Empleando sus técnicas analíticas de gran precisión, cuantificó el plomo a varias profundidades del océano Atlántico y del mar Mediterráneo y en la nieve de un valle rural en California, y tras analizar la composición de isótopos de plomo concluyó que su fuente era antropogénica.^[41] En un influyente artículo posterior, Patterson afirmó que las personas estaban siendo sometidas a un “ultraje crónico y severo de plomo”, y cuestionó que existiera un límite seguro de exposición a este elemento, como defendía Kehoe.^[42] Asimismo, fue pionero en el análisis de núcleos de hielo que pudieran datarse, y pudo determinar la concentración de plomo en muestras extraídas de Groenlandia que tenían antigüedades comprendidas entre el año 800 antes de nuestra era y 1965.^[43] Patterson y su equipo encontraron que la cantidad de partículas de plomo era mínima en la atmósfera del hemisferio norte antes de 1923, es decir, previamente a la entrada en el mercado de la gasolina con TEP; luego aumentaba hasta alcanzar, cuarenta años después, niveles 1,000 veces mayores.

En ese momento, en los albores del movimiento ambientalista, los estudios independientes acerca de la magnitud del problema del TEP se multiplicaban. En 1965 se reportó que la concentración típica de plomo atmosférico en las calles de Cincinnati y Los Ángeles era de 1.4 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectiva-

2 El artículo de Gil Oudijk^[36] también presenta un recuento de las compañías que vendieron o produjeron TEP, así como los nombres comerciales de las gasolinas adicionadas con este producto.

mente; es decir, 100 veces mayor que las estimaciones del comité convocado por el Director General de Salud Pública en 1925. En las autopistas de alta velocidad se superaban los 20 $\mu\text{g Pb}/\text{m}^3$.^[44] Estos hallazgos y los de Patterson causaron inquietud entre la población y obligaron a las autoridades a actuar, de modo que en 1966 el comité ambiental del senado, de reciente creación, convocó a unas audiencias para discutir el uso del TEP. En ellas Robert Kehoe sostuvo que sus investigaciones habían demostrado que la gasolina con TEP no era un problema de salud pública, y que no había sustitutos para este aditivo. En respuesta, Patterson no solo puso en entredicho los experimentos de Kehoe,³ en los que se incluían a trabajadores de las plantas productoras de TEP como testigos negativos que confirmaban la supuesta "carga natural de plomo"; también arremetió contra las autoridades que permitieron que la industria tuviera poder de decisión en asuntos de salud pública.^[29]

La firmeza de Patterson contra el uso del TEP le valió que se le negara el apoyo a sus investigaciones, que su empleador fuera presionado por la industria petrolera para que lo despidiera, y que se le negara su participación en un panel nacional dedicado a la contaminación atmosférica con plomo.⁴ No obstante, la sólida investigación de Patterson contribuyó a que en 1970 la Agencia Ambiental de los E.U.A., creada ese mismo año, enmendara la Ley de Aire Limpio de 1963 para eliminar progresivamente la gasolina con TEP. Ethyl y DuPont demandaron a la agencia, con lo que postergaron una década más su uso en ese país.^[29]

Hacia 1969, 97.5% de la gasolina que se vendía en el mundo tenía TEP (en promedio, alrededor de 0.7 gramos por litro, aunque en países latinoamericanos como Bolivia, México, Paraguay o Venezuela contenía cerca de 1.2 gramos por litro).^[36] Al mismo tiempo, se disponía ya de gasolina sin plomo en Brasil, Japón y Austria.^[36] De hecho, en Brasil, donde se producía abundantemente etanol a partir de caña de azúcar, éste se usaba como antidetonante desde la década de 1940.^[36]

El advenimiento del convertidor catalítico contribuiría en gran medida a la eliminación del TEP de la gasolina.^[36,45] Este dispositivo reduce las emisiones de gases contaminantes como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, pero la gasolina con TEP lo dañaba.^[14,15] En 1973, la agencia ambiental de los E.U.A. exigió una reducción gradual en el contenido de plomo de la gasolina, que en ese momento alcanzó su valor máximo en ese país (0.6 gramos por litro), así como la instalación de convertidores catalíticos en los

automóviles nuevos. Estas regulaciones entraron en vigor en 1975, y condujeron a que una década más tarde prácticamente no se vendiera gasolina con TEP en los E.U.A. y el contenido promedio de plomo en la sangre de sus habitantes disminuyera 80%. Se ha estimado que, debido al empleo de este aditivo, se arrojaron siete millones de toneladas de plomo a la atmósfera entre 1975 y 1985, solo en ese país.^[14]

Países como Brasil, Eslovaquia, Suecia y Tailandia, dejaron de adicionar TEP a la gasolina antes del uso generalizado de los convertidores catalíticos.^[45] En 1967, la extinta Unión Soviética impuso las primeras prohibiciones a la venta de gasolina con plomo en algunas ciudades, como Moscú, Kiev y Odessa, entre otras; sin embargo, esto no se extendió al resto del país.^[46] Brasil empezó su programa de sustitución de la gasolina con plomo en 1975, y la producción a gran escala de etanol para vehículos que lo usaran exclusivamente como combustible, en 1980.^[47] Alemania fue el primer país europeo en imponer restricciones al contenido de plomo en la gasolina (0.4 g Pb/L) en 1972; la Unión Europea fijó este mismo límite en 1981.^[48] En 1984, Alemania introdujo la "gasolina sin plomo" (con un contenido máximo de 0.013 g Pb/L),^[49] y en 1988, Japón fue el primer país en eliminar por completo el uso del plomo en gasolina,^[36] seguido por Canadá, en 1990.^[45] En el Tratado de Aarhus, firmado en 1998 por prácticamente todos los estados miembros de la Unión Europea, la gasolina sin plomo se estableció como de uso exclusivo en el año 2005.^[48]

Conclusiones

La acumulación de evidencia acerca de los efectos negativos del plomo en la salud de niños y adultos condujo a que la Organización Mundial de la Salud estimara que la incorporación del TEP a la gasolina era el "error del siglo xx".^[50] En 1996, el Banco Mundial recomendó la eliminación global del TEP, lo cual fue anunciado en 2011 como un logro efectivo por parte de la Organización de las Naciones Unidas. El 30 de agosto de 2021 se anunció el fin de las reservas de gasolina con plomo en Algeria, que era el único país del mundo que seguía ofreciéndola en estaciones de servicio.^[51] Según el programa ambiental de esta organización, la prohibición mundial de la gasolina con plomo evitó dos millones de muertes tempranas y 58 millones de delitos.^[52]

Otros aditivos organometálicos, tales como el pentacarbonilo y el dicitropentadienilo de hierro (ferroceno), y el metilciclopentadienil manganeso tricarbonilo, han tenido un cierto uso en algunos países.^[36] Hoy, los aditivos oxigenados, que aumentan el contenido de oxígeno en la gasolina y reducen así las emisiones atmosféricas, tales como el éter metil *tert*-butílico (MTBE), el alcohol *tert*-butílico (TBA) (y por supuesto, el etanol y el metanol), son los más comunes, aunque su uso no está exento de problemas ambientales.^[36,53]

La historia del TEP muestra algunas de las razones que nos han conducido a la crisis ambiental presente. Para evitar que una historia semejante se repita, es indispensable regular y vigilar los avances tecnocientíficos por parte de autoridades gubernamentales que antepongan la salud de la población

3 Las visiones opuestas de R. Kehoe y C. Patterson acerca de la toxicidad del plomo se exponen con detalle en J. O. Nriagu, *Environ. Res* **1998**, *78*(2), 71-78.

4 Para quienes deseen conocer más la vida y obra de C. Patterson, se recomienda el capítulo "La habitación limpia", de la serie documental *Cosmos: una odisea del espacio*, transmitido en abril de 2014 por National Geographic Channel y presentado por Neil DeGrasse Tyson. También se sugiere National Academy of Sciences of the United States of America, "Clair Cameron Patterson", en: *Biographical Memoirs: Volume 74*, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, D. C., 1998.

a los beneficios de una minoría. Algunos científicos visionarios quisieron aplicar el principio precautorio al uso del TEP, mas no fueron escuchados. Este principio debe ser la guía indiscutible para las innovaciones que puedan socavar los cimientos de la vida en la Tierra.

Agradecimientos

La autora agradece al Dr. Eduardo Reyna Méndez sus constructivos comentarios al texto.

Referencias

- [1] P. Crutzen, *Nature* **2000**, 415, 23.
- [2] H. Trischler, *Desacatos* **2017**, 54, 40-57.
- [3] M. Svampa, *Utop. Prax. Latinoam.* **2019**, 24, 33-54.
- [4] Oxfam International **2020**, <https://www.oxfamintermon.org/es/publicacion/combatir-desigualdades-emisiones-carbono> (visitada el 25 de junio de 2021).
- [5] J. R. McNeill, *Something new under the sun: An environmental history of the twentieth-century world*, WW Norton & Company, New York, 2001.
- [6] S. Hernberg, *Am. J. Ind. Med.* **2000**, 38(3), 244-254.
- [7] G. Vázquez-Rodríguez, *Herreriana* **2015**, 11(2), 3-8.
- [8] A. P. Loeb, *Bus. Econ. His.* **1995**, 72-87.
- [9] T. Midgley, *Ind. Eng. Chem.* **1937**, 29(2), 241-244.
- [10] H. E. B. Viana, P. A. Porto, *J. Chem. Educ.* **2013**, 90(12), 1632-1638.
- [11] B. Kovarik, SAE Technical Paper **1994**, 941942.
- [12] T. Midgley, T. A. Boyd, *Ind. Eng. Chem.* **1922**, 14(10), 894-898.
- [13] C. Cooksey, *Sci. Prog.* **2012**, 95(1), 73-88.
- [14] J. O. Nriagu, *Sci. Total Environ.* **1990**, 92, 13-28.
- [15] C. G. Sarkar, *Orient. J. Chem.* **2020**, 36(1), 86-92.
- [16] R. C. Flagan, J. H. Seinfeld, *Fundamentals of air pollution engineering*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [17] D. Seyferth, *Organometallics* **2003**, 22(25), 5154-5178.
- [18] H. L. Needleman, *Environ. Res.* **1997**, 74(2), 95-103.
- [19] M. Fischetti, *Invest. Ciencia* **2021**, 532, 13.
- [20] Hipócrates de Cos, *Tratados hipocráticos. II, Sobre los aires, aguas y lugares*, Gredos, Madrid, 1986.
- [21] Nicandro de Colofón, *Alexifarmaka*, Moleiro, Barcelona, 1997.
- [22] M. L. Robles Osorio, E. Sabath, *Rev. Invest. Clin.* **2014**, 66(1), 88-91.
- [23] P. A. Poma, *An. Fac. Med.* **2008**, 69(2), 120-126.
- [24] A. Garza, H. Chávez, R. Vega, E. Soto, *Salud Ment.* **2005**, 28(2), 48-58.
- [25] C. Nava-Ruiz, M. Méndez-Armenta, *Arch. Neuroc.* **2011**, 16(3), 140-147.
- [26] T. D. Matte, *Salud Publ. Mex.* **2003**, 45(S2), 220-224.
- [27] R. A. Goyer, *Environ. Health Perspect.* **1990**, 86, 177-181.
- [28] Organización Mundial de la Salud **2019**, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health> (visitada el 25 de junio de 2021).
- [29] W. Kovarik, *Int. J. Occup. Environ. Health* **2005**, 11, 384-397.
- [30] F. T. Edelmann, *Pap. Proc. Roy. Soc. Tasmania* **2016**, 150(1), 45-49.
- [31] W. Kovarik, *Automot. His. Rev.* **1998**, 32, 7-27.
- [32] Alcohol as an automobile fuel. *Sci. Am.* **1918**, July 6, Sect. A.
- [33] A. G. Bell, *Natl. Geog.* **1917**, February, 131.
- [34] T. Midgley, *Ind. Eng. Chem.* **1925**, 17(8), 827-828.
- [35] D. Rosner, G. Markowitz, *Am. J. Pub. Health* **1985**, 75(4), 344-352.
- [36] G. Oudijk, *Environ. Forensics* **2010**, 11(1-2), 17-49.
- [37] M. Z. Jacobson, *Atmospheric pollution: history, science, and regulation*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002, pp. 76-77.
- [38] J. C. Brown, A. Knight, *The Mexican Petroleum Industry in the Twentieth Century*, University of Texas Press, Austin, 1992.
- [39] American Association for the Advancement of Science, *Science* **1941**, 94(2437), 252-252.
- [40] University of Illinois Board of Trustees **2022**, <https://publish.illinois.edu/clair-patterson/clair-pattersons-early-life-and-research/> (visitada el 25 de enero de 2022).
- [41] M. Tatsumoto, C. C. Patterson, *Nature* **1963**, 199, 350-352.
- [42] C. C. Patterson, *Arch. Environ. Health* **1965**, 11, 344-360.
- [43] M. Murozumi, T. J. Chow, C. Patterson, *Geochim. Cosmochim. Acta* **1969**, 33(10), 1247-1294.
- [44] Public Health Service, *Lead in the atmosphere of three urban communities*. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Cincinnati, 1965.
- [45] M. Lovei, *Phasing out lead from gasoline: World-wide experience and policy implications (No. 40)*, Environment Department, The World Bank, 1996.
- [46] V. M. Thomas, *Ann. Rev. Energ. Environ.* **1995**, 20(1), 301-324.
- [47] T. Nogueira, D. de Sales Cordeiro, R. A. Muñoz, A. Fornaro, A. H. Miguel, M. Andrade, "Bioethanol and Biodiesel as Vehicular Fuels in Brazil", en *Biofuels - Status and Perspective*, IntechOpen, 2015.
- [48] H. Storch, "Curbing the Omnipresence of Lead in the European Environment Since the 1970s: A Successful Example of Efficient Environmental Policy", en *Persistent Pollution – Past, Present and Future*, Springer, Cham, pp. 57-67, 2011.
- [49] H. Storch, M. Costa-Cabral, C. Hagner, F. Feser, J. Pacyna, E. Pacyna, S. Kolb, *Sci. Total Environ.* **2003**, 311(1-3), 151-176.
- [50] C. M. Shy, *World Health Stat. Quart.* **1990**, 43(3), 168-176.
- [51] United Nations Environment Programme **2021**, <https://news.un.org/en/story/2021/08/1098792> (visitada el 25 de febrero de 2022).
- [52] P. L. Tsai, T. H. Hatfield, *J. Environ. Health* **2011**, 74(5), 8-15.
- [53] T. M. Abdellatif, M. A. Ershov, V. M. Kapustin, M. A. Abdelkarreem, M. Kamil, A. G. Olabi, *Fuel* **2021**, 291, 120112.

100 años del experimento Stern-Gerlach

Jorge Santoro



Jorge Santoro

Profesor de Investigación del CSIC
jubilado

C-e: jorgesantorosaid@gmail.com

Recibido: 18/02/2022

Aceptado: 28/04/2022

Resumen: Se cumplen 100 años del experimento Stern-Gerlach que demostró concluyentemente la existencia de la cuantización espacial, un fenómeno clave en diversos aspectos de la Química y de la Física, tales como las espectroscopías de RMN y RSE, el máser o los relojes atómicos. En este artículo de carácter histórico se describe la motivación del experimento y las dificultades que tuvieron que superar sus autores.

Palabras clave: Experimento Stern-Gerlach, cuantización espacial, historia de la ciencia.

Abstracts: It is the 100th anniversary of the Stern Gerlach experiment that demonstrated conclusively the existence of spatial quantization, a key phenomenon in various aspects of Chemistry and Physics, such as NMR and EPR spectroscopies, the maser or the atomic clocks. This historical article describes the motivation for the experiment and the difficulties its authors had to overcome.

Keywords: Stern-Gerlach experiment, space quantization, history of science.

Introducción

La noche del 7 al 8 de febrero de 1922 se llevó a cabo con éxito, tras casi un año de intentos, el experimento conocido como el "experimento Stern-Gerlach". El experimento es, sin duda, uno de los más citados en obras que tratan con temas relacionados con la Mecánica Cuántica, tanto desde un punto de vista teórico como histórico, así como en tratados de Química Física o de Espectroscopía. Ello se debe a varias características. Por un lado, el experimento sirvió para confirmar aspectos importantes de la teoría cuántica: por primera vez se observaba la cuantización de modo directo. Por otro, sin embargo, puso de manifiesto las limitaciones de la mecánica cuántica inicial, la vieja mecánica cuántica que mezclaba la cuantización de determinadas propiedades con una dinámica de tipo clásico. Finalmente, se trataba de un experimento que se puede calificar como extremadamente elegante por su sencillez conceptual.

