



Boletín de la Sociedad Química de México

Volumen 14
Número 1
Año 2020
enero-abril



Boletín de la Sociedad Química de México (Bol. Soc. Quim. Mex.)

EDITORES

Dra. Mariana Ortiz Reynoso
Dr. Alberto Rojas Hernández
Dr. Jorge Guillermo Ibáñez Cornejo

COMITÉ EDITORIAL

Dra. Catalina Pérez Berumen
Dr. Miguel Ángel Méndez Rojas
Dr. Miguel Ángel Muñoz Hernández

ASISTENCIA EDITORIAL

Estefanie Luz Ramírez Cruz
boletin.sqm@gmail.com

MAQUETACIÓN

Estefanie Luz Ramírez Cruz
Sociedad Química de México, A.C.



EN PORTADA: Retrato de trabajador médico altamente profesional. La portada ha sido diseñada usando imágenes de Freepik.com

DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS

El Boletín de la Sociedad Química de México, año 14, número 1, enero-abril de 2020, es una publicación cuatrimestral, enero-abril 2020, editada por la Sociedad Química de México, A.C., Barranca del Muerto 26, Col. Crédito del Constructor, Alc. Benito Juárez, 03940, Ciudad de México, Tel. 55 56 62-68 37. <http://bsqm.org.mx/>, boletin.sqm@gmail.com. Editores responsables Mariana Ortiz, Alberto Rojas, Jorge Ibáñez/ Impreso: Certificado de Reserva: 04-2016-021511381800-106, ISSN 1870-1809 ambos otorgados por el Instituto de Nacional de Derechos de Autor. Certificado de Licitud de Contenido: en trámite. Registro postal de impresos depositados por sus editores o agentes otorgados por SEPOMEX: IM09-0312./ Electrónico: Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2017-063013203100-203, ISSN-e: 2594-1038, ambos otorgados por Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número Estefanie Ramírez y Lizbeth Méndez, Sociedad Química de México A.C. Fecha de última modificación: 30 de abril de 2020.

EDITORIAL

A partir del 2020, damos la bienvenida a la Dra. Mariana Ortiz Reynoso de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México, como editora del *Boletín de la Sociedad Química de México*, quien se une al Dr. Ibáñez y al Dr. Rojas, para impulsar nuestra publicación con energía renovadora.

Como parte de esta renovación, las secciones del *Boletín* se han reagrupado en tres.

Química Hoy. Considera reseñas de libros y artículos publicados recientemente o de uso generalizado en los diversos programas de enseñanza (licenciatura, posgrado), así como textos o material que marquen un hito en la disciplina correspondiente. También contempla reseñas de tecnologías específicas relacionadas con la enseñanza y el aprendizaje de la Química a través de software, archivos de programa o videos disponibles en sitios web. Además, la sección promueve un espacio en donde el Comité Ejecutivo Nacional de la SQM divulga sus planes o informes de trabajo, así como noticias que interesen a los integrantes de la SQM. Incluye discusiones académicas, textos *in memoriam*, cartas y traducciones de artículos relevantes, así como entrevistas o charlas con personas relacionadas a la Química cuyo trabajo tenga un impacto social, discusiones académicas y reseñas.

Química, Desarrollo y Sociedad. En esta sección se publican artículos de investigación, revisión y difusión, así como textos traducidos relativos a la Química que se consideren relevantes para la sociedad y la vida, con foco en las investigaciones científicas que actualizan el estado de la técnica en algún tema específico.

Química para los Estudiantes. Incluye ensayos que tratan un tema o concepto a profundidad o de forma novedosa, brindando herramientas de apoyo para el aprendizaje de los lectores. Este apartado también publica textos de experiencias académicas que hayan mejorado el estudio de algún tema. En suma, se abordan tópicos científicos y técnicos relacionados con las carreras de la Química, tecnologías de la información, educación continua, posgrados y cuestiones laborales, con el fin de perfilar futuras perspectivas y abordar retos de las profesiones de la Química.

Esperamos que esta reorganización sea de mayor interés, no sólo para nuestros fieles lectores, sino para posibles autores y profesionales de la Química en sus diferentes campos de trabajo.

Asimismo, a partir de ahora, el *Boletín de la SQM* apoyará la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU promoviendo el uso eficiente y razonado de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente, por lo que nuestro *Boletín* se convertirá en una publicación digital.

Continuamos trabajando para aprovechar las ventajas que este cambio supone, explotando el alcance que los medios electrónicos nos proporcionan de manera que sigamos promocionando y divulgando la investigación científica, tecnológica y la docencia dentro del campo de la Química con lo cual, además, abonaremos en el logro de los objetivos de la Sociedad Química de México, A.C.

Equipo editorial del BSQM

CONTENIDO



QUÍMICA HOY

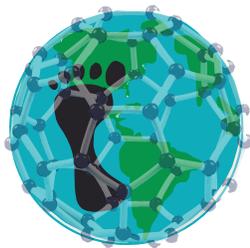
Informe de Trabajo 2018-2019 del Comité Ejecutivo Nacional de la Sociedad Química de México <i>María del Jesús Rosales Hoz</i>	5
Plan de Trabajo 2020-2021 <i>Ignacio González Martínez</i>	9
Fallece el IQI. Jesús Ávila Galinzoga, Expresidente del Decanato del IPN <i>Enrique Antonio Balanza y Torres</i>	10
Baterías de Ion-Litio: para mayor beneficio de la humanidad <i>Gregorio Guzmán-González</i>	11

QUÍMICA, DESARROLLO Y SOCIEDAD

Análisis y estudio de la viabilidad del uso del polipirrol sobreoxidado en membranas de intercambio catiónico <i>Luz María Torres Rodríguez, Antonio Montes Rojas, Oscar Israel Vega López</i>	13
Los intrigantes elementos químicos conocidos como "Tierras Raras". Historia e importancia <i>Verónica García Montalvo</i>	16
Los elementos de la tabla periódica y la superconductividad <i>Gustavo Tavizón y Francisco Morales</i>	20
Elementos Químicos. El silicio (Si) y la Industria Electrónica <i>Joaquín Palacios Alquisira</i>	26

QUÍMICA PARA LOS ESTUDIANTES

Seguri.Lab Lavaojos <i>Hugo J. Ávila Paredes</i>	31
---	----



55° Congreso Mexicano de Química 39° Congreso Nacional de Educación Química 16° Concurso Nacional de Carteles Estudiantiles Expoquímica

9 al 12 de noviembre de 2020

Hotel Azul Ixtapa
Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero

CONVOCATORIA

Categorías:

- 1. Ponentes:** personas que presentan hasta dos trabajos en modalidad oral y/o cartel.
- 2. Asistente:** no presentan trabajos en ninguna modalidad.

Costos

Inscripción congresos (hasta el 4 de septiembre)				
Categorías	Socios Ponente	Socios Asistente	No socios Ponente	No socio Asistente
Profesional	\$3,100.00	\$2,250.00	\$5,500.00	\$4,500.00
Estudiante de Posgrado	\$2,600.00	\$2,100.00	\$4,500.00	\$3,900.00
Estudiante de Pregrado	\$1,400.00	\$1,100.00	\$2,500.00	\$2,100.00
Profesor de educación Media Superior	\$2,600.00	\$2,100.00	\$4,500.00	\$4,000.00
Jubilado	\$1,800.00	\$1,250.00	\$2,800.00	\$2,500.00

Paquete congresista (Asistentes y ponentes)

Paquete congresista (Inscripción y Hospedaje)				
Categorías	Socios Ponente	Socios Asistente	No socios Ponente	No socio Asistente
Profesional	\$9,523.50	\$8,631.00	\$12,043.50	\$10,993.50
Estudiante de Posgrado	\$8,998.50	\$8,473.00	\$10,993.50	\$10,363.50
Estudiante de Pregrado	\$7,738.50	\$7,423.50	\$8,893.50	\$8,473.50
Profesor de educación Media Superior	\$8,998.50	\$8,473.50	\$10,993.50	\$10,468.50
Jubilado	\$8,158.50	\$7,581.00	\$9,208.50	\$8,893.50

Los socios SQM 2020 pueden diferir el costo del Paquete en 2 exhibiciones (Consultar fechas).