Durante la Segunda Guerra Mundial se destruyó el dispositivo experimental original del experimento, así como la documentación de laboratorio asociada con él. La reconstrucción de cómo se llevó a cabo está basada en entrevistas a los autores y en los recuerdos de algunos colaboradores de Otto Stern o de Walther Gerlach de la época o posteriores (Schütz, Estermann, Herschbach, ...). Aparecen en estos relatos multitud de anécdotas que, como ocurre en torno a otros desarrollos científicos trascendentes (la bañera de Arquímedes, la manzana de Newton, el sueño de Kekulé, la contaminación de una placa Petri de Fleming, la compañera sexual de Schrödinger en Arosa, etc.), no siempre está claro si son ciertas o forman parte del mito.

El origen

El origen del experimento hay que situarlo en la génesis de la teoría atómica. Mientras que para los químicos la existencia de átomos resultaba indiscutible, especialmente tras el famoso congreso de Karlsruhe de 1860, hasta comienzos del siglo xx los físicos prácticamente no habían prestado atención al tema y parte de ellos cuestionaba su "realidad". La situación cambió drásticamente como consecuencia de varios hechos, entre los que destacan el descubrimiento del electrón y el de la radiactividad. Se comenzó entonces a proponer modelos atómicos (Thomson, Nagaoka, Rutherford) de entre los cuales el modelo cuántico de Bohr resultó triunfante. El modelo inicial de Bohr, que involucraba órbitas electrónicas circulares, fue extendido por Sommerfeld, primero admitiendo órbitas elípticas (dos grados de libertad) y posteriormente cuantizando la inclinación del plano de la órbita (tres grados de libertad: forma, tamaño, dirección)^[1]. La cuantización espacial era capaz de explicar el efecto Zeeman normal^[2,3], pero no el anómalo. No superaba, por tanto, a la teoría clásica de Zeeman y Lorentz. Además, planteaba problemas que hicieron que fuera considerada por muchos físicos como un artificio matemático^[4]. Uno de estos problemas era que, en el caso de un gas de átomos hidrogenoides, en presencia de un campo magnético debía producirse una birrefringencia óptica, algo que no se observaba experimentalmente. Este hecho se planteó en un seminario en la Universidad de Fráncfort. A la mañana siguiente Otto Stern, que había asistido al seminario, se despertó temprano, pero hacía demasiado frío para levantarse de la cama, así que se quedó allí pensando acerca del asunto y tuvo la idea de un experimento para confirmar o descartar la cuantización espacial^[5]. Para llevar a cabo el experimento reclutó a su colega Walther Gerlach, que era un experimentador más experto que él.

Los autores

¿Quiénes eran Otto Stern y Walther Gerlach en 1922?

Otto Stern nació en 1888 en la entonces ciudad alemana de Sohrau (actualmente Żory, Polonia). Estudió Química Física, en las universidades de Friburgo, Múnich y Breslavia, doctorándose en 1912 en esta última con una aplicación de la teoría cinética al estudio de la presión osmótica. A continuación realizó su postdoctorado con Albert Einstein, primero en la Universidad Alemana de Praga y luego en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH), con quien estudió la energía del punto cero. Tras conseguir la "Habilitation" consiguió un puesto de profesor asociado en Zúrich y posteriormente en el Instituto de Física Teórica de Fráncfort. Durante la Primera Guerra Mundial sirvió en una unidad meteorológica en el frente ruso. Casi al final de la guerra Nernst consiguió el traslado de Stern a su laboratorio en Berlín. Allí conoció a Max Volmer con quien colaboró en el estudio de la desactivación intermolecular de procesos fotofísicos, obteniendo la denominada relación de Stern-Volmer. De vuelta a Fráncfort se interesó por los haces moleculares con los que estudió la distribución de velocidad de los átomos que emergen de un horno. Sus datos experimentales no se ajustaban bien a la distribución de Maxwell-Boltzmann. En una segunda publicación mostró, tras una indicación de Einstein, que la velocidad de los átomos que emergen del horno no debe mostrar dicha distribución, puesto que los de mayor velocidad tienen una mayor probabilidad de escapar; el flujo difiere de la densidad. Su siguiente trabajo sería el experimento en el que deseaba probar o descartar la cuantización espacial.

Walther Gerlach nació en Biebrich (Alemania) en 1889. Estudió Física en la universidad de Tubinga en la que se doctoró en 1912 con una tesis sobre la ley de radiación de Stefan-Boltzmann, dirigida por Friedrich Paschen. Tras el doctorado continuó trabajando con Paschen y, entre otros temas, se interesó por los haces moleculares que intentó utilizar, sin éxito, en estudios espectroscópicos. Durante la Primera Guerra Mundial sirvió en una unidad de desarrollo de la telegrafía sin hilos y en la Comisión de Pruebas de Artillería. Tras la guerra trabajó en el laboratorio de Física de una industria de pinturas. En 1920 obtuvo el puesto de profesor asociado en el Instituto de Física Experimental de la Universidad de Fráncfort. Allí entabló muy buenas relaciones con los integrantes del Instituto de Física Teórica, que, a pesar del nombre, también realizaban trabajo experimental. Fruto inicial de esas relaciones fueron varias publicaciones con Max Born, el director del Instituto de Física Teórica. Una de ellas fue el estudio de redes cristalinas utilizando el método Debye-Scherrer, lo que tiene cierto interés por el efecto que tuvo en el desarrollo del dispositivo experimental con el que se llevó a cabo el experimento Stern-Gerlach. Otro de los problemas que se planteó abordar Gerlach fue el de comprobar si los átomos de bismuto mostraban el mismo diamagnetismo que se observaba en cristales. Concibió para ello un experimento con haces moleculares en el que los átomos de bismuto sería deflectados por un campo fuertemente inhomogéneo. Se cuenta^[6] que Born era de la opinión de que el experimento no tendría éxito puesto que la deflexión sería muy pequeña, a

lo que Gerlach contestó "kein Versuch ist so dumm, dass man ihn nicht versuchen sollte" (ningún experimento es tan estúpido que uno no debería intentarlo). Para preparar el experimento empezó a estudiar cómo producir un campo magnético con un fuerte gradiente de campo. Antes de que realizara el experimento con el bismuto Otto Stern le preguntó: ¿Sabes lo que es la cuantización direccional? A continuación, le explicó su idea para confirmarla o refutarla mediante un experimento.

Hay un tercer responsable del experimento que permanece parcialmente olvidado. Se trata del maestro mecánico del Instituto de Física de la Universidad de Fráncfort Adolf Schmidt. Schmidt se encargó de la construcción y mantenimiento de gran parte del equipo con el que se llevó a cabo el experimento.

La descripción teórica del experimento

En julio de 1921 aparecía en Zeitschrift für Physik un artículo^[7] que indujo a Stern a publicar inmediatamente su propuesta experimental. El artículo lo firmaban Hartmut Kallman y Fritz Reiche, que trabajaban en Berlín en el Instituto de Química Física dirigido por Fritz Haber, y llevaba por título "Über den Durchgang bewegter Moleküle durch inhomogene Kraftfelder" (Sobre el paso de moléculas en movimiento a través de campos de fuerza no homogéneos). En él se decía "se está probando en nuestro instituto el siguiente método nuevo para la detección de dipolos: se pasa un haz molecular a través de un campo eléctrico no homogéneo; entonces, si las moléculas poseen dipolos, un número notable de las moléculas deben desviarse de su camino". Dado que Born estaba interesado en moléculas dipolares Kallman y Reiche enviaron, antes de su publicación, una copia del trabajo a Fráncfort. Born se lo enseñó a Stern, que al leerlo temió que dieran un paso más y se ocuparan de la cuantización espacial. Para mantener la prioridad en su idea escribió inmediatamente un artículo^[8] en el que desarrollaba la motivación y la base teórica del experimento que había concebido.

El artículo de Stern, recibido en Zeitschrift für Physik solo un mes después del de Kallman y Reiche, llevaba por título "Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld" (Una vía para la comprobación experimental de la cuantización direccional en el campo magnético). Comenzaba indicando que de acuerdo con la teoría cuántica si se coloca un gas de átomos con impulso angular total \hbar en un campo magnético solo son posibles dos orientaciones, puesto que la componente del impulso angular en la dirección del campo magnético solo puede tomar los valores $\pm\hbar$. Indicaba a continuación dos objeciones a esta posibilidad. Por un lado, de cumplirse esto, debería dar lugar a una birrefringencia óptica, algo que hasta la fecha no se había observado. Por otro, resultaba difícil explicar cómo los átomos, cuyos momentos angulares en ausencia de campo apuntan en todas las direcciones posibles, se orientan al entrar en el campo magnético. De hecho, lo esperado era un movimiento de precesión, la precesión de Larmor, en la que el ángulo entre el momento magnético del átomo y el campo magnético externo se mantiene constante. Afirmaba después: "Ob nun die quantentheoretische oder die klassische Auffassung zutrifft, läßt sich durch ein prinzipiell

ganz einfaches Experiment entscheiden. Man braucht dazu nur die Ablenkung zu untersuchen, die ein Strahl von Atomen in einem geeigneten inhomogenen Magnetfeld erfährt." (Si la concepción teórica cuántica o la clásica es la correcta puede decidirse mediante un experimento en principio muy simple. Tan solo se necesita examinar la desviación que experimenta un haz de átomos en un campo magnético no homogéneo adecuado.). Indicaba además en una nota que Gerlach y él llevaban ya algún tiempo ocupados en la ejecución del experimento.

Presentaba a continuación las bases teóricas del experimento. En presencia de un gradiente de campo magnético se ejerce sobre el átomo una fuerza igual a la variación de la energía potencial cambiada de signo

$$V = -\mu \times B$$

$$F = (\mu_x \text{ dB/dx}, \mu_y \text{ dB/dy}, \mu_z \text{ dB/dz})$$

Se considera como eje z el definido por el campo magnético constante. Debido a la precesión de Larmor los valores medios de μ_x y μ_y a considerar son nulos, dado que el tiempo correspondiente a una rotación alrededor del eje z (en la que los valores de μ_x y μ_y pasan de ser positivos a negativos y viceversa) es mucho menor que el tiempo en el que el efecto del gradiente de campo varía la trayectoria en las direcciones x o y de modo apreciable. Por tanto, tan solo hay que considerar la fuerza en la dirección z.

$$F_z = \mu_z \text{ dB/dz}$$

La aceleración será

$$a_z = F/m = \mu_z/m \text{ dB/dz}$$

Si la fuerza actúa durante el tiempo t en el que el átomo atraviesa una distancia l, perpendicular al campo magnético, a una velocidad v la desviación será

$$s_z = 1/2 a_z t^2 = 1/2 a_z l^2/v^2 = \mu_z/2m \text{ dB/dz } l^2/v^2$$

De acuerdo con la teoría cinética de los gases se cumple $mv^2 = 3k_B T$, luego

$$s_z = \mu_z/6k_B \text{ dB/dz } l^2/T$$

En el caso cuántico y para átomos con número cuántico azimutal igual a uno solo existen dos valores posibles de μ_z , $\pm e/2m$ (Stern sigue en esto a Bohr, que descartaba la posibilidad $\mu_z = 0$), por lo que el haz se dividiría en dos alejados en $2s_z$, cada uno con la mitad de átomos del original. Al depositarse los átomos en una placa dejarían dos trazas separadas y una intensidad nula en la posición que se alcanza en ausencia del campo magnético inhomogéneo, es decir sin desviación del haz. En el caso clásico el número de átomos con momentos magnéticos cuya orientación forma un ángulo θ con el campo magnético, $\mu_z = e\hbar/2m \cos(\theta)$, es proporcional a $\sin(\theta)$, por lo que el depósito del haz sería un continuo

entre los dos valores correspondientes al caso cuántico y con una intensidad máxima en la posición de desviación nula.

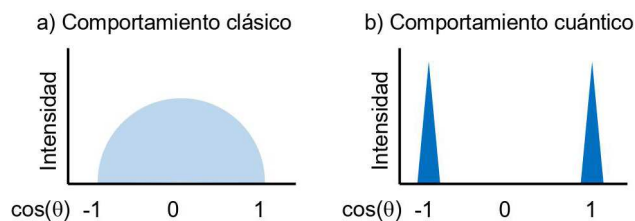


Figura 1. Resultado esperado del experimento Stern-Gerlach de acuerdo con: a) la Física clásica; b) la Mecánica cuántica.

Con objeto de evaluar la viabilidad del experimento el artículo terminaba con un cálculo de la desviación esperada para el momento magnético máximo $\mu_z = e\hbar/2m$. Utilizando valores "razonables" experimentalmente ($\text{dB/dz} = 100 \text{ T/m}$, $l = 0,033 \text{ m}$ y $T = 1000 \text{ K}$) el resultado era de $s_z = 0,0112 \text{ mm}$ (posiblemente hay una errata en la publicación, pues el valor correcto es $0,0122 \text{ mm}$). Resulta sorprendente que con un valor esperado de la desviación tan minúsculo Stern y Gerlach decidieran realizar el experimento. De hecho, Gerlach cuenta^[9] que, unos días después de la propuesta inicial, Stern le dijo que había hecho el cálculo y que la desviación era demasiado pequeña. A continuación, indicó que el experimento podría funcionar si se hicieran ciertas cosas. En especial preguntó a Gerlach si conseguiría una inhomogeneidad de campo de 10^4 Gauss/cm (100 T/m). La contestación de Gerlach fue que la conseguiría con seguridad, incluso mayor. Ante esto Stern comentó que tenían que conseguir un haz de una décima o incluso una centésima de milímetro de diámetro y todo funcionaría.

La publicación de Stern^[8] despertó un gran interés, no solo entre los científicos ocupados en temas de mecánica cuántica sino entre los físicos en general. Este interés se trasladó a empresas privadas relacionadas con la investigación científica, que colaborarían con Stern y Gerlach proporcionándoles medios para la realización del experimento.

La instrumentación

Así como desde el punto de vista teórico el experimento era sencillo, desde el punto de vista experimental presentaba enormes dificultades. Básicamente el equipo experimental consistía en: un horno en cuyo interior se situaba un hilo de platino sobre el que se había fundido el metal a examinar, la plata, y que se calentaba eléctricamente; un par de rendijas para seleccionar la parte del haz atómico de dirección adecuada; un campo magnético no homogéneo; una placa sobre la que se depositaban los átomos del haz. Además, todo el dispositivo se encontraba en vacío con objeto de evitar colisiones, lo que hacía necesario refrigerar las paredes exteriores del horno y el imán. Gran parte de las dificultades que presentaba la construcción del equipo aparecen reflejadas en el artículo^[10] que publicaron Gerlach y Stern un par de años después del éxito del experimento, en el que describieron la instrumentación con las distintas modificaciones que fueron introduciendo.

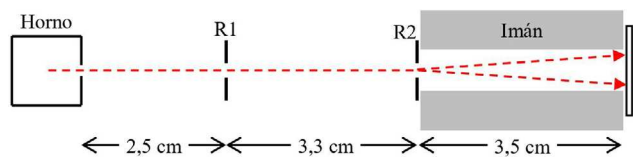


Figura 2. Esquema del dispositivo experimental usado por Stern y Gerlach.

El primer horno que utilizaron era metálico, de hierro, con una apertura circular de 1 mm de diámetro. En ocasiones, tras calentarse durante horas se evaporaba el aislante que separaba el hilo de platino de las paredes del horno, lo que producía cortocircuitos. Para evitar este inconveniente tuvieron que sustituirlo por un horno cerámico. Este horno resultó más resistente, si bien el calentamiento no resultaba tan uniforme como con el de hierro. Inicialmente las rendijas eran orificios circulares de 1/20 mm de diámetro hechos en placas de platino. Tiempo después uno de estos diafragmas se sustituyó por una rendija rectangular de 0,8 mm de altura y 0,03 a 0,04 mm de anchura. Para conseguir el gradiente de campo magnético construyeron piezas polares, una en forma de cuña y la otra con una hendidura, que unieron a las piezas polares de un electroimán en el que la longitud l que debía atravesar el haz era de 3,5 cm. Todo el dispositivo debía estar en vacío. Como el calentamiento debido al horno impedía conseguir un buen vacío, decidieron utilizar dos cámaras, uno para el horno y otro para el resto del instrumento. El vacío se obtenía mediante sendas bombas de difusión de mercurio. Además, cada cámara estaba conectada a un recipiente que se enfriaba con nieve carbónica o aire líquido. Las bombas de vacío fueron las que dieron mayores problemas. Tal como cuenta Wilhelm Schütz^[11], doctorando de Gerlach en aquellos años, las bombas de difusión de mercurio eran poco eficientes y poco fiables. Estaban hechas de vidrio, y no era raro que se rompieran por el golpeo del mercurio en ebullición o debido a la condensación de agua. Con la rotura no solo se desperdiciaban horas y horas de bombeo, sino que era necesario sustituir la bomba. Finalmente decidieron construirlas y repararlas ellos mismos^[9]. La conexión entre las dos cámaras de vacío y la estabilidad mecánica de todo el sistema tampoco resultó sencilla y tuvieron que probar tres disposiciones para encontrar una configuración estable que además les permitiera alinear todo el sistema con cierta facilidad. Obviamente el último elemento, la placa de condensación, no planteó problemas, pero sí la observación de la pequeña cantidad de átomos de plata que se depositaba. Respecto a esto Dudley Herschbach cuenta^[5,12] que Stern le comentó: "After venting to release the vacuum, Gerlach removed the detector flange. But he could see no trace of the silver atom beam and handed the flange to me. With Gerlach looking over my shoulder as I peered closely at the plate, we were surprised to see gradually emerge the trace of the beam. . . . Finally we realized what [had happened]. I was then the equivalent of an assistant professor. My salary was too low to afford good cigars, so I smoked bad cigars. These had a lot of sulfur in them, so my breath on the plate turned the silver into silver sulfide, which is jet black, so easily visible. It was like developing a photographic film". Tras esto desarrollaron un procedimiento de revelado que les permitía observar con

claridad el depósito de plata. Aunque la anécdota tiene todos los elementos para considerarla apócrifa, Bretislav Friedrich y Dudley Herschbach consiguieron reproducir el revelado con humo de un puro en 2002, con motivo de la celebración de los 80 años del experimento^[12].