Los invitamos a renovar la membresía o afiliarse para obtener más descuentos antes del 31 de mayo

Fecha límite para la recepción de trabajos 20 de JULIO
Consulte la convocatoria

El paquete congresista es por persona e incluye:

- Inscripción a los congresos
- Tres noches en habitación doble, dentro del periodo del 9 al 12 de noviembre.
- Todo incluido (desayuno, comida, cena, snacks y bebidas ilimitadas)

Más información

www.sqm.org.mx | congresos@sqm.org.mx

Tel. 56626823



Tu también puedes anunciarte en este espacio, escríbenos a boletin.sqm@gmail.com.

Informe de Trabajo 2018-2019 del Comité Ejecutivo Nacional de la Sociedad Química de México

María del Jesús Rosales Hoz

Se presenta a continuación el informe de actividades del periodo 2018-2019 del Comité Ejecutivo Nacional, de acuerdo con lo que se establece en los Estatutos de la Sociedad Química de México A.C., y en el artículo 29 inciso V y VI del Reglamento de la SQM en donde se establece: “es responsabilidad del (la) Presidente – Informar anualmente a la Asamblea General de todas las actividades de la Asociación, así como de las inconformidades de los asociados” y “Al término de su gestión, integrar y presentar un informe de las labores llevadas a cabo por el Comité Ejecutivo Nacional y las comisiones, que incluyan una evaluación crítica del mismo”.

Conforme al Plan de trabajo presentado al inicio del bienio, el trabajo realizado se planteó en cuatro ejes principales: Difusión de la Química, Apoyo en la enseñanza de la Química, Investigación y Gestión a favor de la Química.

1. Difusión de la Química

Festival de la Química

En 2018 se realizaron dos festivales, el primero se llevó a cabo el 30 de mayo en colaboración con la YMCA en la alcaldía Iztacalco de la Ciudad de México, como parte de la celebración del 40 Aniversario del programa de Desarrollo comunitario de esta institución. Acudieron al evento alrededor de 466 alumnos y profesores, y 96 padres de familia que participan en los programas del centro YMCA y alumnos de la escuela primaria “Manuel Buendía” de la zona.

El segundo festival se realizó el 3 y 4 de octubre de 2019 en el marco del 53° Congreso Mexicano de Química y del 37° Congreso Nacional de Educación Química, este se desarrolló con el apoyo del Instituto Politécnico Nacional, que prestó la explanada de la Coordinación General de Formación e Innovación Educativa (CGFIE) y la Unidad Politécnica para el Desarrollo y la Competitividad Empresarial (UPDCE) para llevar a cabo el evento.

Durante 2019 también se realizaron dos festivales, el primero llevado a cabo el 7 de mayo en la Biblioteca Vasconcelos en la Ciudad de México. El evento incluyó la conferencia “¿Qué tanto sabes de los elementos químicos?” impartida por el Dr. Raymundo Cea, académico de la UNAM. Las actividades del festival fueron apoyadas por la Sección Estudiantil de la SQM de la UAM Iztapalapa.

El segundo festival de 2019 se llevó a cabo el 1° y 2 de octubre en el Complejo Cultural Universitario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en el marco del 54° Congreso Mexicano de Química y del 38° Congreso Nacional de Educación Química. En ambos festivales se desarrollaron 4 talleres con experimentos químicos y el rally por el tapete de la Tabla Periódica.

Boletín de la Sociedad Química de México

El Boletín de la Sociedad Química de México, además de publicar las relatorías de las actividades de la SQM como las jornadas académicas, festivales de química y los congresos que organiza o en los que participa, incluyó las colaboraciones de miembros destacados de la comunidad química; en 2018 se incluyeron 10 artículos y en 2019 se incluyeron 19 artículos. En ambos números la temática fue diversa, en especial en 2019 se publicaron dos números especiales con las ponencias conmemorativas al Año Internacional de la Tabla Periódica.

Los artículos pueden ser consultados en la página <http://bsqm.org.mx/>

2. Apoyo en la Enseñanza de la Química

Webinars

La SQM tiene varios años apostando a las nuevas tecnologías como formas efectivas de divulgar la ciencia. Uno de sus esfuerzos principales se canaliza con los webinars. Durante los años de mi gestión, los webinars con temática educativa fueron:

- “Uso de las TIC para la educación Química” por el Dr. Julio César Botello Pozos de la FES Cuautitlán de la UNAM.
- “Química computacional aplicada a un curso de Estructura de la Materia” por la Dra. Rubicelia Vargas Fosada de la UAM Iztapalapa.
- “¿Cómo desarrollar habilidades de pensamiento científico a través de la enseñanza experimental?” por la Dra. Kira Padilla de la Facultad de Química de la UNAM.
- “Ciencia en contexto: las ideas centrales y las habilidades clave en la clase de Química” por la M. en C. Rosa María Catalá Rodes del Colegio Madrid.

Jornadas Académicas de Educación

Una iniciativa que nació para conmemorar el 60 aniversario de la SQM se ha vuelto hoy un programa irrenunciable para quienes organizan y asisten a estas reuniones. Las jornadas académicas abren un espacio de intercambio y discusión con temas de vanguardia para la química y para quienes participan de ella.

La 1ª Jornada Académica en Educación se llevó a cabo el 30 de noviembre de 2018 en el Auditorio Francisco Javier Mina de la UAM Xochimilco, con la participación de la Dra. Margarita Viniestra de UAM Iztapalapa, la Dra. Irma Silvia Núñez Tancredi de la Facultad de Ciencias de la UNAM, el Dr. Felipe de León Olivares de la Escuela Nacional Preparatoria de la UNAM, el Dr. Jorge Ibáñez Cornejo de la Universidad Iberoamericana y la Dra. Alejandra García Franco de la UAM Cuajimalpa.

Congresos Nacionales de Educación Química

Como parte del fortalecimiento del Congreso Nacional de Educación Química, se hizo énfasis en la necesidad de contar con conferencias de ponentes de primer nivel y actividades, cursos y simposios, de temas de vanguardia especialmente dirigidos a docentes de Educación Media Superior y Superior.

En la edición 37ª realizada en el CGFIE de la Ciudad de México se contó con el siguiente programa:

Conferencia Magistral: “Una nueva aproximación a la propuesta CTS para la enseñanza de la Química” impartida por la Dra. Silvia Porro de la Universidad Nacional de Quilmes (UNQ), Argentina.