Además de las dificultades técnicas se enfrentaban a problemas económicos derivados de la situación de Alemania tras la Primera Guerra Mundial. Afortunadamente recibieron ayuda de diversas fuentes, lo que es un signo del interés que había despertado el experimento. En las publicaciones agradecieron a la empresa Hartmann und Braun el préstamo del electroimán, que más tarde compraron con una ayuda de una fundación del Kaiser Wilhelm-Institut für Physik; a la empresa Messer u. Co., Luftverflüssigungsanlagen por el donativo de aire líquido; a la Asociación de Amigos y Patrocinadores de la Universidad de Fráncfort por los medios que habían puesto a su disposición. Una de las contribuciones económicas resulta curiosa; la cuentan Friedrich y Herschbach en^[12]. Born mencionó la mala situación económica del Instituto a un colega que iba a viajar a Nueva York. Unas semanas después recibió de éste una postal invitándole a que escribiera a Henry Goldman. Friedrich y Herschbach reproducen a continuación parte de lo que indica Born en su autobiografía: "At first I took it for another joke, but on reflection I decided that an attempt should be made ... [A] nice letter was composed and dispatched, and soon a most charming reply arrived and a cheque for some hundreds of dollars ... After Goldman's cheque had saved our experiments, the work [on the Stern-Gerlach experiment] went on successfully." Henry Goldman era miembro de la familia fundadora del banco de inversión Goldman Sachs, familia que tenía sus raíces en Fráncfort.

La realización experimental

En los primeros días de noviembre de 1921 —Gerlach indica el 4 de noviembre en una entrevista^[9] y la noche del 5 al 6 de noviembre en un artículo^[13]— utilizando todavía un horno de acero y rendijas circulares de 0,05 mm de diámetro, consiguieron un éxito parcial, que enviaron inmediatamente a publicar^[14]. Habían realizado cinco experimentos sin campo magnético, con éxito en cuatro casos, y cuatro experimentos con campo magnético, con resultados en tres de ellos. La duración de cada experimento era de 8 horas, tras lo cual el depósito de plata estaba en el límite de detección. En los experimentos sin campo magnético la traza del depósito era circular con un diámetro de 0,1 mm. En los experimentos con campo magnético la traza aparecía ensanchada en una dimensión, la correspondiente al gradiente de campo, con un tamaño de 0,25-0,3 mm. Este ensanchamiento correspondía a un momento magnético de uno o dos magnetones de Bohr. Este fue el único resultado que se atrevieron a indicar en la publicación, aunque la ausencia de estructura discernible en el depósito con campo magnético parecía favorecer la ausencia de cuantización espacial, tal como contaría Gerlach años después^[9]. Gerlach cuenta también que durante una visita a Fráncfort Sommerfeld indicó que habría que considerar también la posible división del haz en tres subhaces, correspon-

dientes a los números cuánticos magnéticos $m = +1, 0$ y -1 , subhaces que eran suficientemente difusos como para observar un continuo. La posibilidad $m = 0$ había sido excluida por Bohr y Stern no la había tenido en consideración. Sommerfeld, por su parte, dudaba entre ambas posibilidades, inclinándose en ocasiones por una alternativa y en otras por la contraria. La explicación del resultado requería realizar experimentos adicionales con mejor resolución espacial.

Stern había conseguido una plaza de profesor de Física Teórica en Rostock, a orillas del mar Báltico, a la que se incorporó en el primer semestre del curso 1921/1922. Gerlach continuó solo a cargo del experimento. Durante las vacaciones de Navidad él y Stern realizaron varios cambios en el dispositivo experimental. Sustituyeron el horno de acero por uno cerámico, de chamota. Incrementaron la distancia entre la salida del horno y la primera rendija circular, que se había obturado con plata fundida en alguno de los experimentos anteriores. Sin embargo, aunque esto suponía también trabajar con un haz más fino, los experimentos no parecían dar mejores resultados. A principios de febrero de 1922 Stern y Gerlach se reunieron en Gotinga, a mitad de camino entre Rostock y Fráncfort, para decidir el futuro del experimento. De acuerdo con Immanuel Estermann^[6], que trabajaba con Stern en Rostock y lo haría después en Hamburgo, la conclusión de sus discusiones fue que el experimento no funcionaría. Una huelga de trenes obligó a Gerlach a permanecer día y medio en Gotinga, tiempo durante el que revisó todos los detalles instrumentales y decidió hacer un último intento. En éste la segunda rendija circular había sido sustituida por una rendija rectangular de 0,8 mm de altura y 0,03 mm de anchura que estaba orientada perpendicularmente al campo magnético y que proporcionaba mayor intensidad. Esta sustitución la realizó Gerlach al recordar^[9] que había usado este tipo de rendija en el estudio de redes cristalinas utilizando el método Debye-Scherrer que se ha comentado antes.

La noche del 7 al 8 de febrero el experimento dio lugar a dos trazas separadas, con un hueco entre ellas de 0,11 mm. La separación entre los centros de ambas trazas era de 0,2 mm. La mejor descripción de este éxito la realizaría años después Wilhelm Schütz^[11]: "I arrived one morning in February 1922 at the institute; it was a gorgeous morning; cold air and snow! W. Gerlach was in the middle of developing the silver deposit left by an atom beam which ran for 8 hours through the inhomogeneous magnetic field. Full of expectation, we watched the development process and have experienced the success of many months of hard work: the first splitting of a silver beam by an inhomogeneous magnetic field. After Meister Schmidt and, if I remember correctly, also E. Madelung, saw the splitting, the image was recorded micro-graphically in the mineralogical Institute. Then I got the job to send a Telegram to Herr Professor Stern in Rostock, which read "Bohr is right after all!" ("Bohr hat doch recht!")". Gerlach preparó varias postales con las fotografías de la traza en ausencia y en presencia de campo magnético que envió a diversos colegas. La más famosa es la que envió a Bohr en la que decía: "Hochverehrter Herr Bohr, anbei die Fortsetzung unserer Arbeit (siehe Zeitschrift f Physik VIII. Seite 110. 1921): Zu experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung. Wir gratulieren zur Bestätigung Ihrer

Theorie." (Estimado señor Bohr, adjunta la continuación de nuestro trabajo (ver Zeitschrift f Physik VIII. página 110. 1921): La evidencia experimental de la cuantización direccional. Le felicitamos por la confirmación de su teoría.). La postal aparece fechada el 8 de febrero de 1922, lo que permite deducir la fecha en la que tuvo éxito el experimento. Años después los autores de un artículo de carácter histórico sobre Stern^[15] han aprovechado la descripción de Schütz de las condiciones atmosféricas y su comparación con los registros del servicio meteorológico para confirmar la fecha.

Tras el éxito Gerlach y Stern escribieron inmediatamente un artículo^[16] en el que incluyeron los resultados de dos experimentos adicionales, que confirmaban el resultado del primero. En el artículo comenzaban explicando las mejoras que habían hecho en el dispositivo experimental respecto al utilizado en su publicación anterior. Presentaban a continuación la fotografía de su primer resultado y dibujos de la forma del depósito de plata en los tres experimentos realizados. Resumían a continuación las características de las imágenes y las conclusiones que se derivaban de ellas. Las más interesantes son:

- El haz atómico se divide en dos haces discretos en el campo magnético. No se detectan átomos no desviados.
- La anchura de los haces desviados es mayor que la anchura de la imagen no desviada. Esta última es simplemente la imagen de la rendija R2 proyectada sobre la placa colectora. El haz desviado se ensancha debido a la distribución de velocidad de los átomos de plata.
- Este hecho refuerza la evidencia de que los átomos no deflectados no están presentes en una cantidad notable. Porque la detección de átomos no deflectados que colapsan en un área pequeña es mucho más sensible que la de los átomos deflectados que se separan en un área mayor. Por tanto, la orientación del eje magnético perpendicular a la dirección del campo parece no existir.
- En estos resultados vemos la evidencia experimental directa de la cuantización direccional en el campo magnético.

Finalmente, anunciaban una publicación en Annalen der Physik con una descripción detallada de los experimentos y de los resultados tan pronto como una medición más precisa de la inhomogeneidad del campo magnético les permitiera cuantificar el valor del magnetón. A pesar de ello un mes después enviaron a la misma revista, Zeitschrift für Physik, un artículo con la medida del momento magnético de átomo de plata^[17]. Stern aprovechó las vacaciones de Pascua para trasladarse a Fráncfort y participar en los experimentos. Los dos artículos^[16,17] aparecieron publicados en el mismo número de la revista en páginas sucesivas mientras que la escritura del artículo anunciado en Annalen der Physik se demoraría dos años^[10].

Para la determinación del valor del momento magnético necesitaban conocer con precisión la distancia entre el haz y las piezas polares en ausencia de campo. Para ello redujeron el haz haciendo más estrechas las rendijas y unieron a una

de las piezas polares filamentos de cuarzo que creaban sombras en el depósito y servían de referencia para la medida. Esto les permitió determinar la distancia con una precisión de la centésima de milímetro. También necesitaban determinar el gradiente del campo magnético en las posiciones por las que pasan los átomos deflectados durante su trayectoria. La determinación punto a punto la llevaron a cabo determinando la fuerza repulsiva experimentada por un diminuto espécimen diamagnético de bismuto mediante pesadas. Efectuaron un experimento con el haz a 0,21 mm de distancia de la pieza polar en cuña. El análisis lo realizaron utilizando datos de dicho experimento y del mejor de los tres reportados en la publicación anterior, para el que estimaron una distancia de 0,32 mm. Utilizaron además unas modificaciones de la fórmula que había dado Stern en^[8]. Las modificaciones eran necesarias por dos motivos. En primer lugar, el gradiente de campo magnético no es constante, sino que depende de la distancia a la cuña, que varía a medida que el haz se curva. En segundo lugar, la velocidad cuadrática media de los átomos del haz es mayor que la correspondiente a la distribución de Boltzmann, que era la utilizada en la fórmula primitiva. Resulta extraño este error en la obtención de la fórmula inicial, puesto que había sido Stern el que, tanto experimental como teóricamente, había mostrado esta diferencia. Con estas correcciones y utilizando el valor del magnetón de Bohr para el momento magnético se reproducían bien los valores de deflexión experimentales (0,146 mm calculados frente a 0,150 observados para el experimento nuevo y 0,111 mm calculados frente a 0,103 mm observados para el anterior). Por tanto, el átomo de plata poseía un momento magnético de un magnetón de Bohr, con una incertidumbre que estimaban en un 10%.

Consecuencias

Como contestación a las postales que había enviado Gerlach recibieron varias contestaciones de las que las más entusiastas fueron la de Wolfgang Pauli^[9] -"Lieber Gerlach, Meinen herzlichsten Glückwunsch zum gelungenen Experiment. Jetzt wird hoffentlich auch der ungläubige Stern von der Richtungs-Quantelung überzeugt sein". (Estimado Gerlach: Mis más sinceras felicitaciones por el exitoso experimento. Esperemos que ahora incluso el incrédulo Stern estará convencido de la cuantización direccional)- y la de Paschen -"Ihr Versuch beweist zum ersten Mal die Realität von Bohrschen-Zuständen." (Su experimento prueba por primera vez la realidad de los estados de Bohr)-. Otros, como Bohr o Franck, preguntaban cuestiones diversas sobre el experimento. Una vez bien conocidos los resultados a partir de las publicaciones, la cuantización espacial fue aceptada como un hecho físico real. Además, el éxito del experimento se consideró una de las pruebas más convincentes de la validez de la teoría cuántica. Sin embargo, no todo eran buenas noticias para la mecánica cuántica de aquellos años. El principal problema era el de explicar cómo se producía la reorientación del momento magnético nada más entrar en el seno del campo magnético. De un modo prácticamente instantáneo. En efecto, considerando una velocidad de los átomos de plata de unos 600 m/s y aun suponiendo

que la reorientación total se produjera tras atravesar un 10% de la trayectoria a lo largo del imán, 0,3 cm, el tiempo sería de tan solo 50 ms. Este problema, que ya había apuntado Stern en su publicación teórica^[8], fue analizado por Einstein y Ehrenfest^[18]. En su razonamiento consideraban que un cambio de orientación del momento magnético suponía la liberación o la absorción de energía, que no podía tener lugar sin una influencia externa. Intentando encontrar explicaciones semiclásicas calcularon el orden de magnitud esperado atribuyendo el efecto a la radiación asociada a la precesión de Larmor o a la radiación térmica del entorno del instrumento. En el primer caso el tiempo de la reorientación sería del orden de 10^{11} segundos y de 10^9 en el segundo caso. Exploraban después dos posibles mecanismos: que la cuantización se produjera en el horno, en el que existiría un campo magnético residual, inducida por colisiones; que los tránsitos de un estado no cuántico a uno cuántico mediante procesos de absorción y emisión de radiación fueran mucho más rápidos que entre dos estados cuánticos. En ambos casos aparecían problemas que les obligaban a descartarlos.

El otro problema que planteaba la cuantización espacial era el ya citado de la birrefringencia óptica. Dado el éxito final alcanzado en la demostración de la cuantización direccional, Stern y Gerlach se propusieron observarla. Durante el verano de 1922 Gerlach se trasladó a Rostock e intentaron observarla con vapores de sodio^[6,9,19] sin conseguirlo. Gerlach indica^[9] que de regreso a Fráncfort hizo algunos intentos adicionales igualmente infructuosos.

Un experimento con estrella

Un análisis moderno, a la luz de la mecánica cuántica actual, desvela que gran parte de las hipótesis que usaron Stern y Gerlach eran incorrectas. Tan solo una serie de hechos afortunados llevaron a que el experimento produjera el resultado esperado. Para la planificación del experimento y para su interpretación se habían basado en la mecánica cuántica antigua. De acuerdo con ésta el electrón se mueve alrededor del núcleo en una órbita elíptica definida por dos números cuánticos. El eje mayor de la elipse es proporcional al número cuántico radial o principal, n , y el eje menor al número cuántico azimutal, l . Este último puede variar de 1 a n . El valor 0 estaba excluido puesto que la trayectoria sería una línea recta que atraviesa el núcleo. La orientación de la órbita respecto a una dirección del espacio también aparece cuantizada. Queda definida por el número cuántico m , con valores $m = l, l-1, \dots, -l$, de modo que el ángulo que forma el impulso angular con la dirección de medida cumple $\cos(\theta) = m/l$. En el caso de la plata el electrón de valencia tendría el número cuántico $l = 1$, lo que supone que el impulso angular puede ser paralelo ($m = \pm 1$) o perpendicular ($m = 0$) al campo magnético. Bohr excluía el caso $m = 0$, puesto el electrón se movería en una órbita paralela al campo magnético que define la dirección privilegiada, lo que resultaría inestable. Por tanto, cabía esperar dos orientaciones del momento magnético (a favor y en contra del campo) de magnitud un magnetón de Bohr, que fue el resultado observado.

La descripción del electrón de acuerdo con la mecánica cuántica actual es muy diferente. Ya no se considera que el electrón se mueve en órbitas determinadas alrededor del núcleo, sino que está definido por una función de onda. Su estado viene determinado por el número cuántico principal, n , y por el azimutal, $l = 0, \dots, n-1$, que ahora sí puede tomar el valor cero y por un nuevo número cuántico, el de espín, s . El número cuántico de espín para el electrón es $1/2$, y el impulso angular asociado es $[s(s+1)]^{1/2}\hbar$. Cuando hay dos impulsos angulares, a y b , éstos se combinan para dar el definido por el número cuántico j , que puede tomar los valores $a+b, \dots, |a-b|$. La magnitud de este impulso angular es $[j(j+1)]^{1/2}\hbar$. Finalmente el número cuántico magnético, m , asociado con la orientación del momento magnético puede tomar los valores $m = j, j-1, \dots, -j$. A diferencia con la teoría antigua la componente del impulso angular en la dirección de medida, $m\hbar$, nunca coincide con el módulo del momento angular. En el caso de la plata el electrón de valencia es $5s^1$, con lo que $n = 5$ y $l = 0$. De no considerar el espín, que en 1922 era desconocido, el momento magnético del átomo, proporcional al angular, sería nulo y no se debería observar ninguna deflexión en el experimento. El único causante de la deflexión observada en el experimento es el espín electrónico.

Stern y Gerlach eligieron la plata suponiendo que $l = 1$. De los tres valores posibles de m eliminaron el caso $m = 0$ siguiendo la propuesta de Bohr. Supusieron que el impulso angular total era \hbar . Consideraron que el impulso angular estaba orientado por completo a favor ($m = 1$) o en contra ($m = -1$) del campo magnético. La componente del momento magnético en la dirección del campo debía ser de un magnetón de Bohr, tal y como encontraron. La realidad es que en el caso de la plata el único impulso angular a considerar es el del espín, de magnitud $3^{1/2}/2 \hbar$. Sus posibles componentes en la dirección del campo son $m\hbar = \pm\hbar/2$. El momento magnético en la dirección del campo en este caso debería ser de medio magnetón de Bohr. Sin embargo, tal como demostraría Paul Dirac, en el caso del espín electrónico la constante de proporcionalidad entre el momento magnético y el impulso angular incluye un factor adicional, el denominado factor g de valor 2. Como consecuencia la componente del momento magnético en la dirección del campo es precisamente de un magnetón de Bohr. La realidad se alineaba a favor de Stern para que el resultado del experimento fuera el previsto.

Conclusiones

El experimento Stern-Gerlach se había diseñado para dilucidar "si la concepción teórica cuántica o la clásica es la correcta". El experimento demostraba fuera de toda duda la existencia de una cuantización direccional. Eliminaba, por tanto, el comportamiento clásico. Sin embargo, como hemos visto, la descripción cuántica estaba basada en una serie de hipótesis equivocadas que, de un modo totalmente afortunado, derivaban en una predicción correcta del resultado esperado. Mientras que el experimento proporcionaba evidencias concluyentes contra la teoría clásica, la supuesta

validación de la vieja teoría cuántica era incorrecta, puesto que gran parte de sus hipótesis lo eran. Esta constatación no quita ningún mérito al experimento, tanto en lo que concierne a su concepción ingeniosa como a la audacia y a la perseverancia de Stern y Gerlach hasta conseguir un resultado concluyente: la demostración de la existencia de una cuantización espacial.

Bibliografía

- [1] A. Sommerfeld, *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, *Ann. Phys.* **1916**, 356, 1-94.
- [2] A. Sommerfeld, *Zur Theorie des Zeeman-Effekts der Wasserstofflinien, mit einem Anhang über den Stark*, *Phys. Z.* **1916**, 17, 491-507.
- [3] P. Debye, *Quantenhypothese und Zeeman-Effekt*, *Phys. Z.* **1916**, 17, 507-512.
- [4] J. Mehra, H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory, Volume 1, Part 2*, Springer Verlag, New York, 1982, pag. 435.
- [5] D. Herschbach, *Molecular Dynamics of Elementary Chemical Reactions*, *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **1987**, 26, 1221-1243.
- [6] I. Estermann, *History of the molecular beam research: Personal reminiscences of the important evolutionary period 1919-1933*, *Am. J. Phys.* **1975**, 43, 661-671.
- [7] H. Kallman, F. Reiche, *Über den Durchgang bewegter Moleküle durch inhomogene Kraftfelder*, *Z. Phys.* **1921**, 6, 352-375.
- [8] O. Stern, *Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld*, *Z. Phys.* **1921**, 7, 249-253.
- [9] Entrevista a Walther Gerlach por Thomas S. Kuhn en febrero de 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, <http://repository.aip.org/islandora/object/nbla:266549>.
- [10] W. Gerlach, O. Stern, *Über die Richtungsquantelung im Magnetfeld*, *Ann. Phys.* **1924**, 379, 673-699.
- [11] W. Schütz, *Personliche Erinnerungen an die Entdeckung des Stern-Gerlach-Effektes*, *Phys. Bl.* **1969**, 25, 343-345.
- [12] B. Friedrich, D. Herschbach, *Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics*, *Phys. Today* **2003**, 56, 53-59.
- [13] W. Gerlach, *Zur Entdeckung des Stern-Gerlach-Effektes*, *Phys. Bl.* **1969**, 25, 472.
- [14] W. Gerlach, O. Stern, *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*, *Z. Phys.* **1922**, 8, 110-111.
- [15] J.P. Toennies, H. Schmidt-Böcking, B. Friedrich, J.C.A. Lower, *Otto Stern (1888-1969): The founding father of experimental atomic physics*, *Ann. Phys.* **2011**, 523, 1045-1070.
- [16] W. Gerlach, O. Stern, *Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld*, *Z. Phys.* **1922**, 9, 349-352.
- [17] W. Gerlach, O. Stern, *Das magnetische Moment des Silberatoms*, *Z. Phys.* **1922**, 9, 353-355.
- [18] A. Einstein, P. Ehrenfest, *Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach*, *Z. Phys.* **1922**, 11, 31-34.
- [19] Entrevista a Immanuel Estermann por John L. Heilbron el 13 de diciembre de 1962, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4593.

PREMIOS RSEQ

Francesc Illas, MEDALLA de Oro RSEQ 2022



Dr. Francesc Illas

Francesc Illas (1954) realizó sus estudios de grado y tesis doctoral en Química en la Universidad de Barcelona en la que es Catedrático de Química Física desde 1992. Durante su carrera pasó varias temporadas en diferentes centros de investigación (*IBM Almaden Research Center* y *Los Alamos National Laboratory*, ambos en EE. UU.) y ha sido profesor invitado en la *Università della Calabria* (Cosenza, Italia) y la *Université Pierre et Marie Curie* (París, Francia). Recibió la Mención de Profesor Distinguido para el Fomento de la Investigación Universitaria de la *Generalitat de Catalunya* en 2001, el Premio Bruker de Investigación en Química Física de la Real Sociedad Española de Química en 2004, el Premio ICREA Academia en el 2009 para el periodo 2010-2014 y nuevamente en 2015 para el periodo 2016-2020. En 2009 fue elegido Miembro de la Academia Europea de Ciencias en y en 2017 de la Academia Europea. Desde 2012 es miembro del consejo editorial de las revistas *Surface Science* y *Theoretical Chemistry Accounts*. A lo largo de su carrera ha contribuido como coautor a más de 650 artículos científicos en revistas internacionales, fundamentalmente en problemas relacionados con ciencia de materiales computacional y estudio de mecanismos en catálisis heterogénea, a menudo en colaboración con grupos experimentales nacionales o internacionales. Sus trabajos han sido citados alrededor de 25.000 veces según *Web of Science*, su índice *h* es 76. Durante los años 2007 a 2018 fue director del Instituto de Química Teórica y Computacional de la Universidad de Barcelona (IQTCUB) que a su vez recibió la Mención de Unidad de Excelencia María de Maeztu en la convocatoria de 2017.

 [0000-0003-2104-6123](https://orcid.org/0000-0003-2104-6123)

Premios de Reconocimiento a una Carrera Distinguida de la RSEQ, 2022



Dr. Francisco Lloret Pastor

Francesc Lloret Pastor es Catedrático de Química Inorgánica en la Universidad de Valencia desde el año 2000. Finalizada su licenciatura (1977) y doctorado (1982) ejerció como profesor en varias instituciones universitarias y finalmente en el Instituto de Investigación de Ciencia Molecular (ICMol) de la Universidad de Valencia, donde sigue en la actualidad.

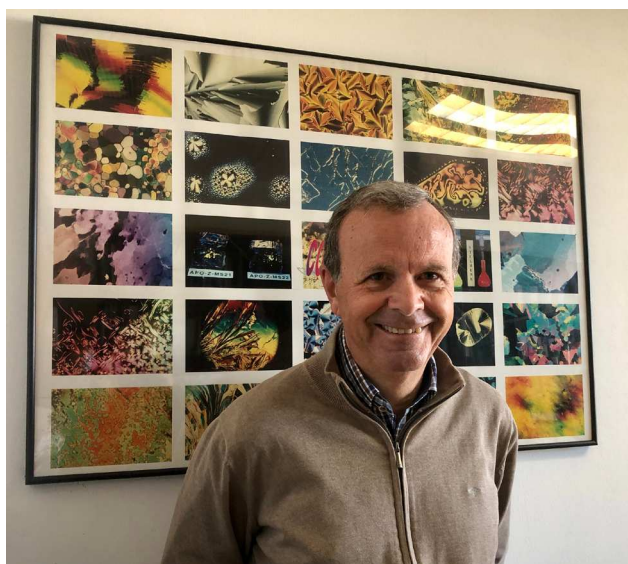
Tras su estancia postdoctoral con el Prof. Olivier Kahn en la Universidad de Paris-Sud (Orsay, Francia, 1985-1987) regresó al Departamento de Química Inorgánica de la Universidad de Valencia como Profesor Titular de Universidad, Comenzó su carrera científica independiente con el desarrollo de un enfoque sintético racional para el diseño y síntesis de materiales magnéticos multifuncionales moleculares basados en la química de coordinación.

Su trabajo representa un capítulo importante en la Química de la Coordinación, además de su papel clave en la fundación de lo que hoy se conoce como Magnetismo Molecular. Cabe señalar que su grupo de investigación ha desarrollado la química de coordinación de los oxamato- y oxamidatocomplejos de metales de transición, así como la química de coordinación de los cianocomplejos durante los últimos 35 años. Estos sistemas proporcionaron los primeros ejemplos de imanes de base molecular (moléculas imán) así como las primeras cadenas imán y el diseño racional de Polímeros de Coordinación Porosos Magnéticos. Más recientemente, está desarrollando imanes quirales, imanes porosos,

sistemas fotomagnéticos e interruptores redox, entre otros, basados en moléculas multifuncionales

El Dr. Lloret tiene 700 artículos en revistas científicas de alto prestigio con más de 30.000 citas bibliográficas, con un Índice de Hirsch, $h = 84$. Ha sido reconocido con premios y distinciones de investigación nacionales e internacionales, como el Premio Nacional de Investigación en Química Inorgánica de la RSEQ (2005) o el Premio Catalan-Sabatier (2018) de la Sociedad Francesa de Química tras una intensa relación con grupos de ese país. Además, es Doctor Honoris Causa (2014) por la Universidad de Bucarest y desde 2014 miembro de la Academia Europea.

 [0000-0003-2959-0879](https://orcid.org/0000-0003-2959-0879)



Dr. José Luis Serrano Ostáriz

José Luis Serrano realizó su licenciatura y doctorado en la Universidad de Zaragoza y obtuvo la cátedra de Química Orgánica en esta Universidad en 1996. Desde 1984 es el líder del grupo de investigación "Cristales Líquidos y Polímeros" (CLIP). Este grupo ha conseguido reconocimiento nacional e internacional al desarrollar varias líneas de investigación pioneras en el área de Cristales Líquidos (CL): CL Ferroeléctricos y Antiferroeléctricos, Compuestos Metalomésógenos, Polímeros CL Fotosensibles, Complejos Supramoleculares CL, CL Funcionales y más recientemente trabajando en Materiales dendrímeros nanoestructurados para aplicaciones biomédicas. Es autor de más de 400 artículos científicos (más de 11000 citas), seis patentes (5 internacionales y 1 nacional) y 8 conferencias plenarios y 36 ponencias invitadas en congresos. Sus premios incluyen el Premio "Aragón Investiga" en 2006, el "Ben Sturgeon Lectureship" en 2010 (British LC Society), la Medalla Freedericksz en 2017 (Russian LCS) y el Premio Alfred Saupe en 2022 (German LCS).

 [0000-0001-9866-6633](https://orcid.org/0000-0001-9866-6633)

PREMIOS A LA EXCELENCIA INVESTIGADORA



Dra. Aitziber López Cortajarena

La Dra. Aitziber L. Cortajarena es Profesora de Investigación de Ikerbasque y dirige el Laboratorio de Nanotecnología Biomolecular en el CIC biomaGUNE, donde fue vicedirectora Científica en 2021 y donde actualmente es directora científica.

La Dra. Cortajarena se doctoró en Bioquímica por la Universidad del País Vasco (2002) trabajando con la Dra. Helena Ostolaza y el Dr. Félix M. Goñi. Posteriormente, trabajó como becaria postdoctoral y como investigadora asociada en el diseño de proteínas en el grupo de la Dra. Lynne Regan en la Universidad de Yale (EE.UU.). En 2010 se incorporó a IMDEA Nanociencia y comenzó su investigación independiente en nanobiotecnología. En 2016, se incorporó al CIC biomaGUNE como Profesora de Investigación Ikerbasque.

Ha publicado más de 100 artículos en revistas reconocidas internacionalmente, que han sido citados más de 2.700 veces, 6 revisiones invitadas, 2 libros editados, y tiene 5 patentes concedidas. Ha presentado su trabajo en más de 40 conferencias reconocidas internacionalmente. Su trabajo ha sido reconocido con el Premio Horizon de la Royal Society of Chemistry y el Premio a la Trayectoria de las Mujeres en la Ciencia de Ikerbasque (Fundación Vasca para la Ciencia). Ha sido editora asociada de ACS Applied Biomaterials, ACS Publications, y actualmente es editora senior en Protein Science (Wiley). Es secretaria del grupo de Biología Química de la RSEQ, vicepresidenta de la Sociedad Española de Biofísica y miembro del Consejo de la Sociedad Internacional de Proteínas.

Cortajarena ha obtenido numerosos proyectos europeos, incluyendo una ERC Consolidator Grant (ProNANO), dos ERC-Proof of concept, un ERA-CoBioTech (coordinador), cuatro proyectos FET-Open, uno coordinado (e-Prot, ARTIBLED, FairyLights, DeDNAed), y un proyecto EIC-Pathfinder (iSenseDNA), que cubren desde el desarrollo fundamental de herramientas basadas en proteínas hasta la validación de tecnologías basadas en biomoléculas en aplicaciones biomédicas y tecnológicas.

La profesora Cortajarena posee de una sólida reputación en el campo de la ingeniería de proteínas, con contribuciones clave al diseño y desarrollo de híbridos basados en proteínas con arquitecturas y funcionalidades definidas para aplicaciones en tecnología y biomedicina. [ID 0000-0002-5331-114X](#)

de la Química Reticular, en aspectos que abarcan desde su diseño/caracterización hasta su aplicación y valorización ha sido reconocido con diferentes premios, becas españolas/europeas, charlas invitadas, atracción/supervisión de científicos. [ID 0000-0003-3203-0047](#)



Dr. Carlos Martí Gastaldo

Carlos Martí-Gastaldo se formó inicialmente en Química de Coordinación y Magnetismo Molecular en el ICMol-Universidad de Valencia (doctorado 2009) bajo la supervisión de los Prof. Eugenio Coronado y José R. Galán-Mascarós, antes de cambiar de foco de investigación para aplicar su formación al diseño de Redes Metal-Orgánicas durante su etapa postdoctoral como Marie Curie Fellow en el grupo del Prof. M. J. Rosseinsky en la Universidad de Liverpool (2010-2012). En 2013 comenzó su carrera independiente en Liverpool, con la concesión de una University Research Fellowship de la Royal Society. En 2014 regresó al ICMol como Ramón y Cajal para liderar el diseño de MOFs de alta estabilidad, una de las líneas estratégicas de investigación del I Programa de Excelencia 'María de Maeztu' concedido al centro. Con la concesión de una ERC Starting Grant en 2016, estableció su propio grupo de investigación en el ICMol. El Funcional Inorganic Materials team (FuniMat) está centrado en el diseño y procesado de materiales inorgánicos porosos para aplicaciones biológicas y relacionadas con el medio ambiente. Para acelerar la transferencia de los resultados de la investigación a productos y servicios socialmente útiles, también ha liderado la creación de dos empresas de base tecnológica, 'Porous Materials for Advanced Applications' (2018) y 'Porous Materials in Action' (2021). Acaba de obtener una ERC Consolidator Grant y es actualmente uno de los investigadores garantes del 2º programa de Excelencia 'María de Maeztu' del ICMol, donde coordina la creación de una nueva línea de investigación para el Diseño Molecular de Biomateriales en el centro.

Desde el comienzo de su carrera independiente, Carlos se ha desarrollado como uno de los químicos moleculares más visibles de su generación y sus aportaciones al campo



Dr. Iván Mora Seró

Iván Mora Seró (1974, Licenciado Física 1997, Doctor 2004) es Catedrático de la Universitat Jaume I de Castelló (España). Su investigación durante el doctorado en la Universitat de València se centró en el crecimiento cristalino de semiconductores II-VI con gap estrecho, creando el primer laboratorio en España dedicado a la investigación con la técnica de crecimiento epitaxial MOCVD (MetalOrganic Chemical Vapour Deposition). En febrero de 2002 se incorporó al Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos y Optoelectrónicos de la Universidad Jaume I (UJI). En 2006 inició su propia línea de investigación sobre células solares sensibilizadas con puntos cuánticos. Actualmente dirige el Grupo de Semiconductores Avanzados del Instituto de Materiales Avanzados (INAM) de la UJI. Ha publicado más de 240 artículos en revistas de investigación internacionales y 4 capítulos de libros. Ha participado en más de 30 proyectos de investigación financiados tanto por entidades públicas (Universidad Jaume I, Comunidad Valenciana, Gobierno español y Unión Europea) como por entidades privadas (Bancaja, IMRA). Ha sido IP en 11 proyectos incluyendo 2 de H2020 y 2 del 7º Programa Marco de la Unión Europea. Tiene más de 100 contribuciones (más de 40 como ponente invitado) en conferencias internacionales. Es inventor de 1 patente y ha recibido el "Premio Idea" (2011), concedido por la Generalitat Valenciana, el "Premio de Investigación" de la UJI (2019), el Premio de Ciencia de Radio Castelló SER (2020). Ha sido becado por el Instituto de Ciencia Weizmann (Israel) en el año 2016.