Mesa de discusión: “Mitos y realidades de la enseñanza de la Química en los sistemas de educación media superior” con la Coordinación y moderación de la Dra. Margarita Viniegra Ramírez de la UAM Iztapalapa y la participación de la QFB. María Guadalupe Luna Sandoval del Colegio de Bachilleres plantel 8 Cuajimalpa; el Dr. Jorge Meinguer Ledesma de la Escuela Nacional del Colegio de Ciencias y Humanidades plantel sur de la UNAM; la M. en C. Maribel Espinosa Hernández de la Escuela Nacional Preparatoria plantel 2, UNAM; el M. en C. Víctor Manuel Feregrino Hernández de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del IPN; el M en C. Francisco Enrico Fenoglio Limón del Instituto de Educación Media Superior del Distrito Federal, plantel Iztapalapa y la M. en C. Rosa María Catalá, directora del Colegio Madrid, A.C.

Curso: “Grupos de estudio y análisis de lecciones. Nuevas tendencias en el papel del docente en la enseñanza de las ciencias y las matemáticas en la adopción de las metodologías AST-STEAM” impartido por la M. en C. Rosa María Catalá Rodes y Lic. Iñigo Prieto Beguiristáin del Colegio Madrid, A.C.

Curso: “SciFinder-n: Acelera tu proceso de búsqueda de información científica con el nuevo producto de la familia SciFinder” impartido por el Dr. Alfonso González Montiel, CAS - ACS.

En la edición 38ª llevada a cabo en el Complejo Cultural Universitario de la BUAP, el programa incluyó:

Conferencia Plenaria: “*The periodic table, its story and its significance*” impartida por el Dr. Eric R. Scerri de la Universidad de California Los Ángeles (UCLA), EU.

Simposio: “Educación para la sostenibilidad” con la coordinación de la M. D. Mariana Muñoz Galván del Instituto de Enseñanza Media Superior de la Ciudad de México y la participación del Dr. Antonio Fernández Crispín de la BUAP; la M. en Educación Ambiental María Guadalupe Luna Sandoval del Colegio de Bachilleres, plantel 8 Cuajimalpa; el Dr. Gustavo Lozano Vázquez de la BUAP.

Curso: “*Blended learning* como estrategia didáctica en clases presenciales” impartido por el Dr. Miguel Ángel López Carrasco de la BUAP.

Mesa Redonda: “La Importancia del desarrollo de competencias en estudiantes del nivel medio superior” con la moderación del M. en C. Luis Ángel Aguilar Carrasco de la BUAP y la participación del Dr. Marco Velasco Albo de la BUAP; la Mtra. Guadalupe Luzmila Díaz de la Rosa del Bachillerato Trilingüe del Centro de Idiomas de Volkswagen y el Ing. Fermín Juárez Sánchez de Ellucian Live.

3. Investigación

Otro de los ejes primordiales del trabajo de la SQM ha sido el fomento y discusión de la investigación en las diferentes áreas de la química. Las actividades que integran este eje son:

Jornadas Académicas de Investigación

El 27 de abril de 2018 se llevó a cabo la 2ª Jornada Académica en Investigación en la Unidad de Seminarios de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla con la participación del Dr. Fernando Sartillo Piscil de la misma institución; el Dr. Carlos Eduardo Frontana del CIDETEQ; la Dra. Graciela Morales del CIQA; el Dr. Argel Ibarra Alvarado del Instituto de Investigaciones Materiales de la UNAM; la Dra. Violeta Mugica Álvarez de la UAM Azcapotzalco y el Dr. Arturo Iván Gómez Ruiz del CONACYT - Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.

En 2019, para celebrar del Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, se realizaron 6 Jornadas Académicas:

26 de febrero de 2019 en el Museo Universum con la participación del Dr. Plinio Jesús Sosa Fernández de la Facultad de Química de la UNAM; la Dra. Liliana Quintanar Vera del CINVESTAV; el Dr. José Luis Córdova Frunz de la UAM Iztapalapa y el Dr. Enrico Ramírez Ruiz de la Universidad de California-Instituto Niels Bohr.

26 de marzo de 2019 en el Instituto de Investigaciones Culturales-Museo de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) con la participación de la Dra. Emma Margarita Pereyra Talamantes del Instituto de Astronomía de la UNAM, el Dr. Benjamín Valdez Salas del Instituto de Ingeniería de la UABC, el Dr. Ernesto Alonso Valdez del mismo instituto y, la Dra. Lena Ruiz Azuara de la Facultad de Química de la UNAM.

1º de abril de 2019 en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) con la participación de la Dra. Violeta Mugica Álvarez de la UAM Azcapotzalco, la Dra. Luz María Torres Rodríguez de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, el Dr. Luis Chacón García del Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la M.C. María del Carmen Ojeda Escamilla del Instituto de Metalurgia de la UASLP.

28 de mayo de 2019 en la Biblioteca Universitaria Raúl Rangel Frías de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) con la participación de la Dra. María del Jesús Rosales Hoz del CINVESTAV, el Dr. Rodrigo Alonso Chan Navarro de la Facultad de Ciencias Químicas de la UNAL, el Dr. Alberto Vela Amieva del CINVESTAV y la Dra. María Aracely Hernández Ramírez de la Facultad de Ciencias Químicas de la UNAL.

12 de agosto de 2019 en el Auditorio Gustavo Baz Prada, de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México con la participación del Dr. Alberto Vela Amieva del CINVESTAV, el Dr. Víctor Varela Guerrero de la Facultad de Química de la UAEM, la Dra. Fabiola Monroy Guzmán del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y el Dr. Vojtech Jancik del Centro Conjunto de Investigaciones en Química Sustentable de la UAEM-UNAM.

21 de noviembre de 2019 en el Auditorio Adrián Gilbert en la Universidad La Salle de la Ciudad de México con la participación del Dr. Thomas Eduardo Chávez Miyachi de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad La Salle, el Dr. Carlos Antonio Rius

Alonso de la Facultad de Química de la UNAM, el Dr. Juan Rodrigo Salazar de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad La Salle y el Dr. Gabriel Eduardo Cuevas González-Bravo del Instituto de Química de la UNAM.

Congreso Nacional de Química

La organización del Congreso Mexicano de Química incluyó la presentación de plenarias nacionales e internacionales líderes en su campo de investigación y la realización de actividades como cursos, talleres y simposios de diversos temas de la química contando con la participación de especialistas reconocidos por la comunidad química. Asimismo, se incluyó la presentación de trabajos en modalidad oral y en carteles profesionales y, el Concurso Nacional de Carteles Estudiantiles. El programa de actividades se puede consultar en la Colección Memorias de los Congresos de la Sociedad Química de México en <https://n9.cl/nz63>

En cuanto a la participación, el Congreso Mexicano de Química de 2018 registró un total de 564 asistentes entre expositores, invitados a impartir una plenaria, simposio, cursos y talleres. Se entregaron 44 becas a estudiantes de licenciatura y maestría. Se contó con la participación de 100 voluntarios de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industria Extractivas (ESIQUIE) y de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del IPN. Se presentaron 300 trabajos de aproximadamente de 1,030 investigadores y estudiantes de más de 95 centros y universidades de la República Mexicana. Se realizaron 5 plenarias, 7 simposios, 6 cursos y 2 talleres. En la de Expoquímica se contó con la participación de 4 universidades, 21 empresas, 1 editorial y la Revista Notiexpos y Congresos.

Al Congreso de 2019 asistieron en total 455 personas. Se presentaron 250 trabajos de los cuales 99 fueron trabajos estudiantiles y 91 profesionales en categoría cartel en ambos casos y, 60 profesionales en modalidad oral. Las actividades académicas en este congreso consistieron en 5 plenarias, 6 simposios, 3 talleres y 5 cursos. En la Expoquímica se contó con la participación de 5 universidades, 1 dependencia educativa y 16 empresas del ramo de la industria química.

Se otorgaron becas en la inscripción al Congreso a un total de 49 estudiantes de licenciatura y maestría destacándose este año la participación de una alumna de preparatoria a quien se le otorgó beca de inscripción según la recomendación del Comité Científico Evaluador. Al respecto, dicho Comité estuvo integrado este año por 80 especialistas de las diferentes áreas de la química que, además de evaluar el 100% de los trabajos, emiten recomendaciones para el otorgamiento de las becas a los alumnos de licenciatura y maestría según los requisitos de la convocatoria anual.

También, se contó con la participación de 58 voluntarios de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y el apoyo de la Sección Estudiantil de la SQM de la UAM Iztapalapa.

Journal of the Mexican Chemical Society

Durante el periodo abarcado, hemos trabajado por el fortalecimiento y actualización del *Journal of the Mexican Chemical Society* por ello, la plataforma de la revista se actualizó a su versión más estable 3.1.2.0 y se ha trabajado continuamente en ofrecer una apariencia más dinámica. También, es importante mencionar que todas sus publicaciones cuentan con DOI.

A partir de mayo de 2019 el Dr. Alberto Vela, Profesor-Investigador del CINVESTAV y miembro del Comité Ejecutivo Nacional de la SQM, funge como Editor en jefe de la revista y se encuentra implementando estrategias que proyecten a la revista a un nuevo nivel. Actualmente el J. Mex. Chem. Soc. cuenta con una cartera de 20 editores asociados expertos en diferentes áreas de la química. De acuerdo con SJR, el Journal mantiene su posición en Q3 desde 2013. Además, de acuerdo con Scopus, las métricas de la revista son:

CiteScore 2018	0.65
SJR 2018	0.182
SNIP 2018	0.271

La plataforma actual reporta el siguiente número de usuarios:

	2017	2018	2019
usuarios	185	807	2743
revisores	--	179	406
autores	--	278	416

La revista tiene presencia a nivel internacional con una audiencia de 4,600 visitas por mes.

Webinars

El programa de webinars en el área de la investigación se ha robustecido gracias a la versatilidad de este programa ya que, al no verse limitado por la asistencia presencial de los ponentes y los asistentes hemos contado con conferencistas de diferentes universidades del país. En 2018 se realizaron siete webinars y 7 más en 2019, entre los que podemos mencionar:

2018

- Nuevas propuestas metodológicas para la preparación de Isonitros de interés sintético y farmacológico, impartido por el Dr. J. Armando Luján Montelongo del CINVESTAV.
- El rol del enlace de hidrógeno en el reconocimiento molecular y la organocatálisis bifuncional, impartido por el Dr. Marcos Hernández Rodríguez del Instituto de Química de la UNAM.
- Calorimetría de alimentos, impartido por el IQI. Antonio Valencia Bravo de EQUIPAR.

2019

- Elementos sintéticos: ¿Cómo se producen, para qué se usan? ¿Nos estamos acercando ya al final de la Tabla Periódica?, impartido por la Dra. Fabiola Monroy del ININ.
- La Aproximación del «Quirón» en Síntesis Orgánica. (El caso de los Carbohidratos), impartido por el Dr. Fernando Sartillo-Piscil de la BUAP.
- Grafeno: ¿El material que revolucionará el mundo?, impartido por la Dra. Mildred Quintana Ruiz del Instituto de Física de la UASLP.

Colaboración con Sociedades de otros países

Como resultado del trabajo iniciado en 2015 para establecer lazos de colaboración internacional, en 2018 se llevó a cabo el *Atlantic Basin Conference on Chemistry* en el hotel Iberostar de Cancún, Quintana Roo, México. Fue el primer congreso de su tipo



organizado por la Sociedad Química Americana (ACS), la Sociedad Química de México (SQM), la Asociación Europea de Ciencias Químicas y Moleculares (EuChemS), la Sociedad Canadiense de Química (CSC) y la Sociedad Brasileña de Química (SBQ), contando además con la participación del Instituto Sur Africano de Química (SACI), la Federación Asociaciones Africanas de Química (FASC) y la Federación Latinoamericana de Asociaciones Químicas (FLAQ).

El propósito principal de este evento fue acercar a los colegas químicos de los países de la cuenca atlántica. Así, por una parte, se reforzaron las colaboraciones entre América y Europa y, por la otra, se estableció contacto con los colegas de los países africanos. Se contó con la asistencia total de 204 personas de 22 países, entre las que se pudieron contar con 8 plenaristas, 77 presentadores de trabajos orales, 98 de carteles y 19 becarios mexicanos.

4. Gestión a favor de la Química

La interlocución con diferentes asociaciones dedicadas a la química se ha fortalecido gracias al programa de webinars de la Sociedad Química, pudiendo consolidar en el bienio 2018-2019, los lazos establecidos con la ACS desde 2015 y logrando establecer convenios de colaboración con la Sociedad de Químicos Cosmetólogos de México y Sintoquim, empresa líder en la comercialización de materias primas y especialidades de la industria cosmética. Ejemplo de los convenios establecidos son los siguientes webinars.

Con ACS se han realizado quince webinars entre los que se encuentran:

- Reflexiones sobre Nanotecnología en el Año Internacional de la Tabla Periódica, impartido por el Dr. Luis M. Liz Marzán del Centro de Investigación Cooperativo en Biomateriales.
- Diversidad e Inclusión: Progreso Hacia una Cultura de Respeto, impartido por la Dra. Ingrid Montes de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río.

- Determinación de densidades electrónicas experimentales a través de difracción de rayo X, impartido por el Dr. Vojtech Jancik de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cómputo Cuántico para Química, impartido por el Dr. Alán Aspuru-Guzik de la Universidad de Toronto.
- La Química e Ingeniería Sostenible y Verde: Herramienta Innovadora en la Industria Farmacéutica, impartido por la Dra. Isamar Martínez de ACS Green Chemistry Institute.

Con la Sociedad de Químicos Cosmetólogos de México se realizaron diez webinars entre los que se encuentran:

- Estabilización de emulsiones mediante nanopartículas, impartido por el Dr. Néstor Mendoza Muñoz Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Colima.
- Código de autorregulación publicitaria para el sector cosmético y del cuidado personal: COSMEP, impartido por la Lic. Rosa Ma. Sánchez Maldonado, Directora Senior de Comercio y de Publicidad en la Cámara Nacional de la Industria de Productos Cosméticos (CANIPEC).
- Tendencias en el mercado cosmético 2018-2020, impartido por el IQ. Miguel Ángel Marín De La Parra, Director General de Industrias Sintoquim.

Con la empresa Sintoquim se realizaron tres webinars:

- Beneficios de los Nutricéuticos en el proceso de Envejecimiento, impartido por la Lic. Verónica Sierra de Industrias Sintoquim.
- Fórmulas Binarias, el camino para eficientar su producción de Tintes Capilares, impartido por el I.Q. Alberto Nassim Pineda, Gerente de línea de *HairCare&Coloration and Fragrances* de Industrias Sintoquim.
- MICROESFERAS *Small Spheres-Big Impact*. Partículas de tamaño micrón para mejorar el aspecto y sensorial en formulaciones de maquillaje y color, impartido por la QFB. Melody Yazmin Salgado Durán de Ventas y desarrollo de Negocios en Industrias Sintoquim.