Ha realizado estancias de investigación en laboratorios de Francia, EE. UU., Alemania, Grecia, Israel, Japón, Singapur y Malasia. Iván Mora-Seró ha sido incluido en la lista de Clarivate Web of Science de 2016 a 2021 de Highly Cited Researchers en el área de Química. El Dr. Seró es actualmente IP de un proyecto ERC Consolidator. Su investigación se centra en la interacción de materiales con la luz, tanto en su síntesis y propiedades, como en el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos (células solares y LEDs) y sistemas fotocatalíticos. [ID 0000-0003-2508-0994](#)

rios contratos con empresas y fundaciones privadas. Colabora activamente con diferentes fundaciones en la divulgación de la ciencia y para la motivación a jóvenes en la ciencia (FCRI, Fund. Catalunya-La Pedrera y FPDGi) y ha impartido conferencias sobre liderazgo a directivos de empresa y a investigadores. [ID 0000-0001-9713-9997](#)

PREMIO JOVEN INVESTIGADOR – MODALIDAD “Líder de Grupo”



Dr. Samuel Sánchez Ordóñez

Samuel Sánchez es Profesor ICREA y jefe de grupo y subdirector en el Instituto de Bioingeniería de Cataluña (Barcelona). Actualmente es Profesor honorario en HIT en Harbin, China y Profesor Adjunto en POTECH, Corea del Sur. Anteriormente fue jefe de grupo en el Max Planck Institute for Intelligent Systems, Stuttgart (2013-2018) y en el Institute for Integrative Nanosciences, IFW Dresden (2010-2013), ambos en Alemania; fue investigador independiente -tenure-track- de MANA-ICYS, en el National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japón (2009-2010). Se doctoró en Química por la UAB en 2008.

El Dr. Sánchez ha recibido varios premios por sus trabajos pioneros en nanorobots. Entre otros: el Récord Guinness® en 2010 y 2017 por el microjet más pequeño del mundo, MIT Innovators U35 como el “Innovador del año 2015 en España menor de 35”. Recibió el Premio “Investigación científica 2015” de la Fundación Princesa de Girona y el Premio “Joven Relevante 2016” por El Círculo Ecuestre de Barcelona patrocinado por Google e IESE Business School, entre otros. Ha sido Premi Nacional Talent Jove por la Fundació Catalana de la Recerca i Investigació y la Generalitat de Catalunya en 2016. Y es académico de número de la academia Joven de España desde 2020. Ha sido receptor de las ERC Starting Grant en 2012, dos ERC Proof-of-Concept en 2016 y 2018 y recientemente con la ERC-Consolidator Grant por el European Research Council.

Ha publicado más de 150 artículos y ha presentado unas 130 conferencias científicas invitadas. Tiene 7 patentes y va-



César de la Fuente, en una imagen tomada con motivo de la concesión del premio Princesa de Girona el pasado año, 2021. Martí E. Berenguer (© Martí E. Berenguer)

César de la Fuente es Presidential Assistant Professor en la Universidad de Pensilvania, donde dirige el Grupo de Biología Artificial, cuyo objetivo es combinar el poder de las máquinas y la Biología para ayudar a prevenir, detectar y tratar las enfermedades infecciosas. Ha desarrollado el primer antibiótico diseñado por un ordenador con eficacia en animales, diseñado algoritmos para el descubrimiento de antibióticos, reprogramado venenos para convertirlos en antimicrobianos, creado nuevos materiales antimicrobianos a prueba de resistencias e inventado diagnósticos rápidos de bajo coste para la COVID-19 y otras infecciones. De la Fuente es un investigador MIRA NIH y ha recibido el reconocimiento y la financiación de la investigación de otros numerosos grupos. El profesor de la Fuente ha recibido más de 50 premios. Fue reconocido por MIT Technology Review como uno de los principales innovadores del mundo por “digitalizar la evolución para hacer mejores antibióticos”.

Fue seleccionado como el receptor inaugural del Premio Langer, un Líder Emergente en Química Kavli de la ACS, y recibió el Premio 35 Under 35 de la AIChE y el Premio al Investigador Joven de Enfermedades Infecciosas de la ACS. En 2021, recibió el Premio Thermo Fisher y el premio EMBS Aca-

demio Early Career Achievement "Por el desarrollo pionero de nuevos antibióticos diseñados utilizando principios de la computación, la ingeniería y la biología." Más recientemente, el Prof. de la Fuente fue galardonado con el prestigioso Premio Princesa de Girona a la Investigación Científica, el Premio ASM a la Investigación Aplicada y Biotecnológica de Carrera Temprana y fue nombrado Investigador Altamente Citado por Clarivate. El profesor de la Fuente ha impartido más de 150 conferencias invitadas y sus descubrimientos científicos han dado lugar a un centenar de publicaciones, entre ellas artículos en *Nature Biomedical Engineering*, *Nature Communications*, *PNAS*, *ACS Nano*, *Cell*, *Nature Chemical Biology*, *Advanced Materials*, y varias patentes.


 [0000-0002-2005-5629](https://orcid.org/0000-0002-2005-5629)



Dr. Max García Melchor

El Dr. Max García-Melchor es Ussher Assistant Professor in Chemical Energy Systems en el Departamento de Química de Trinity College Dublin (Irlanda) e investigador principal del centro de investigación Advanced Materials and Bioengineering Research (AMBER). Max obtuvo su doctorado en Química en la Universidad Autónoma de Barcelona en 2012, y posteriormente trabajó como investigador postdoctoral en el Instituto de Investigación Química de Cataluña (ICIQ) y en la Universidad de Stanford.

Desde 2016, Max dirige el Grupo de Catálisis Computacional y Materiales Energéticos (CCEM), centrado en utilizar métodos computacionales avanzados e inteligencia artificial para acelerar el descubrimiento de materiales para la producción sostenible de productos químicos y combustibles. Su investigación ha contribuido a importantes avances en este campo, como la elucidación de mecanismos de reacción en procesos de acoplamiento C–C, el desarrollo de modelos de machine learning para predecir la actividad de catalizadores moleculares para la oxidación del agua, así como el diseño de algunos de los electrocatalizadores más activos conocidos hasta la fecha para este proceso en medio básico.

Su trabajo ha sido reconocido con varios premios internacionales (Medalla Roger Parsons de la RSC, Premio Joven Investigador de la RSEQ/GEQO) y sus artículos se han destacado en numerosas portadas de revistas científicas y medios de comunicación internacionales. Max es miembro del Consejo Editorial de varias revistas científicas internacionales, representante irlandés en la Federación Europea de Sociedades de Catálisis (EFCATS), y director del Máster en Ciencias de la Energía de Trinity College Dublin. Recientemente, también ha sido reconocido con la distinción de Fellow de Trinity College Dublin.  [0000-0003-1348-4692](https://orcid.org/0000-0003-1348-4692)




Dra. Beatriz Pelaz García

La Dra. Beatriz Pelaz se licenció en Química por la Universidad de Valladolid (2005) y en Bioquímica por la Universidad de Zaragoza (2011). Tras su licenciatura en Química, realizó un Máster en Química Organometálica experimental de la Universidad de Valladolid. En marzo de 2012, obtuvo el título de doctora europea por la Universidad de Zaragoza.


De 2012 a 2016, desarrolló su investigación en el grupo del Prof. Wolfgang Parak en la Universidad Phillips de Marburgo (Alemania), primero como investigadora postdoctoral y desde 2013, como becaria Humboldt. Actualmente es becaria del ERC-StG, investigadora Ramón y Cajal e investigadora principal en el CiQUS (Universidad de Santiago de Compostela). Desde 2017, codirige el grupo BioNanoTools en el CiQUS donde lleva a cabo su investigación sobre el desarrollo de materiales inteligentes controlados a distancia, y el estudio de su interacción con entidades vivas.

Su investigación es altamente multidisciplinar, y su experiencia va desde la síntesis de nanomateriales y su modificación superficial, incluyendo un control fino sobre el número de ligandos utilizados hasta la evaluación de su comportamiento en sistemas biológicos para relacionarlo con sus propiedades fisicoquímicas y su aplicación como nanotransportadores inteligentes para realizar una actividad en sistemas biológicos.

Beatriz Pelaz tiene 90 publicaciones, incluyendo 9 capítulos de libros. Ha participado en 30 proyectos nacionales y europeos. Ha recibido una beca ERC-Starting (SPACING); y actualmente es IP de dos proyectos H2020 (H2020-FET-OPEN (SWIMMOT), H2020-ICT (REAP)). Ha presentado sus resultados científicos en más de 20 presentaciones orales, la mayoría de ellas como ponente invitada.  [0000-0002-4626-4576](https://orcid.org/0000-0002-4626-4576)



Dr. Albert Rimola Gibert

El Dr. Albert Rimola (1980) es licenciado en Química por la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB, 2002) y se doctoró en Química Teórica y Computacional (UAB, 2007) bajo la supervisión de la Prof. M. Sodupe y el Dr. L. Rodríguez-Santiago. Realizó una estancia posdoctoral en el grupo de Química Computacional y Gráfica Molecular liderado por el Prof. P. Ugliengo (Univ. Turín 2007-2009), y volvió a la UAB concatenando distintos contratos postdoctorales que le han servido para desarrollar sus líneas de investigación, consiguiendo financiación de fondos públicos. Actualmente es Investigador Ramón y Cajal de último año. Su investigación se centra en simular procesos relacionados con la evolución química primordial (Astroquímica y Química Prebiótica), y en particular aquellos en los que superficies sólidas juegan un papel relevante, mediante métodos precisos de la química cuántica y técnicas de modelización molecular y de superficies. En el 2019, el Dr. A. Rimola consiguió una ayuda ERC Consolidator Grant (panel PE9, Universe Sciences), que tiene por objetivo desvelar el papel de los granos de polvo interestelar en la química del cosmos utilizando la Química Computacional como herramienta central.  [0000-0002-9637-4554](https://orcid.org/0000-0002-9637-4554)

PREMIO JOVEN INVESTIGADOR – MODALIDAD “Investigador Postdoctoral”

Joaquín Calbo (Alcoy, 1988), se licenció en Química en el 2011 por la Universitat de València (UV) con Premio Extraordinario. Realizó el máster de Química Teórica y Modelización Computacional (TCCM) bajo la supervisión del Prof. Enrique Ortí (ICMol, UV) incluyendo una estancia en la Università degli Studi di Perugia junto al profesor Filippo de Angelis enfocada a la caracterización teórica de colorantes orgánicos para celdas solares de tipo DSSC. Posteriormente, inició su doctorado en el estudio computacional de materiales electroactivos bajo la dirección de E. Ortí, gracias a una beca FPU, con una estancia en la Université Pierre et Marie Curie (París) con la investigadora Julia Contreras en el CNRS en el desarrollo de fotointerruptores orgánicos de tipo azo.



Dr. Joaquín Calbo Roig

En 2017 defendió su tesis, por la que obtuvo el Premio Extraordinario de Doctorado en Química (2018) y otros reconocimientos como el primer accésit en los Premios NANOMATMOL a la mejor tesis doctoral presentada en 2017, o una mención honorífica en el XIII Premi d'Investigació Científicotècnica “Ciutat d'Algemesi” 2018.

Su investigación postdoctoral se desarrolló en materiales porosos electroactivos bajo la tutela del Prof. Aron Walsh en el Imperial College de Londres. Desde septiembre de 2019, ocupa una plaza de profesor ayudante doctor en el departamento de Química Física de la UV, donde desarrolla tareas docentes, y es investigador en el grupo de Química Teórica de Materiales Moleculares del Instituto de Ciencia Molecular (Unidad de excelencia María de Maeztu).


El Prof. Calbo cuenta con más de 70 publicaciones científicas, incluyendo varios capítulos de libro, y acumula más de 1500 citas con un índice h de 25. Además, es investigador principal de varios proyectos nacionales y regionales enfocados al diseño de materiales porosos de nueva generación

para almacenamiento y conversión energética. Joaquín, además, colabora en actividades de divulgación científica como EXPOCIENCIA.  [0000-0003-4729-0757](https://orcid.org/0000-0003-4729-0757)



Dr. Albert Cortijos Aragonès


El Dr. Aragonès completó su máster en Nanociencia en 2012 (Universitat de Barcelona, UB) y recibió su doctorado en Electrónica Molecular (2017) en la misma universidad bajo la supervisión del Prof. F. Sanz. Tras su doctorado, se trasladó, como investigador postdoctoral, al Grupo del Dr. Díez-Pérez en el King's College de Londres (Reino Unido) para ampliar sus conocimientos en electrónica molecular hacia una faceta biomolecular. Tras recibir una beca postdoctoral Marie Skłodowska-Curie (2019) se trasladó al Grupo de Espectroscopia Molecular del Prof. Bonn en el Instituto Max Planck (MPIP, Alemania) bajo la supervisión de la Dra. Domke. Su investigación principal se centra en los fenómenos de transporte de carga a escala molecular y en la detección unimolecular bajo campos de fuerza. En la actualidad sus intereses de investigación se basan en acoplar plataformas de electrónica molecular con la captura plasmónica de campo cercano.

El Dr. Aragonès ha sido recientemente galardonado con una beca de la "Fundació la Caixa" Junior Leader 2022 Incoming y actualmente es el jefe de un grupo asociado al Instituto Max Planck en el Departamento de Ciencia de los Materiales y Química Física de la UB y en el Instituto de Química Teórica y Computacional de la misma UB.  [0000-0002-1829-6941](https://orcid.org/0000-0002-1829-6941)

El Dr. Ignacio Funes-Ardoiz (Tudela, Navarra) se licenció en Química en el año 2012 en la Universidad de La Rioja y posteriormente realizó el Máster y el doctorado en el grupo del profesor Feliu Maseras en el Instituto Catalán de Investigación Química (ICIQ), con el contrato Severo Ochoa, siendo reconocido con el Premio extraordinario y el Premio Josep Castells de la sección catalana de la RSEQ. Tras obtener su doctorado en 2017, obtuvo una beca de la fundación Alexander von Humboldt para realizar su estancia postdoctoral de dos años en la universidad RWTH Aachen, bajo la dirección



Dr. Ignacio Funes-Ardoiz

de la profesora Franziska Schoenebeck. En 2020, regresó a la Universidad de La Rioja como investigador postdoctoral y en 2022 obtuvo el contrato Juan de la Cierva-Incorporación para continuar con su investigación en la Rioja. Su investigación se centra en el uso de la química computacional para comprender y mejorar diferentes procesos (foto)catalíticos, así como la aplicación del aprendizaje automático (*machine learning*) a los procesos químicos. Además, siempre ha tenido una gran implicación en la divulgación científica, habiendo obtenido diferentes reconocimientos. Entre sus pasiones, destaca la cocina y la música.  [0000-0002-5843-9660](https://orcid.org/0000-0002-5843-9660)



Dra. Sara Rojas Macías

Sara Rojas se doctoró en Química por la UGR en 2014 bajo la supervisión de los catedráticos J. A. R. Navarro y E. Barea, desarrollando nuevos materiales porosos (o MOFs, del inglés Metal-Organic Frameworks) para la liberación controlada de fármacos. Posteriormente, obtuvo la prestigiosa beca Marie Sklodowska-Curie Individual Fellowships para incorporarse como investigadora al *Centre National de la Recherche Scientifique* (Francia). Durante este periodo, estudió de forma pionera el uso de MOFs biocompatibles para el tratamiento de intoxicaciones medicamentosas. En 2018, se incorporó a la Unidad de Materiales Porosos del Instituto IMDEA Energía (Madrid) dirigida por la Dra. P. Horcajada, donde inició una nueva línea de investigación en la síntesis de nuevos MOFs (foto)catalíticos y su aplicación en la remediación ambiental. En 2021, la Dra. Rojas se incorporó al grupo de investigación Bioquímica y Electrónica como Tecnologías de Sensores dirigido por el profesor A. Rodríguez Diéguez en la UGR gracias a la obtención de la beca Juan de la Cierva. Actualmente, la Dra. Rojas está aplicando su experiencia en el diseño y síntesis de nuevos materiales tipo MOF para su implementación en sensores con aplicabilidad en biomedicina, medio ambiente y energía. La Dr. Rojas es coautora de 36 artículos científicos publicados en revistas de alto impacto, 2 patentes, 2 capítulos de libro y coeditora del libro "MOFs in the biomedical and environmental field". Sara ha participado en 8 proyectos nacionales y 3 internacionales relacionados con la síntesis/caracterización de MOFs y sus aplicaciones, actuando como investigadora principal en 4 de ellos. Además, de supervisar a estudiantes en diferentes fases, participa constantemente en diferentes eventos para la divulgación científica. [id 0000-0001-6104-7062](https://orcid.org/0000-0001-6104-7062)