Cambio de Mesas Directivas SQM. Arriba: Dr. Raúl Cerna, Dr. Alberto Vela, Dr. Carlos Rius, Dra. Violeta Mugica, Dra. Itzel Guerrero, Dr. Alfonso García, Dra. Itzia Padilla, Dra. Rocío Redón, M. en C. José Manuel Méndez y Dr. Joaquín Palacios. Abajo: Dra. Lena Ruiz, M. en C. Rosa María Catalá, Dr. Ignacio González, Dra. María del Jesús Rosales, QFB. Alejandra Crisanto, Dra. Fabiola Monroy y Dr. Gabriel Cuevas.

Plan de Trabajo 2020-2021

Ignacio González Martínez

Gracias a la experiencia que he obtenido después de seis años participando en las mesas directivas de la Sociedad Química de México A.C. (SQM) y teniendo como principal objetivo que la SQM sea el referente nacional en cuanto a instancias especializadas en química, el plan de trabajo que presento a continuación subraya la importancia de la presencia de los profesionales de la química en las decisiones que determinarán el futuro energético, social y económico del país¹.

El principal objetivo de la gestión 2020-2021 será establecer una conciencia de gremio para sentirnos orgullosos de ser químicos y demostrar la relevancia del trabajo de los químicos y las químicas. De este modo, la conciencia de gremio debe impulsar el propósito de hacer que la SQM sea un referente nacional para cuestiones químicas.

Para ello, se trabajará a partir de 3 ejes principales: educación, investigación e industria, mismos que contarán con comisiones ex profeso, de acuerdo con lo establecido en los Estatutos de la SQM, lo que permitirá hacer más eficiente el trabajo de cada una.

Otro aspecto que es significativo para el trabajo próximo de la SQM, es promover a través de sus actividades la apropiación social de la ciencia, aportando información y alternativas de solución a los problemas cotidianos, así como la participación en la discusión de los grandes problemas nacionales, donde la química juega un papel importante, tales como hidrocarburos, salud, medio ambiente y energía.

Se trabajará también en el fortalecimiento del eje de la industria, favoreciendo la participación de sociedades hermanas como CONIQQ e IMIQ, con las que conformamos la Unión Química.

Cabe mencionar que este año se tomará como tema común de las actividades de la Sociedad Química de México, los Objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la ONU, buscando establecer comunicación con entidades gubernamentales, agrupaciones gremiales e instituciones educativas, a fin de mostrar el papel de la química en la solución de problemas globales y la importancia de trabajar unidos para resolver situaciones puntuales con impacto global.



Producido en colaboración con TROLLBACK COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1.212.529.1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: dpc@campaign@un.org

¹Basado en el mensaje con motivo de la celebración del Día del Químico en México en el 2019 del M. en C. Enrique Aguilar Rodríguez.

Fallece el IQI. Jesús Ávila Galinzoga, Expresidente del Decanato del IPN

Enrique Antonio Balanza y Torres

El deceso del Ing. Jesús Ávila Galinzoga se dio a conocer el 8 de febrero del 2019 en la Ciudad de México. Nació en Michoacán en 1927 por lo que hubiera cumplido 92 años, siendo conocido por su calidad humana y por su cualidad positiva que le ayudó a generar resultados vinculados a la fuerza y valor de sus servicios académicos con eficacia e integridad de ánimo.

Contaba con más de seis décadas de trayectoria profesional, tanto en empresas de la industria química, como en la docencia y en la administración de la educación superior en el Instituto Politécnico Nacional (IPN), donde alcanzó la jubilación.

Siempre mantuvo disponibilidad para su *alma mater*, consciente de la lucha permanente por el desarrollo de su institución. Su manera de ser se asemejaba a la expresión del poeta alemán Eugene Bertolt Frederich Brecht, quien mencionó: "Hay hombres que luchan un día y son buenos, otros luchan un año y son mejores. Hay quienes luchan muchos años y son muy buenos, pero están los que luchan toda la vida y son indispensables".

Egresó de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE), como Ingeniero Químico Industrial. Su tesis fue dirigida por los ingenieros Estanislao Ramírez Ruiz y Alberto Urbina Razo, ambos, destacados académicos y profesionistas de la industria química.

Prestó sus servicios profesionales en Productos Básicos, S.A.; Industria Nacional Químico Farmacéutica, S.A.; División Cloromex; Construcción de Plantas Electrolíticas; Compañía Friederick Un en Alemania y en Fertimex, en el área de Estudios de Investigación y Desarrollo.

En la docencia, en la ESIQIE fue profesor en las materias de Elementos de diseño, Diseño de equipos, Diseño de plantas químicas, Costos y presupuestos. Fue miembro del Consejo Técnico Consultivo y Maestro Decano de la misma institución y fungió como director de ésta en tres ocasiones, nombrado por la Dirección General del IPN. Durante su gestión se crearon las maestrías de Ingeniería Química e Ingeniería Metalúrgica y se gestionó la entrega de laboratorios pesados de estas ramas respectivamente.

Fue presidente del Decanato del IPN de 1998 al 1° de enero de 2016 (17 años aproximadamente). Durante ese periodo se gestionó el Código de Ética del IPN, la Expresión Escultórica del IPN, los escudos del IPN, el Desarrollo Histórico del Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos "Juan de Dios Bátiz Paredes", la Memoria de 55 años de actividades de la ESIQIE, los 70 años de Historia del IPN y la Educación Técnica en México. Además, la presidencia del Decanato mantuvo la publicación de *El Cronista Politécnico* entre otros.

Recibió varias distinciones, entre las que se pueden mencionar:

- Egresado distinguido de la Asociación de Egresados de la ESIQIE.
- Académico de Número de la Academia Mexicana de Ingeniería.
- Premio Nacional "Estanislao Ramírez Ruiz" del IMIQ.
- Premio Nacional de Química "Andrés Manuel del Río" de la Sociedad Química de México, entregado por el C. Presidente Miguel de la Madrid.
- Premio Nacional "Ernesto Ríos del Castillo" del CONIQQ.
- Medalla al Mérito Docente "Ignacio M. Altamirano", entregada por la SEP por 40 años de servicio.
- Presea "Lázaro Cárdenas del Río", por méritos académicos en el IPN, entregada por el C. Presidente Ernesto Zedillo Ponce de León.

Inclusive Enrique Fernández Fassnacht, Director General del IPN en ese entonces, le entregó un reconocimiento por sus 60 años de trayectoria profesional "por el apoyo que siempre ofreció al Instituto, siendo pieza clave para su crecimiento y consolidación". Fernández Fassnacht resaltó también, que se trataba de un politécnico comprometido con su institución, que brindó su conocimiento y experiencia en beneficio de los estudiantes de su *alma mater*, atento siempre con responsabilidad y gran amor.

El Ing. Ávila Galinzoga en esa ocasión expresó: "A mí me gusta sumar y he sumado los años de trayectoria de cada uno de los 59 miembros del Decanato. Son ellos quienes conocen perfectamente al Politécnico y día con día dan lo mayor de sí". En el mismo evento, Víctor Manuel Alcérreca Sánchez, expresidente del Consejo de Egresados de la ESIQIE señaló que Ávila Galinzoga ha sido una figura emblemática, primero como profesor y posteriormente como director. [1]

Otra organización que le reconoció, fue la asociación civil Burros Blancos Booster, haciéndole entrega de la medalla "Touchdown de Plata" constituida por egresados ex jugadores de fútbol americano del IPN, que se equipara a los méritos que deberían de reconocerse en vida, como la obra "En vida, hermano, en vida" de la poeta Ana María Rabatté y Cervi.

Asimismo, recibió un homenaje póstumo con motivo de sus 64 años de trayectoria profesional por parte del Consejo de Egresados de la ESIQIE, la Dirección General del IPN y el Cuerpo de Decanos del IPN.