PREMIO A LA TAREA EDUCATIVA

Luis Moreno Martínez (Madrid, 1989) se licenció en Ciencias Químicas por la Universidad Complutense de Madrid, donde también obtuvo el título de Máster en Formación del Profesorado de ESO y Bachillerato. Posteriormente cursó los estudios de Experto en Divulgación y Cultura Científica de la Universidad de Oviedo y el Máster Interuniversitario en Historia de la Ciencia y Comunicación Científica de las Universidades de Alicante, Miguel Hernández y Valencia. Es doctor en Didáctica de las Ciencias por la Universidad Autónoma de Madrid, y doctor en Historia de la Ciencia por la Universitat de València. Cursó su formación postdoctoral en el Departamento de Investigaciones Educativas de Ciudad de México. Durante sus años de formación contó con diferentes becas y reconocimientos, como la Beca de la Fundación Juanelo



Dr. Luis Moreno Martínez

Turriano o la Beca de Excelencia Postdoctoral del Gobierno de México. Tras ejercer la docencia en la Universitat de València, donde impartió Historia de la Química y otras materias de historia de la ciencia, obtuvo plaza como profesor de Enseñanza Secundaria de la Comunidad de Madrid en la especialidad de Física y Química. Actualmente ejerce la docencia en el CEIPS Vicente Aleixandre, donde también es jefe del Departamento de Física y Química. En conexión con su labor docente, trata de contribuir a la investigación educativa y a la divulgación de la ciencia. Así, es autor de varias decenas de trabajos académicos sobre didáctica e Historia de la Física y la Química publicados en revistas nacionales e internacionales. También ha impartido múltiples conferencias en congresos y jornadas nacionales e internacionales. Sus principales temas de investigación educativa incluyen los usos didácticos de la historia de la ciencia, el análisis del currículo y los libros de texto de Física y Química de ESO y Bachillerato, el diseño y análisis de estrategias de enseñanza-aprendizaje de la Física y la Química y los estudios históricos sobre ciencia en las aulas. Ha comisionado diversas exposiciones museísticas, ha sido miembro del comité científico y organizador de diversos congresos y simposios y ha formado parte del jurado de diversos premios científico-educativos. Entusiasta del valor cultural de la ciencia, ha participado en un gran número de iniciativas de divulgación científica. En la actualidad es vicepresidente segundo del Grupo de Didáctica e Historia de la RSEF y la RSEQ, además de representante adjunto de España en la Chemistry Education Division de EuChemS. [id 0000-0002-4540-5752](https://orcid.org/0000-0002-4540-5752)

Premios internacionales

Dr. Artur Ciesielski Premio Catalán-Sabatier 2022 (Francia)




Dr. Artur Ciesielski

Artur Ciesielski obtuvo su título de Máster en 2007 en la Universidad Adam Mickiewicz (Poznan). En 2010 se doctoró Cum Laude en la Universidad de Estrasburgo bajo la dirección del Profesor Paolo Samorì. Posteriormente continuó como becario posdoctoral en el mismo grupo de investigación y en 2016 fue contratado como investigador en el Instituto de Ciencia e Ingeniería Supramolecular (ISIS) y el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS). Desde 2018 es profesor visitante en el Centro de Tecnología Avanzada de Poznan (CZT).

Ha sido galardonado en 2015 y en 2019, con el prestigioso Premio "Polacos excepcionales en Francia". Desde 2021 es miembro de la junta directiva de la Academia Joven de Europa.

Su actividad investigadora incluye el uso de la Química Supramolecular como herramienta para modular las propiedades fisicoquímicas de nanomateriales (nanopartículas o materiales bidimensionales) a través de su interacción controlada con moléculas orgánicas funcionales, dotando así a los nanomateriales de un carácter multifuncional, incluyendo la capacidad de reconocimiento de analitos para su detección, una alta porosidad para la purificación del agua y nuevas propiedades ópticas para la generación de nuevos dispositivos optoelectrónicos. Los nanomateriales híbridos que ha producido han demostrado ser importantes no sólo desde un punto de vista puramente científico, sino sobre todo para aplicaciones prácticas (vigilancia de la salud o los sensores ambientales) y en el almacenamiento y la conversión

de energía. Durante los últimos 10 años, su investigación fundamental e interdisciplinaria ha demostrado ser de gran interés en áreas aplicables y potencialmente escalables como la detección física y química y, más generalmente, en la ciencia de los materiales y la nanotecnología.

El Prof. Ciesielski ha publicado más de 100 artículos en revistas reconocidas internacionalmente (Nature Chem, Nature Commun, ACS Nano, Angew. Chem. Int. Ed., J. Am. Chem. Soc., Adv. Mat. Adv. Funct. Mater). Posee más de 4100 citas, índice h = 34. Ha impartido más de 25 conferencias invitadas/plenarias en congresos internacionales, más de 40 seminarios invitados en instituciones públicas y privadas.  [0000-0003-3542-4092](https://orcid.org/0000-0003-3542-4092)

Premio Elhuyar-Goldsmith 2022 (Alemania)



Prof. Peter H. Seeberger

Peter H. Seeberger (1966) estudió química en la Universidad de Erlangen-Nuremberg (Alemania) y se doctoró en bioquímica en Boulder (Estados Unidos). Tras investigar en el Sloan-Kettering Cancer Center Research de Nueva York, creó un programa de investigación independiente en el MIT. Tras seis años como profesor en la Escuela Politécnica Federal (ETH) de Zúrich, asumió el cargo de director en el Instituto Max Planck de Coloides e Interfaces de Potsdam y de profesor en la Universidad Libre de Berlín en 2009. Además, es profesor honorario de la Universidad de Potsdam.

La investigación del profesor Seeberger sobre la Química y Biología de los hidratos de carbono, el desarrollo de vacunas con hidratos de carbono y la síntesis de flujo continuo de sustancias farmacológicas abarca una amplia gama de temas, desde la ingeniería hasta la inmunología. El Prof Seeberger posee más de 550 artículos de revistas revisadas por pares, cuatro libros, más de 50 patentes y más de 850 conferencias invitadas. La investigación del laboratorio

de Seeberger ha dado lugar a varias empresas en Estados Unidos, Suiza y Alemania.

Su trabajo ha sido reconocido con más de 35 premios internacionales como, por ejemplo: Arthur C. Cope Young Scholar Award, Horace B. Isbell Award, Claude S. Hudson Award de la American Chemical Society, Premio Científico Stifterverband 2017, Premio Körber para las Ciencias Europeas, Medalla Havinga (Holanda), Miembro Honorario Vitalicio de la Sociedad Química de Israel, Medalla de Oro Yoshimasa Hirata, Premio Whistler 2012, Int. Carboh. Soc. En 2013 fue elegido miembro de la Academia de Ciencias de Berlín-Brandeburgo.

Peter H. Seeberger apoya en gran medida la idea de la publicación de acceso abierto como redactor jefe de la revista Beilstein Journal of Organic Chemistry.

Gracias a su trabajo en el ámbito de las enfermedades olvidadas, Peter Seeberger se ha implicado en causas filantrópicas. Es cofundador de la Fundación Tesfa-Ilg "Esperanza para África", cuyo objetivo es mejorar la atención sanitaria en Etiopía [id 0000-0003-3394-8466](https://orcid.org/0000-0003-3394-8466)

La Dra. Marcella Bonchio, Premio González-Ciamician 2022 (Italia)



Prof. Marcella Bonchio

Marcella Bonchio es Profesora titular de Química en el Departamento de Ciencias Químicas de la Universidad de Padua, directora delegada del Instituto CNR de Tecnología de Membranas en Padua y líder científica del grupo NanoMolCat (<https://nanomolcat.wixsite.com/nanomolcat>).

La Prof. Bonchio obtuvo su doctorado en Ciencias Químicas en 1993, en el grupo de investigación de Giorgio Modena y Fulvio Di Furia. Durante su carrera científica ha realizado

estancias en los laboratorios estadounidenses de la Universidad de Brown, la Universidad de Princeton y de la empresa General Electric. Desde 2015 es Vicerrectora de Investigación de la Universidad de Padua. Ha recibido el Premio de la Sociedad Química Italiana a la Innovación en Investigación y el premio Lombardia è Ricerca 2021.

En 2020 fue nombrada miembro de la Academia Europea de Ciencias (EURASC). Su investigación se centra en el diseño de catalizadores híbridos que poseen clústers nano-inorgánicos con interfaces orgánicas para su aplicación en combustibles solares, materiales inteligentes y fotoprotección. Las publicaciones del Prof. Bonchio incluyen el diseño innovador de sistemas basados en polioxometalatos altamente robustos para la oxidación foto-inducida del agua y el diseño de "cuantosomas" artificiales biomiméticos inspirados en Photosystem II (Nature Chem 2010 y 2019).

Es responsable de varios proyectos financiados en los campos de los nanomateriales funcionales y la fotosíntesis artificial. [id 0000-0002-7445-0296](https://orcid.org/0000-0002-7445-0296)

Entrega Premio Catalán-Sabatier a la Dra. Imberty



Javier Cañada (izq), la Dra. Anne Imberty y Sonsoles Martín

La Dra. Anne Imberty ha recogido el Premio conjunto de la Sociedad Química de Francia y la Real sociedad Española de Química, Catalán-Sabatier 2020, dos años después de su concesión.

La entrega ha tenido lugar durante el *workshop* «FRONTIERS Bottom-up biology: Chemical & Synthetic Biology» del "Máster on Integrative Synthetic Biology" del CSIC-UIMP realizado en el Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas del CSIC (Madrid).

La Dra. Imberty impartió la conferencia titulada "Lectins and lectomes from therapeutical targets to synthetic biology".

Aprovechando la entrega del premio, la galardonada ha visitado Sevilla, Madrid, Barcelona y Bilbao, patrocinado por los Grupos Especializados de Carbohidratos y de Química Biológica. [id 0000-0001-6825-9527](https://orcid.org/0000-0001-6825-9527)

Noticias Grupos especializados

Concesión de los Premios GEQOR 2022

Dr. Juan Carlos Carretero, Medalla Félix Serratosa 2022



Dr. Juan Carlos Carretero

Juan Carlos Carretero González (Madrid, 1960) se licenció en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) en 1982 y realizó la Tesis Doctoral en el Departamento de Química Orgánica de la UAM bajo la dirección del Prof. José Luis García Ruano (1985). Tras una estancia postdoctoral en Bélgica en el grupo del Prof. Léon Ghosez (1985-1988) se reincorporó a la UAM como Profesor Titular (1988) y en el año 2000 obtuvo la plaza de Catedrático. Ha sido Profesor Invitado por la Universidad de Estrasburgo (2008) y director del Departamento de Química Orgánica de la UAM (2010-2014). A lo largo de su trayectoria ha recibido el *Premio a Investigadores Novelas de la RSEQ* (1990), el *Premio de la Fundación General de la UAM* (1993) y el *Premio a la Excelencia Investigadora de la RSEQ* (2010). Es autor de más de 200 artículos científicos y se han presentado 34 Tesis Doctorales.

Desde sus inicios el Dr. Carretero se ha interesado por el desarrollo de métodos en síntesis orgánica, inicialmente en el ámbito de la síntesis estereoselectiva y posteriormente en catálisis asimétrica y química organometálica. En los últimos años su actividad se ha centrado en reacciones al-

tamente selectivas de formación de enlaces C-C y C-X catalizadas por metales de transición, especialmente en las áreas de la cicloadición 1,3-dipolar catalítica asimétrica, reacciones en cascada y procesos de funcionalización C-H.

 [0000-0003-4822-5447](https://orcid.org/0000-0003-4822-5447)


Uwe Pischel, Medalla Ignacio Ribas 2022



Dr. Uwe Pischel

Uwe Pischel (Alemania, 1973) es Catedrático de Química Orgánica en la Universidad de Huelva desde 2019. Entre 1992 y 1998 estudió Química en la Universidad Técnica de Dresde y en la Universidad Humdoldt de Berlín, ambas en Alemania. En 2001 se doctoró en la Universidad de Basilea (Suiza) con trabajos sobre la Fotoquímica Orgánica de azoalcanos bicíclicos fluorescentes. En su etapa postdoctoral trabajó con el Prof. Miguel Ángel Miranda en la Universidad Politécnica de Valencia. En 2003 inició su carrera independiente en la Universidad de Oporto (Portugal) y en 2006 se trasladó, como Contratado Ramón y Cajal, a la Universidad Politécnica de Valencia. En 2007 se incorporó a la Universidad de Huelva, siendo promovido a Profesor Contratado Doctor en 2009 y a Profesor Titular de Universidad en 2016.

Sus trabajos están centrados en los campos de la Fotoquímica y la Química Supramolecular, donde ha publicado cerca de 120 artículos. Ha sido galardonado con el Premio Albert-Weller (2003) de la Sociedad Alemana de Química y con el Premio Grammaticakis-Neumann de la Sociedad Química de Suiza (2013). Actualmente es presidente de la Asociación Europea de Fotoquímica y el representante de la RSEQ en la subdivisión "Química Verde y Sostenible" de la EuChemS.

 [0000-0001-8893-9829](https://orcid.org/0000-0001-8893-9829)

José Alemán, Medalla José Barluenga 2022

José Alemán estudió Química en la Universidad Autónoma de Madrid y defendió su Tesis Doctoral en el año 2006 en el campo de la síntesis asimétrica bajo la dirección del Prof. García Ruano. Tras realizar una estancia posdoctoral con el Prof. Jørgensen (2006-2008) en el campo de la organocatálisis, se incorporó como investigador Ramón y Cajal al departamento de Química Orgánica de la UAM, y posteriormente fue promocionado a Profesor Titular. Su investigación se centra en la catálisis asimétrica y materiales catalíticos, siendo autor de 185 publicaciones científicas. Ha sido galardonado con distintos premios de investigación, con el Premio Lilly al mejor alumno de doctorado (2005), premio a la mejor Tesis Doctoral de la UAM (2006), Premio Sigma-Aldrich a



Dr. José Alemán

jóvenes investigadores de la RSEQ (2013) y Premio Lilly al joven investigador (2015).  [0000-0003-0164-1777](https://orcid.org/0000-0003-0164-1777)



XXVIII REUNIÓN BIENAL GEQOR

Grupo Especializado de Química Orgánica

GRANADA 1 DE JULIO DE 2022

XVIII Escuela Nacional de Materiales Moleculares

Durante la semana del 20 al 24 de marzo de 2022 tuvo lugar en Santiago de Compostela la celebración de la XVIII Escuela Nacional de Materiales Moleculares (**ENMM**), organizada por Diego Peña, Félix Freire, Francisco Rivadulla y María Giménez, investigadores principales del Centro Singular de Investigación en Química Biológica y Materiales Moleculares (CiQUS) de la Universidad de Santiago de Compostela (USC).

La Escuela Nacional de Materiales Moleculares (ENMM) es un foro de aprendizaje e intercambio de ideas en el ámbito de los materiales moleculares funcionales. En este campo se incluyen sistemas moleculares orgánicos, inorgánicos y polímeros con funcionalidades magnética, eléctrica u óptica entre otras. En la escuela se trataron aspectos relacionados con la modelización, preparación, caracterización o utilización en dispositivos de estos materiales.

La **ENMM** se desarrolló en el Hotel Monasterio San Martín Pinario, y durante cinco días han tenido lugar conferencias y seminarios especializados por parte de distintos profesores

e investigadores especialistas en el área, así como comunicaciones orales y presentaciones en panel por parte de los investigadores más jóvenes.

La escuela ha contado con una asistencia media de alrededor de 180 participantes, siendo un éxito de convocatoria que congregó al doble de participantes de los inicialmente previstos. Además del intenso y variado programa científico, la interacción entre los asistentes se ha fomentado en las comidas y cenas que han tenido lugar en la misma sede del congreso, así como en las visitas a los locales nocturnos más representativos de la noche compostelana. Entre las actividades sociales se organizó una visita guiada por la ciudad de Santiago de Compostela que incluyó el acceso a la Catedral recientemente restaurada.

FÉLIX FREIRE, MARÍA GIMÉNEZ, DIEGO PEÑA
y FRANCISCO RIVADULLA
Organizadores de la XVIII ENMM



Figura. Asistentes a la XVIII Escuela Nacional de Materiales Moleculares en Santiago de Compostela

VI Jornada «La Ciencia tiene nombre de Mujer»

La sexta edición de la Jornada «La Ciencia tiene nombre de Mujer», impulsada por la Unidad de Igualdad, el Instituto de Bioingeniería (IB) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH) y el Centro Interdisciplinar de Estudios de Género (CIEG) tuvo lugar el 11 de febrero de 2022 por fin de manera presencial. El rector de la UMH, Juan José Ruiz, fue el encargado de inaugurar este encuentro en el edificio Altabix del campus de Elche, junto a la directora de la Unidad de Igualdad de la Universidad, María José Alarcón, y la directora del Instituto de Bioingeniería de la UMH, Ángela Sastre Santos. Al igual que en ediciones anteriores, la finalidad de esta Jornada es visibilizar a mujeres científicas y sus aportaciones, así como promover que tanto los chicos como las chicas se acerquen a estas disciplinas en un plano de igualdad, sin estereotipos ni papeles asignados.

La conferencia de apertura de la Jornada corrió a cargo de la Profesora María Vallet Regí, (Catedrática de Química Inorgánica de la Universidad Complutense de Madrid, Premio Nacional de Investigación en 2008 y Premio Rei Jaume I de Investigación Básica 2018) quien nos ofreció una magnífica conferencia sobre “Algunas posibilidades para que los medicamentos se dirijan sólo a donde hacen falta”. A continuación, la Dra. Elena Pinilla Cienfuegos (Investigadora distinguida de la Universitat Politècnica de València y del Centro de Tecnología Nanofotónica y vicepresidenta de la Real Sociedad Española de Física nos informó sobre su trayectoria profesional a través de la nanofotónica molecular. Como investigadoras referentes más jóvenes del Instituto de Bioingeniería de la UMH tuvimos el placer de contar con la Dra. Sara Jover Gil (Profesora Contratada Doctora del Área de Genética UMH) y con la Dra. Nathalie Zink Lorre (Profesora Ayudante Doctora del Área de Química Orgánica UMH) que nos contaron su trayectoria investigadora a través de sus conferencias tituladas, “De plantas a nematodos, un viaje de ida y vuelta” y “Una farmacéutica



entre perilenodiimidas”, respectivamente. Por último, la Profa. Maria del Carmen Perea Marco (Profesora Titular del Área de Matemática Aplicada de la UMH y directora del MUDIC-VBS-CV) nos ofreció una charla sobre “Mujeres en la ciencia, la sombra de hombres científicos”.

El acto, al que asistieron más de 100 estudiantes de grado, máster y postgrado, fue clausurado por la Dra. María José López Sánchez. Vicerrectora de Transferencia e Intercambio del Conocimiento de la UM. Una vez más, se ha puesto de manifiesto la investigación de excelencia realizada por mujeres en Química, Física, Matemáticas y Biología que sirven de referentes para el estudiantado.

La jornada ha sido subvencionada por el grupo especializado de nanociencia y materiales moleculares de la RSEQ y de la RSEF.

ÁNGELA SASTRE SANTOS
Catedrática de Química Orgánica UMH
Directora del Instituto de Bioingeniería

© 2022 Real Sociedad Española de Química



De izquierda a derecha.
Mar Maciá, Mar Sanchez, Elena Pinilla, Maricarmen Perea, Ángela Sastre, María Vallet-Regí, M^a José Alarcón, Purificación Heras, Sara Jover, Nathalie Zink, Fernando Fernández, M^a José Pastor

Noticias Socios

Fabio Juliá, Premio Joven Investigador 2022



Dr. Fabio Juliá


El Premio 'Joven Investigador 2022', que anualmente entregan la empresa Lilly y la Real Sociedad Española de Química (RSEQ) ha sido concedido al Dr. Fabio Juliá del ICIQ (Tarragona). Este galardón distingue la excelencia en la calidad científica y en la trayectoria profesional de jóvenes promesas españolas menores de 40 años. El premio se entregará durante la celebración de la XXXVIII Reunión Bial de la Real Sociedad Española de Química (27-30 de junio).

"Es un honor para mí recibir este premio tan prestigioso, en el que han sido galardonados excelentes investigadores. Gracias a él podré establecerme un poco más en el sistema científico español". "Es muy gratificante que se reconozca

mi trabajo, así como el de mis colaboradores y supervisores. Sin duda, supone una motivación muy grande para seguir trabajando en retos aún mayores", ha comentado Fabio Juliá.

María José Lallena, directora de I+D de Lilly España, destaca: "Para continuar avanzando en la ciencia y la investigación de nuestro país, y por tanto mejorar la vida de la sociedad, es necesario que respaldemos y sigamos respaldando este tipo de iniciativas".

Antonio Echavarren, presidente de la RSEQ, subraya la importancia de la colaboración de Lilly en este galardón: "Los jóvenes talentos investigadores de hoy son los grandes químicos españoles del futuro, por ello, nos enorgullece poder fomentar su participación en premios como este y así brindarles toda la ayuda necesaria para dar mayor visibilidad a sus investigaciones y proyectos".

Fabio Juliá (Cieza, 1987) inició su carrera en la Universidad de Murcia (España), donde realizó sus estudios de Máster y doctorado bajo la supervisión del Dr. Pablo González-Herrero (2011-2016). Durante este periodo, se centró en estudios fotofísicos de complejos organometálicos de platino y, asimismo, fue estudiante visitante en el grupo del Prof. Corey Stephenson de la Universidad de Michigan (Estados Unidos). Tras doctorarse, trabajó en la industria farmacéutica y, después, se trasladó a Manchester (Reino Unido) como investigador posdoctoral en el grupo del Prof. Daniele Leonori (2017-2020), donde estudió la aplicación de catálisis fotorredox en reacciones radicalarias. En 2020 comenzó una segunda estancia posdoctoral en el laboratorio del Prof. Tobias Ritter del Instituto Max Planck (Alemania), desarrollando reacciones de funcionalización de enlaces carbonohidrógeno. Desde 2021 es Group Leader Junior en el Instituto Catalán de Investigaciones Químicas (ICIQ) en Tarragona, donde estudia reacciones catalíticas sostenibles basadas en la activación de metales abundantes con luz visible. Ha recibido diversos premios nacionales e internacionales y es autor de varios artículos publicados en prestigiosas revistas como *Science*, *Nature* y *Nature Chemistry*.  [0000-0001-8903-4482](https://orcid.org/0000-0001-8903-4482)

Artículos reseñables

Fabrication of devices featuring covalently linked MoS₂-graphene heterostructures

Nat. Chemistry. 2022

<https://doi.org/10.1038/s41557-022-00924-1>

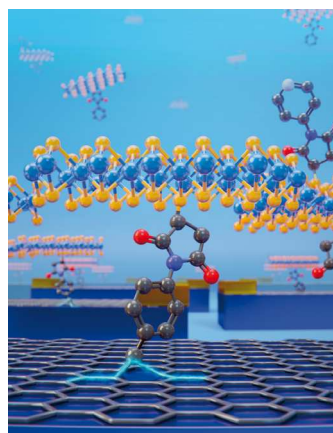
Fabricación de dispositivos con heteroestructuras de MoS₂-grafeno unidas covalentemente

Manuel Vázquez Sulleiro, Aysegul Develioglu, Ramiro Quirós-Ovies, Lucía Martín-Pérez, Natalia Martín Sabanés, María Lourdes Gonzalez-Juarez, I. Jéniffer Gómez, Mariano Vera-Hidalgo, Víctor Sebastián, Jesús Santamaría, Enrique Burzurí, Emilio M. Pérez

Las estructuras 2D son materiales en capas atómicamente delgadas, de unos pocos átomos de espesor, que se pueden apilar para construir heteroestructuras funcionales. El método más extendido para la síntesis de heteroestructuras 2D-2D es el crecimiento directo de materiales, uno encima del otro. En tales estructuras construidas por deposición atómica, las capas 2D están débilmente unidas por las interacciones de 'van der Waals' y se pueden desmontar al someterse a algunos disolventes o procesos térmicos. La falta de control sobre la interfaz de los dos materiales, en términos de comunicación electrónica, naturaleza química o distancia entre capas impide la construcción de dispositivos robustos.

Un equipo de investigadores liderado por Emilio M. Pérez y Enrique Burzurí en IMDEA Nanociencia y la Universidad Autónoma de Madrid, respectivamente, han conectado por primera covalentemente vez capas de materiales 2D: MoS₂ y grafeno. El equipo ha utilizado las herramientas de la química sintética para "coser" varios copos de MoS₂ a dispositivos de grafeno de una sola capa, utilizando un "velcro molecular": una molécula bifuncional con dos puntos de anclaje covalente. Los resultados, publicados en [Nature Chemistry](#), muestran que las propiedades electrónicas finales de la heteroestructura están dominadas por la interfaz molecular.

La combinación de las propiedades semiconductoras del dicalcogenuro de metales de transición MoS₂ con la alta movilidad portadora del grafeno es particularmente atractiva para las aplicaciones. El grupo construyó transistores de efecto de campo (FET) para probar las propiedades eléctricas de la estructura. Encontraron una modificación en la característica de voltaje de puerta, con un cambio del cono de Dirac hacia voltajes positivos y una reducción de la corriente al mínimo. Esta supresión de corriente en el grafeno se asocia inequívocamente a la interrupción de la hibridación sp² en sp³ debido a la formación de enlaces covalentes. Un experimento de control con MoS₂ prístino suspendido sobre grafeno no mostró cambios significativos en la intensidad de la banda D. Curiosamente, la movilidad del portador de



Las estructuras 2D de MoS₂ están conectadas al grafeno mediante un enlace covalente. Imagen: Patricia Bondía.

carga se conserva después de la funcionalización y la formación de enlaces covalentes entre MoS₂ y el grafeno, siendo el grado de dopaje de grafeno controlable a través del grado de funcionalización.

Los resultados muestran el poder del enfoque químico para construir heteroestructuras de grafeno MoS₂ más allá de van der Waals, preservando la movilidad portadora del grafeno con miras hacia dispositivos FET de alto rendimiento. La conexión

covalente vertical aporta un impulso adicional a las propiedades finales de los nanodispositivos más allá de las propiedades intrínsecas de los materiales, y tiene el potencial de una fácil homologación de alto rendimiento.

La investigación ha sido reseñada en la revista ARS-Tecnica <https://arstechnica.com/science/2022/04/building-electronic-devices-via-chemical-reactions/>.

Referencia

Emilio M. Pérez, Manuel Vázquez Sulleiro, Aysegul Develioglu, Ramiro Quirós-Ovies, Lucía Martín-Pérez, Natalia Martín Sabanés, María Lourdes Gonzalez-Juarez, I. Jéniffer Gómez, Mariano Vera-Hidalgo, Víctor Sebastián, Jesús Santamaría, Enrique Burzurí. Fabrication of devices featuring covalently linked MoS₂-graphene heterostructures. *Nat. Chemistry*. 2022. DOI: [10.1038/s41557-022-00924-1](https://doi.org/10.1038/s41557-022-00924-1).

Reseñas

Normas IUPAC de formulación y nomenclatura química

Por Efraím Reyes, Garikoitz Beobide, Uxue Uria, Óscar Castillo, Luisa Carrillo, Sonia Pérez-Yáñez, Javier Cepeda, Liher Prieto y José L. Vicario

La formulación y nomenclatura química constituye una herramienta fundamental para identificar inequívocamente los millones de compuestos químicos conocidos. Aunque su utilización suele relacionarse con el ámbito académico, su relevancia es aún mayor si consideramos los diferentes campos en los que esta lengua es empleada, que básicamente incluye todos aquellos aspectos relacionados con el uso de sustancias químicas. Así, por ejemplo, tanto en patentes de productos, como en normativas internacionales para la aprobación del uso de distintos compuestos químicos, o en la descripción de medicamentos o productos tóxicos o contaminantes, una nomenclatura incorrecta o poco descriptiva puede inducir a errores con consecuencias más reales que académicas. La nomenclatura química debe considerarse como una lengua y, por tanto, su misión fundamental es comunicar, pero a diferencia de otras lenguas no hay hablantes "nativos" de nomenclatura química. Por ello, deben desarrollarse unas normas precisas, consistentes y unificadas. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, de sus siglas en inglés) es la organización encargada de elaborar las recomendaciones de uso de la nomenclatura y formulación química. Estas recomendaciones se recogen en los compendios conocidos como "IUPAC Color Books", de los cuales el Libro Rojo está dedicado a nomenclatura de química inorgánica, el Libro Azul a nomenclatura de química orgánica y el Libro Morado a nomenclatura de polímeros. Pese a los esfuerzos que hace la IUPAC para promover el conocimiento de estas recomendaciones, libros como el editado por la Universidad del País Vasco, que resumen las reglas de la IUPAC de forma completa y clara, son muy deseables.

El libro consta de dos grandes bloques, uno dirigido a la nomenclatura de los compuestos inorgánicos y otro a los compuestos orgánicos. Dentro de cada bloque, se desarrollan diferentes capítulos que van abordando la nomenclatura de los diferentes tipos de compuestos, siguiendo un orden creciente en complejidad. De este modo, el primer bloque comienza con la nomenclatura de compuestos binarios de hidrógeno y oxígeno, seguido de hidróxidos, oxoácidos, iones, sales y compuestos de coordinación. Por otro lado, la nomenclatura de compuestos orgánicos comienza con los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, seguido de haluros, aminas, alcoholes, éteres, compuestos carbonílicos, ácidos y derivados, heterociclos y compuestos polifuncionales. Es destacable la introducción que se hace a la nomenclatura de los compuestos



Fecha de Publicación: 03/06/2021
ISBN: 978-84-1319-310-6
Páginas: 358
Editorial: DL 2021, Servicio Editorial Universidad del País Vasco
Precio: 33,25 €

de coordinación, y de los compuestos heterocíclicos, así como una breve descripción, muy ilustrativa, de los distintos tipos de isomería. Todos los capítulos están escritos de forma concisa y clara, con numerosas tablas y ejemplos explicativos, así como casos que representan una mayor complejidad. Para cada tipo de compuesto se indican la nomenclatura recomendada por la IUPAC, nombres aún aceptados, así como aquellos cuyo uso es muy extendido pero que no es aconsejable seguir empleando, lo que resulta muy esclarecedor. Al final de cada capítulo se recogen ejercicios de nomenclatura y formulación, muy útiles si se emplea el libro con fines docentes, si bien sería muy recomendable incluir las soluciones a los mismos. El libro es adecuado para cubrir la nomenclatura de bachillerato y del grado en química, excepto para temas muy especializados. Será útil también para titulaciones de ramas científicas relacionadas, como farmacia, bioquímica, biología, geología, medio ambiente, etcétera.

PROF. BEATRIZ M. ILLESCAS
Dpto. de Química Orgánica, Facultad de Química, UCM

Jesús Yoldi Bereau. Un universitario al servicio del bien común

Por Pedro Luis Mateo Alarcón, Carmen Morente Muñoz y Roque Hidalgo Álvarez

La Editorial de la Universidad de Granada ha editado en 2021 una obra, cuya segunda edición aparecerá en breve, sobre un personaje al que se le aplicó la condena al olvido. Se trata de Jesús Yoldi Bereau (1894-1936), catedrático de la Universidad de Granada, político republicano y brevemente alcalde de Granada, durante cinco meses de 1932. Este libro escrito a seis manos por Pedro Luis Mateo, Carmen Morente y Roque Hidalgo trata de rescatar su memoria.

En la conmemoración del centenario de la implantación de los estudios de química en Granada, cosa que ocurrió en 1913, se publicó un libro multiautor que recogía las vicisitudes de los mismos a lo largo de esa centuria. Al estudiar la relación de profesores habidos apareció el nombre de Jesús Yoldi del cual no se conocía prácticamente nada aparte de su nombre y su muerte. Los profesores Pedro Luis Mateo y Roque Hidalgo se sintieron inmediatamente atraídos por su figura y comenzaron la labor minuciosa de levantar papeles y recoger testimonios para lograr componer su figura con la ayuda de la historiadora Carmen Morente. Este libro es el resultado de un trabajo realizado desde la pasión y el rigor científico. Los tres autores son de formación distinta: Pedro Luis Mateo es químico de formación y especialista en termodinámica de proteínas; Roque Hidalgo es físico especializado en la ciencia de coloides e interfases y Carmen Morente es licenciada en Filosofía y Letras, especializada en Historia actual y escritora. Los autores Mateo e Hidalgo no son inexpertos en estas lides, ambos están interesados en la Edad de Plata de la ciencia española sobre la que han realizado diversas contribuciones, así como sobre el papel de las élites en la dictadura de Primo de Rivera.

Los autores abordan la doble dimensión universitaria y política de Yoldi, como profesor e investigador por una parte y como político y gestor municipal por otra; y donde ambas dimensiones se entrelazan y retroalimentan.