Referencias

1. "Homenaje al decano Ávila Galinzoga en el Politécnico", *La Jornada*, 16 de diciembre de 2015. Consultado en <https://www.jornada.com.mx/2015/12/16/sociedad/038n2soc>
2. El Cronista Politécnico
3. Entrevistas a egresados de ESIQIE

Baterías de Ion Litio: para mayor beneficio de la humanidad

Gregorio Guzmán-González*

Resumen

Las baterías de iones de litio (BILs, Lithium-Ion batteries) son uno de los mejores ejemplos de cómo la química puede transformar la vida de las personas. Por tal motivo, la Real Academia Sueca de Ciencias concedió el Premio Nobel de Química 2019 a tres científicos: John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham y Akira Yoshino quienes sentaron las bases para el desarrollo de las BILs y han propiciado las condiciones necesarias para el impulso de la electromovilidad.

Palabras clave: *Baterías de Ion Litio, Premio Nobel de Química 2019.*

Las baterías de iones de litio (LIBs, por sus siglas en inglés: Lithium-Ion batteries) BILs y el almacenamiento de energía en general, han tenido un impacto significativo en el desarrollo de la electromovilidad, desde dispositivos de portátiles como teléfonos celulares, tablets y laptops, hasta dispositivos de mayor escala como los automóviles eléctricos, cambiando el uso de combustibles fósiles por electricidad, lo que permite mitigar el cambio climático reduciendo el uso de combustibles fósiles mediante el almacenamiento de energía limpia (por ejemplo, solar y eólica), para electrificar el planeta; esto representa uno de los impactos sociales más trascendentes desde el punto de vista tecnológico.

El resultado de los trabajos desarrollados por los investigadores John Goodenough, Stan Whittingham y Akira Yoshino llevó a la comercialización de las LIBs en 1991. No obstante, este trabajo

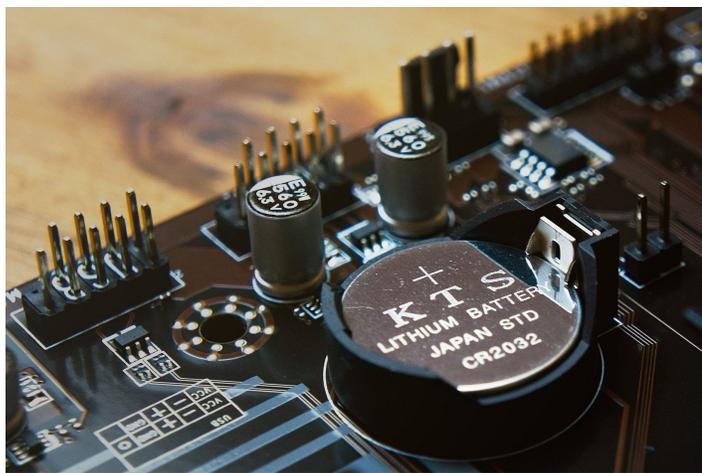
comenzó en 1973, en respuesta a los problemas energéticos generados por la primera crisis petrolera. El Dr. Whittingham comenzó a buscar nuevas formas de almacenar energía de fuentes renovables, lo que lo llevaría a la creación de la primera batería de litio, desarrollada a partir de disulfuro de titanio, un material capaz de alojar iones litio en los intersticios de su estructura molecular. Esta batería que utilizaba litio metálico como ánodo, permitía obtener voltajes hasta de 2.2 V vs. Li^0/Li^+ ; no obstante, presentaba un problema asociado al crecimiento dendrítico sobre los electrodos de litio metálico, principalmente a altas velocidades de carga/descarga, provocando corto circuitos, por lo que este tipo de baterías fue considerado como un dispositivo altamente peligroso para ser viable.

Las investigaciones del Dr. Goodenough, lo llevaron a predecir la capacidad del óxido de cobalto (II) (CoO) para almacenar iones litio de forma reversible mediante la formación de óxido de litio-cobalto (LiCoO_2). El hecho de que las reacciones óxido-reducción de la estructura molecular del LiCoO_2 , necesaria para los procesos de inserción/desinserción de iones de litio en la estructura del LiCoO_2 requiriera de un potencial mayor, daría lugar a su aplicación como cátodo, al incrementar hasta 4.2 V vs. Li^0/Li^+ el voltaje de las LIBs.

Por otro lado, en las investigaciones del Dr. Yoshino se demostró el uso de electrodos desarrollados a partir de materiales carbonáceos (coque de petróleo), los cuales tendrían la capacidad de almacenar iones de litio de forma reversible en su estructura molecular. Esto permitiría remplazar al uso de litio metálico como ánodo y la fabricación de LIBs que solo utilizan materiales capaces de intercalar iones de litio, que son más ligeras y seguras.

Las recién comercializadas baterías de iones litio junto con la revolución de dispositivos electrónicos de los años 90, dieron paso al surgimiento de nuevas áreas de investigación científica y tecnológica, centradas en el diseño de nuevos materiales capaces de almacenar y transportar iones de litio. Además, su implementación en dispositivos de almacenamiento de energía fue a diferentes escalas: desde baterías para dispositivos médicos portátiles como marcapasos, hasta la batería de 100 megavatios fabricada por TESLA en Australia del Sur (considerada como la batería más grande el mundo en 2018).

El proceso de evolución de las LIBs se ha desarrollado entorno a tres aspectos fundamentales: el incremento de la densidad de energía, la densidad de potencia y la seguridad durante la operación. El primer aspecto, densidad de energía, se refiere a la cantidad de energía almacenada por gramo de los materiales activos y se presenta en función de su potencial de óxido-reducción o potencial de trabajo (electrodos de alto voltaje, $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ de 5.0 V vs. Li^0/Li^+) y su capacidad de almacenamiento de carga (cátodos ricos en iones de



Batería ion-litio.

*Universidad del País Vasco UPV/EHU.
*gregguzmn@gmail.com

litio, por ejemplo: $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{Mn}_{0.54}\text{O}_2$). No obstante, el voltaje de las LIBs está determinado por la compatibilidad de todos los componentes del sistema, incluyendo el ánodo, el electrolito, el cátodo y sus respectivas interfases. El segundo factor, la densidad de potencia se refiere a la potencia por densidad de volumen que involucra la velocidad de transferencia de Li^+ a través del electrolito durante los procesos de carga/descarga de las LIBs, donde generalmente se llevan a cabo reacciones interfaciales secundarias que determinan el rendimiento electroquímico. El problema de seguridad, que se considera como el tercer factor, ha sido abordado a partir de la sustitución de las soluciones electrolíticas por electrolitos de estado sólido. Aquí, el uso de electrolitos poliméricos ha sido presentado como una opción factible al considerar características intrínsecas favorables tales como facilidad de síntesis, bajo costo de producción, buena estabilidad, excelente compatibilidad con sales de litio, además de excelente estabilidad mecánica, química y electroquímica.

Desde la aparición de la primeras LIBs, se han abierto una gran cantidad de líneas de investigación en torno a este tema, desde el diseño de materiales para su uso, como electrodos o electrolitos y la optimización del conjunto de éstos, en el contexto de incrementar la eficiencia de los dispositivos de almacenamiento de energía. En opinión del Dr. Guihua Yu, profesor de la Universidad de Texas en Austin, el premio Nobel de Química de 2019 fue atribuido a los investigadores que sentaron las bases para el desarrollo de las LIBs, mismas que han tenido un alto impacto en la sociedad moderna. El impacto será aún más importante con el continuo desarrollo de la invención de materiales para baterías más sostenibles y energéticamente eficientes, y jugará un papel central en la habilitación de un futuro renovable y sostenible para la humanidad.