La obra se presenta en cinco capítulos: origen, formación universitaria, toma de conciencia republicana, actividad pública y pasión y muerte. En el primer capítulo se muestra a Jesús Yoldi en su contexto social, natural de Arizcun en el navarro valle del Baztán, y familiar, hijo de un médico rural. Se presenta la existencia en ese valle de una minoría étnica marginada, los agotes, quizás como el inicio del rechazo de Yoldi del sectarismo e inicio de su pasión reformadora. El segundo capítulo trata de su etapa de formación en ciencias químicas en la entonces pequeña Universidad de Zaragoza, a cuyo distrito universitario pertenecía Navarra. La licenciatura en Ciencias Químicas la comenzó en 1911 terminándola en 1915. Sus profesores fueron los tres miembros más representativos de la llamada Escuela Química de Zaragoza: Antonio de Gregorio Rocasolano, profesor de Química General, Paulino Savirón, profesor de Química Inorgánica y por acumulación de Química Analítica y Gonzalo Calamita,



Fecha de Publicación: 14/09/2021

ISBN: 978-84-338-6821-3

Páginas: 330

Editorial: Editorial Universidad de Granada

Precio: 24,00 €

profesor de Química Orgánica. Su expediente es brillante y logra el Premio Extraordinario de la Licenciatura del curso 1914-15. Su Tesis Doctoral posiblemente realizada en Química Analítica bajo la supervisión de Paulino Savirón le abre las puertas de la enseñanza universitaria. Tras un breve paso por Sevilla, como auxiliar interino, donde su hermano Francisco, once años mayor que él, era catedrático de Química Inorgánica, gana la Cátedra de Química General de Cádiz y poco después, por traslado, la de Granada.

En la Universidad de Granada Jesús Yoldi se hace cargo de diversas asignaturas, principalmente Química General y los dos cursos de Química Analítica. Entiende la enseñanza de la química como experimental, pasando desde los antiguos experimentos de cátedra al laboratorio con puestos de trabajo para los alumnos. Yoldi monta los laboratorios para las asignaturas de análisis químico donde los alumnos trabajan seis horas semanales frente a una de teoría utilizando como libro de texto el reconocido Tratado de Química Analítica de F.P. Treadwell. Su labor investigadora no fue muy extensa estando en consonancia con los escasos medios disponibles. Su capacidad docente fue reconocida por los alumnos donde combinaba clases teóricas, laboratorio y visitas a empresas químicas.

En el capítulo tercero se aborda la toma de conciencia y posición republicana de Yoldi situándolo en el contexto de la dictadura de Primo de Rivera, la llamada dictadura con rey,

en la ciudad de Granada. Cuando Yoldi llega a Granada en 1924, la industria remolachera está en pleno auge con las tensiones que el crecimiento demográfico y de industrialización de la agricultura suponen. En ese capítulo se señalan los diferentes problemas que aquejan a la ciudad de Granada y que Yoldi conoce. La etapa de vida pública de Yoldi es muy activa no solo por su participación en la *cosa pública* sino también por su intervención en actividades culturales, creación de bibliotecas públicas, y artísticas, amistad con García Lorca y otros intelectuales de Granada. Los autores achacan la toma de conciencia republicana de Yoldi, entre otros factores, a la corrupción y a la represión policial existentes en la Granada de los años veinte.

El capítulo cuarto trata de forma minuciosa el devenir del ayuntamiento de Granada durante la dictadura de Primo de Rivera ocupado por la oligarquía local, a continuación, el ayuntamiento de transición acabada la dictadura y, por último, el ayuntamiento democrático resultante de las elecciones municipales de 1931, donde se incorpora Yoldi al entender como obligación moral el intervenir en la actividad pública. Resumiendo su programa como alcalde en el lema "dinero, trabajo, sanidad y cultura" impulsa reformas como la hacienda local, siempre exhausta, la sustitución del impuesto de

consumos, la sanidad, la corrupción municipal o la necesaria reforma administrativa. Su formación química le permitirá abordar problemas como el fraude de la leche o el problema del suministro de agua. Sin embargo, su débil posición política en la corporación municipal le lleva a presentar la dimisión en septiembre de 1932.

El último capítulo relata su arresto por falangistas y miembros de la Guardia Civil que apoyan el golpe de estado de julio de 1936, su detención en Las Colonias de Viznar hasta que el 23 de octubre de ese año es fusilado, sin mediar juicio, frente a las tapias del cementerio de Granada.

Esta obra recupera la figura de un profesor universitario, de notable dimensión ética, que integra su labor docente e investigadora junto con una fe republicana y una actividad política como gestor municipal.

En resumen, se trata de un libro altamente recomendable que combina el rigor científico e histórico con una presentación impecable, tanto en el aspecto tipográfico como en la reproducción de fotografías y documentos, muchos de ellos desconocidos.

LUIS FERMIN CAPITÁN VALLVEY
Profesor Emérito Universidad de Granada

RADICALES (MUY) LIBRES



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

Las varas de medir

Como toda persona que envejece, tiendo a alejarme de las posturas radicales y extremas, y acabo pensando que todos siempre tienen algo de razón, aunque releendo alguna de mis anteriores columnas sospecho que tal vez no esté tan centrado como proclamo. En cualquier caso, me siento mucho más moderado que nuestros políticos actuales, que más parecen activistas que gestores de lo público. Cuando un político hace una propuesta, cualquiera que sea, los de la bancada contraria sólo se fijan en quien la firma, y no en su contenido, en el que a menudo subyacen ideas interesantes, transversales y perfectamente compatibles con ambas ideologías enfrentadas. Al enemigo, ni agua, parecen todos decir, y se lanzan sin piedad a descalificarla con fiereza, sin reparar en que bastaría cambiar las siglas del rival por las suyas propias para encontrar múltiples semejanzas entre lo que critican y lo que ocurre en su propio partido. Es una especie de espejo siniestro, un bucle sin fin que deja al país estancado y a los ciudadanos desprotegidos. Son ejemplos del llamado subjetivismo o relativismo, muy bien definido en el conocido poema de Ramón de Campoamor que, en su literalidad original, decía: *"Y es que en el mundo traidor / nada hay verdad ni mentira: / todo es según el color / del cristal con que se mira"*. Campoamor, además de poeta, fue también político, y su frase dio lugar a la denominada "Ley Campoamor" que, aunque ya no se utilice con ese nombre, sigue en pleno vigor y llena de esplendor, como comprobamos a diario.

En otras áreas de la vida también se aplican distintas varas de medir, puesto que, al margen de una supuesta verdad objetiva, no siempre demostrable, existen las opiniones, las creencias y, sobre todo, la creatividad, que nos aleja de las máquinas y nos hace más humanos, y por ello más falibles y tendientes a alejarnos de los datos observados. Y eso ocurre también en la ciencia y por supuesto en la química. Cuando me refiero a la Ley Campoamor estoy hablando de una subjetividad consciente, militante, que lleva a aplaudir a los nuestros y denigrar a los contrarios por una cuestión de principios, por un acto de fe, de lealtad ciega a un líder o a una idea, y siendo plenamente conscientes de la mentira o, al menos, de la exageración con que nos expresamos. Es la bíblica paja en el ojo ajeno que ignora la viga en el propio.

Cuando esa parcialidad y favoritismo deriva en resoluciones injustas, los políticos y funcionarios que así actúan cruzan una línea roja que lleva al delito de prevaricación, tipificado en nuestras leyes, aunque no siempre castigado por nuestros jueces. Creo que a eso se refería el poeta con sus famosos versos, pero no es ese el objetivo principal de esta columna. Yo quiero referirme aquí a la subjetividad no militante, al relativismo que mueve la mayoría de nuestras acciones, sin intención malévola, y a menudo de forma inconsciente.

Antes de entrar en la química, tomemos como ejemplo el ajedrez, ese juego-ciencia que tanto estimula las mentes, y que debería ser asignatura obligada en todas las escuelas, como la historia o las matemáticas. Entre los aficionados, se distinguen los buenos jugadores de los malos, no sólo por su capacidad de cálculo o su conocimiento de aperturas y teoría, sino sobre todo porque los malos sólo piensan en sus propias jugadas, olvidándose de los planes de su oponente. En tiempos románticos, desde Alekhine o Capablanca hasta Bobby Fischer y demás genios del tablero, la creatividad y belleza de las combinaciones eran casi lo más importante, y disponemos de maravillosos ejemplos al respecto. Pero con la llegada de los ordenadores, nos dimos cuenta de que esas máquinas eran capaces de calcular miles de jugadas y variantes por segundo, y sólo se podrían dominar mediante jugadas inesperadas, "malas" para ellas, que las confundieran en sus algoritmos de razonamiento, basados en el valor de las piezas y algunas reglas generales sobre la posición global. En muchos estudios sobre inteligencia artificial, llevados a cabo por la Universidad Carnegie Mellon (Pittsburgh) y otros centros punteros, se ha utilizado ampliamente el ajedrez como material de trabajo. Los grandes maestros conseguían al principio ganar a esos ordenadores gigantes, y son famosas las mediáticas partidas de Kasparov contra ellos, siendo la máquina *Deep Blue* de IBM la primera que acabó derrotando a un campeón del mundo en una partida de duración convencional, hazaña que siempre me recuerda a Hal 9000, el ordenador de *"2001, Una odisea en el espacio"* de Stanley Kubrick. A medida que la tecnología fue avanzando, ya no hubo nada que hacer. Hoy en día hay programas tan potentes como *Stockfish* y similares, que se pueden descargar gratuitamente en cualquier ordenador

y que son usados por todos, aficionados y profesionales, para analizar partidas y detectar errores o mejorar el juego, y que también se usan por desgracia para hacer trampas en partidas *online*, salvo que se trate de encuentros muy cortos, de menos de 3 minutos por jugador para toda la partida, en los que no da tiempo a consultar la máquina entre jugada y jugada. Durante la pandemia, también los grandes maestros jugaron numerosos torneos a distancia, con partidas largas o de duración media, cantidades importantes de dinero en premios y desde sus casas, pero con cámaras que garantizaban la limpieza del juego. A los interesados, les recomiendo el excelente y detallado artículo sobre ajedrez y computadoras que aparece en Wikipedia (https://es.wikipedia.org/wiki/Ajedrez_por_computadora#Origen).

¿Es de aplicación el ejemplo del ajedrez a la química? ¿Cómo las máquinas pueden influir en nuestra creatividad? Se dice que cuando tienes una gran idea, luego resulta que otros la han publicado ya o bien que al ensayarla no funciona, es decir, que la idea no era tan grande como pensabas. Lo primero se soluciona fácilmente haciendo una bibliografía exhaustiva antes de empezar, práctica muy aconsejable y no siempre seguida, pues las prisas suelen ser malas consejeras. Para los jóvenes investigadores es muy frustrante descubrir, tras meses de trabajo, un artículo que ni el jefe que propuso el tema ni ellos mismos conocían, en donde se describía con todo detalle lo que están haciendo o algo muy similar. Lo segundo, que la cosa salga mal, es por otra parte lo más frecuente en ciencia y constituye el día a día de cualquier investigador, pues el químico propone y el matraz dispone. Además, si hiciéramos cosas que siempre salieran según nuestras predicciones no valdría la pena investigar y, además, desgraciadamente, lo que no funciona casi nunca se publica. Así, repetimos una y otras vez experimentos que otros han hecho ya. Para aumentar nuestras posibilidades de acierto acudimos frecuentemente a cálculos teóricos, cada vez más potentes, asequibles y fiables, como herramientas predictivas o para comprender lo que en realidad ha ocurrido, al comprobar que nuestros planes no han ido en la dirección esperada.

Y si buscamos la mejor manera de hacer algo en el laboratorio, el método perfecto, el objetivamente correcto, tampoco elegimos siempre el mejor camino. Unas veces por razones prácticas, como elegir una vía sintética por resultarnos más familiar que otra, aunque ésta última sea la recomendada por la bibliografía, y otras por usar un reactivo de menor eficacia al no disponer en aquel momento de otro más idóneo o de la infraestructura necesaria. Nunca sabremos si el período azul de Picasso nació simplemente porque se le acabaron los tubos de otros colores, o porque había comprado demasiados azules por aquellos días. Todos somos hijos de nuestra experiencia y, como decía el inmortal Robert B. Woodward, que recibió el Premio Nobel en 1965 por su contribución al *arte de la síntesis orgánica*, las moléculas tienen muchas caras, y

debemos inspeccionarlas todas para reconocer las mejores vías de acceso, o mejor dicho, las que más nos inspiran según nuestros conocimientos. De hecho, una de las mejores promociones de una nueva reacción o método de síntesis que descubramos es aplicarla a la síntesis total de un producto natural de estructura compleja, aunque ya haya sido preparado anteriormente por otro camino. Cuando actuamos así, parece que le digamos a la máquina que todavía le queda mucho camino por recorrer antes de dejarnos definitivamente atrás, y de paso informar a nuestros colegas de lo guapos que somos. A propósito, he asistido a innumerables congresos de química en donde casi todos hacen cosas parecidas aunque cada uno trate de vender sus ideas "originales", pero jamás he sabido de la existencia de una convención de pintores. Desde la perspectiva de la creatividad, poner cierta distancia respecto a lo que hacen los colegas resulta inspirador y evita que nos copiemos unos a otros, consciente o inconscientemente, siguiendo la moda o el tema del momento.

¿Se aleja pues la creatividad de la verdad objetiva? ¿Existe realmente una verdad objetiva en química, la única ciencia que crea sus propios objetos/temas de trabajo (*La chimie crée son objet*, M. Berthelot, 1870)? Escribo estas líneas el 30 de abril, en una hermosa mañana soleada mientras tomo café y veo por la tele el programa musical de los sábados por la 2, dedicado hoy a Juan Sebastián Bach y sus conciertos para varios clavecines. Para mí, de nuevo ejemplos de armonía absoluta y belleza inigualable, aunque decir eso en una columna dedicada a la objetividad pueda sonar como lo más subjetivo del mundo. Pero es así, no puedo evitarlo. Además, la música siempre me lleva a la química, y viceversa. Ahora mismo está sonando el concierto para cuatro claves, transcripción del de cuatro violines de Antonio Vivaldi, otro genio de la música. Cada vez que lo oigo, especialmente el *Allegro* final, me vengo arriba, me olvido de mis colegas que se miran continuamente el ombligo narrando sus proezas científicas, de nuestros políticos que aplican sistemáticamente la Ley Campoamor, de Putin y su sucia guerra, de los fabricantes de armas que hacen negocio con ella y de quienes luego lo harán con la excusa de la reconstrucción, de tantas vidas sesgadas inútilmente, de tantas mentiras y tanto odio. Y me olvido también de nuestra televisión, que emite esos programas a horas de mínima audiencia, casi intempestivos, como avergonzándose de sí misma. ¡Ay, qué oscuro sería el mundo sin que hubiera existido Juan Sebastián Bach! Y tomen nota, no admito discusión alguna al respecto. ¡Quien me lo niegue se las tendrá que ver conmigo!

JAVIER DE MENDOZA

Catedrático jubilado de Química Orgánica
(Universidad Autónoma de Madrid)

Profesor Emérito, Instituto Catalán de Investigación Química
(ICIQ, Tarragona)
jmendoza@iciq.es



CYRENE™

A bio-based alternative to petroleum-based DMF and NMP solvents



A SAFER SOLVENT

NMP and DMF are on the European ECHA list of substances of very high concern because of their mutagenic toxicity.¹

- In 2020, the ECHA implemented strict restrictions on the use of NMP within the EU²
- Cyrene™ does not contain the amide group associated with mutagenic toxicity and is therefore not subjected to the same regulatory restrictions as NMP and DMF¹

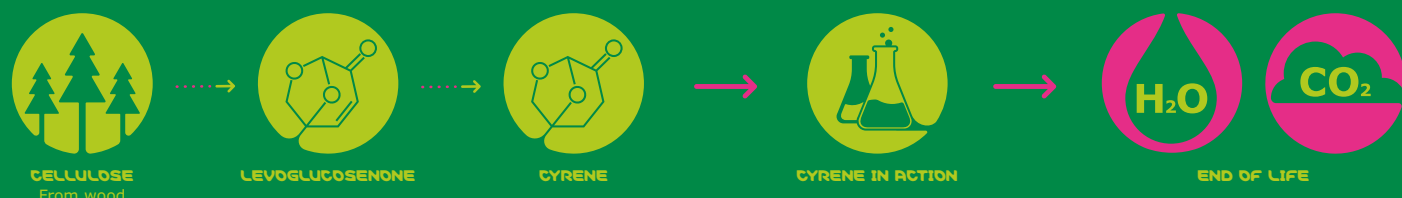
A SMALLER FOOTPRINT³

When compared to other solvents, Cyrene™ has a drastically smaller cradle-to-gate global warming potential (kg CO₂e/kg Solvent).



IPCC 2013 Impact Assessment Method

A SUSTAINABLE OPTION



Solvents constitute more than half the waste of a typical pharmaceutical process.⁴

Cyrene™ does not contain chlorine, sulfur, or nitrogen heteroatoms, which can present pollution issues or create corrosive by-products if incinerated.¹⁻⁵

The production of Cyrene™ is energy neutral and sustainable. It is produced in only two steps from waste cellulose and releases only carbon dioxide and water at end of life.¹⁻⁶