Por otro lado, el Dr. Yair Ein-Eli, profesor del Instituto de Tecnología de Israel, considera que la asignación del premio Nobel podría tener dos efectos opuestos: por una parte, el público y los responsables políticos declararían ahora que la tecnología está suficientemente madura y podrían considerar la posibilidad de detener cualquier patrocinio de trabajos adicionales sobre este vasto tema de investigación, lo que sería un error. Por otra parte, el deseo de traer nuevas tecnologías electroquímicas que serán designadas como tecnologías "post Li-ion" crecerá y seremos testigos de más investigación y enfoques en esta dirección. El Dr. Michael Thackeray, científico emérito del Laboratorio Nacional de Argonne, considera que los sistemas electroquímicos alternativos, por ejemplo, utilizando cátodos de azufre u oxígeno en combinación con un ánodo de litio metálico, serán una alternativa factible; no obstante, representan una tarea sumamente difícil, al considerar la complejidad de los sistemas, los cuales deben ser abordados desde un punto de vista multidisciplinario.

En este sentido el Dr. Qiang Zhang, profesor de la Universidad de Tsinghua, considera que la contribución de los galardonados con el actual premio Nobel de Química, confirma la importancia de su investigación en el campo de sistemas de almacenamiento de energía, particularmente LIBs, y su impacto en la sociedad. A pesar del éxito de la actual química energética de las LIBs, aún quedan muchos retos desde el punto de vista científico y tecnológico por superar en el campo. Por ejemplo, el entendimiento de los mecanismos de transporte de iones de litio a través de la interfase electrolito/electrodo, la razón de la introducción de altos sobrepotenciales en los electrodos de trabajo, y la explicación cómo esto podría hacer factible el desarrollo de sistemas de LIBs con una densidad de energía de $500\text{-}700\text{ Wh kg}^{-1}$ con más de 1000 ciclos, o con una vida útil de más de 20 años.

Conclusión

Las aportaciones científicas y tecnológicas de John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham, y Akira Yoshino han tenido un gran impacto en el desarrollo de la sociedad moderna. En respuesta a uno de los mejores ejemplos de cómo la química puede ser utilizada para el beneficio de la humanidad, les fue concedido el premio Nobel de Química 2019. Sus aportaciones en el campo de las LIBs han sentado la base para la transición del uso de energías provenientes de fuentes fósiles, hacia el aprovechamiento de las energías renovables, además de brindar las condiciones propicias para el desarrollo de la electromovilidad. No obstante, los grandes beneficios generados por la química propuesta están acompañados de nuevos grandes retos que, como se ha expuesto en esta ocasión, deben ser superados mediante el trabajo sinérgico y multidisciplinario de la ciencia y tecnología.

Referencias

1. R. V. Noorden, The rechargeable revolution: A better battery, *Nature* 507, 2014, 26–28.
2. The Nobel Prize in Chemistry 2019, The Royal Swedish Academy of Sciences, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/>. (Fecha de acceso: abril 21, 2020).
3. South Australia's Tesla battery on track to make back a third of cost in a year. <https://www.theguardian.com/technology/2018/sep/27/south-australias-tesla-battery-on-track-to-make-back-a-third-of-cost-in-a-year> (Fecha de acceso: abril 21, 2020).
4. 2019 Chemistry Nobel Prize Journal Articles from AIP Publishing. <https://www.aip.org/science-news/nobel/chemistry2019/articles> (Fecha de acceso: abril 21, 2019).

Análisis y estudio de la viabilidad del uso de polipirrol sobreoxidado en membranas de intercambio catiónico

Luz María Torres Rodríguez^{1*}, Antonio Montes Rojas¹, Oscar Israel Vega López¹

Resumen

En este escrito se describen brevemente las razones por las que la estructura química del polipirrol sobreoxidado (PPy-Sox) le confiere selectividad a los cationes y cómo esta propiedad podría ser aplicada a la elaboración de una membrana de intercambio catiónico (MIC). También se señala la importancia y características de las MIC, así como las posibles ventajas de las MIC a base de PPy-Sox en relación con las MIC comerciales. Finalmente, se aportan evidencias experimentales que confirman que el PPy-Sox puede ser usado como una MIC.

Abstract

In this work is briefly described the reasons why chemical structure of the super-oxidized polypyrrole (O-PPy) provides permselectivity to cations and how this property could be applied to elaborate a cation exchange membrane (CEM). It is also pointed out the importance and characteristic of MIC, as well as the possible advantages of CEM based on O-PPy in relation to commercial CEM. Finally, experimental evidences that confirm that O-PPy can be used as CEM are exhibited.

Palabras clave: membranas de intercambio catiónico, electrodiálisis, polipirrol sobreoxidado.

Keywords: cation exchange membranes, electro dialysis, overoxidized polypyrrole.

Membranas de intercambio iónico

Las membranas de intercambio iónico (MII) o selectivas son materiales poliméricos cuya principal característica es la de permitir el paso, a través de ellas, únicamente a especies con cierto tamaño y carga (contraiones). Esta propiedad se denomina selectividad y es el fundamento de diversas aplicaciones de estos materiales que abarcan dominios tan diversos como la separación de una especie de interés (electrodiálisis o deionización capacitiva) o la generación de energía (gradientes de salinidad o celdas de combustible). La selectividad de una MII está influenciada por diferentes efectos entre los cuales se encuentra la naturaleza química de los grupos ionizables fijos que posee en su seno y que, al ponerlos en contacto con una solución, por ejemplo, acuosa, dan lugar a cargas fijas. Estas cargas, según su signo, pueden rechazar (coiones) o absorber (contraiones) especies iónicas presentes en la solución con la que están en contacto (Figura 1). En otras palabras, las repulsiones o atracciones electrostáticas entre estos grupos y los iones que intentan atravesarla son en parte las responsables de la selectividad de una membrana selectiva.

Así, se ha encontrado que mientras más alta sea la cantidad de cargas en la membrana, más alta será la selectividad que presente, en virtud de que las interacciones electrostáticas son más intensas con las especies presentes en solución. Según el signo de la carga de los grupos fijos y su proporción en la membrana se pueden tener membranas selectivas a los aniones o a los cationes [1]. Además de las cargas fijas, las MII deben presentar baja resistencia eléctrica, buena estabilidad mecánica, alta estabilidad química y bajo costo [2, 3].

Electrodiálisis

El proceso de electrodiálisis se esquematiza en la Figura 2, en donde dos soluciones están separadas por una MII, durante el proceso se aplica un campo eléctrico que actúa como la fuerza impulsora que permite el paso de las especies de un compartimento a otro a través de la MII. El campo eléctrico se aplica por medio de dos electrodos colocados en cada una de las soluciones separadas por una MII. Las especies a separar son iones cargados, y en consecuencia, los iones positivos migran hacia el cátodo, en tanto que los negativos lo harán hacia el ánodo. Sin embargo, dado que la MII posee cargas fijas, sólo podrán atravesarla las cargas de signo contrario a las cargas inmovilizadas en la MII; las del mismo signo no podrán atravesarla debido a la repulsión electrostática [4]. Las MII cargadas positivamente permiten el paso de los aniones (Figura 2a) y se denominan membranas de intercambio aniónico (MIA), en tanto que las MII con cargas negativas repelen a los aniones y son atravesadas por los cationes (Figura 2b) y se conocen como

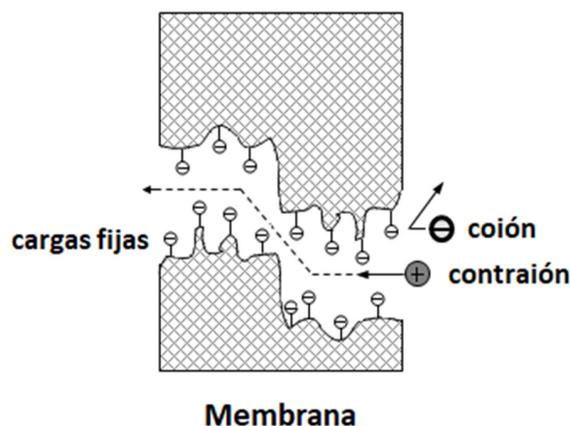


Figura 1. Representación esquemática del efecto de las interacciones electrostáticas, en un microcanal de una membrana, sobre la selectividad [Elaboración propia].

^{1*}Universidad Autónoma de San Luis Potosí

*luzmaria@uaslp.mx

membranas de intercambio catiónico (MIC). En las MIA existen prioritariamente los grupos $-NR_3^+$ y en las MIC se encuentran los grupos $-SO_3^-$ [1]. De esta forma, en electrodiálisis se separan iones a partir de una mezcla de acuerdo al signo de sus cargas. Este método de separación es de gran importancia debido a su amplia gama de aplicaciones como: desalinación de aguas salobres y agua de mar, tratamiento de aguas residuales, obtención de agua ultrapura, recuperación y/o separación de ácido láctico y el tratamiento de bebidas en la industria alimenticia [4].

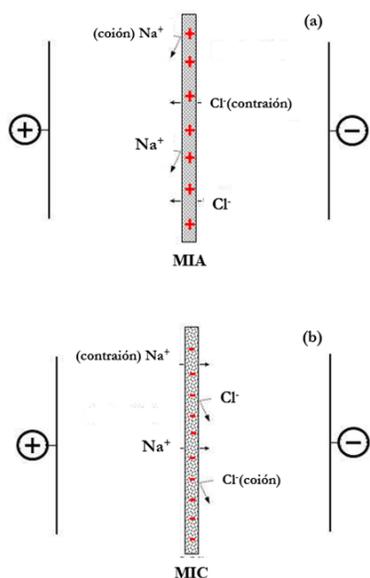


Figura 2. Representación esquemática del proceso de electrodiálisis en una celda de dos compartimentos empleando una MIA (a) y una MIC (b) [Elaboración propia].

Polipirrol sobreoxidado

El polipirrol sobreoxidado (PPy-Sox) se sintetiza oxidando irreversiblemente al polipirrol (PPy), el cual pertenece al grupo de los polímeros conductores electrónicos (PCE). Éstos se caracterizan porque su cadena polimérica presenta alternancia de simples y dobles enlaces [5]. Esta configuración permite la conductividad eléctrica debido a que cuando el PCE se oxida, el electrón se deslocaliza a lo largo de la cadena polimérica (Figura 3). También el PCE adquiere carga positiva durante su oxidación y, para neutralizarla, los aniones del medio se incorporan a la cadena polimérica.

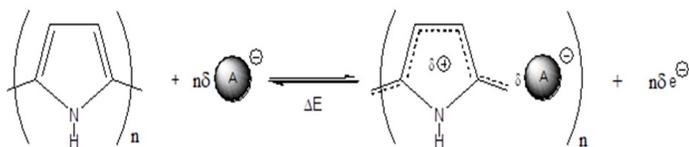


Figura 3. Reacción de oxidación electroquímica del PPy. δ corresponde al grado de dopado (fracción de unidades monoméricas deslocalizadas), ΔE es la diferencia de potencial aplicada al electrodo, y A- es el anión del medio [6].

La estructura química del PPy-Sox (Figura 4) presenta diferencias importantes con respecto a la del PPy, por lo que sus propiedades son distintas. Por ejemplo, el PPy-Sox es selectivo a los cationes, es decir, puede ser atravesado por cationes, pero no por aniones. Esta propiedad se ha atribuido a los grupos funcionales presentes en el PPy-Sox, como carbonilos [7-9], oxhidrilos [8-9] y carboxilos [9]. Los grupos carboxilo y oxhidrilo se ionizan en solución acuosa, lo que da lugar a la formación de cargas fijas negativas en la estructura del PPy-Sox. Por otra parte, en diferentes trabajos se ha propuesto que la alta densidad electrónica de los grupos carbonilo genera repulsión electrostática hacia las cargas negativas, impidiendo su paso [10]. Adicionalmente, se ha encontrado que el PPy-Sox retiene en su estructura a los aniones incorporados durante su oxidación [11]. Dado que, por ejemplo, en el caso de la polianilina sobreoxidada, las cargas fijas corresponden principalmente a los aniones incorporados durante la sobreoxidación [12], es posible que en el caso del PPy-Sox los aniones inmovilizados actúen también como cargas fijas. Los grupos funcionales del PPy-Sox interrumpen la alternancia de simples y dobles enlaces, por lo que el PPy-Sox (a diferencia del PPy) no es un polímero conductor electrónico. Sin embargo, la presencia de grupos ionizables en el PPy-Sox le confieren conductividad iónica [10].

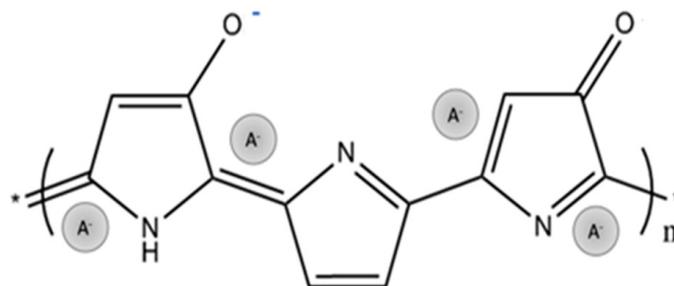


Figura 4. Representación de la estructura química del PPy-Sox, de acuerdo a los reportes de la literatura [13].

La selectividad hacia los cationes del PPy-Sox ha sido aplicada en la elaboración de sensores selectivos de dopamina [14] y en la extracción de especies a partir de soluciones [15]. Hasta donde conocemos este material no ha sido aplicado en la elaboración de MIC, a pesar de presentar características particulares de -cargas fijas negativas- y generales de una MII como conductividad iónica, estabilidad química, baja resistencia eléctrica, y ser de bajo costo. Adicionalmente, el uso de PPy-Sox como MIC tiene potenciales ventajas sobre las MIC comerciales; por ejemplo, algunos estudios han mostrado que la selectividad del PPy-Sox se puede modular variando las condiciones de síntesis y que tiene propiedades antiensuciamiento [16].

Evaluación del polipirrol sobreoxidado como MIC

El uso de PPy-Sox como una MIC, ha sido evaluado por nuestro grupo de trabajo. El estudio se dividió en dos partes: (1) la síntesis y caracterización del PPy-Sox y (2) el estudio de las propiedades selectivas.

La MIC a base de PPy-Sox estuvo formada por dos componentes: un soporte que fue de papel encerado, y el depósito de PPy-Sox. Éste fue elaborado sintetizando primero electroquímicamente el

PPy, para posteriormente someterlo a una sobreoxidación por imposición de un potencial constante. El material así obtenido fue analizado por espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier. Los espectros presentaron las bandas características de grupos carbonilo, oxhidrilo y perclorato (aniones presentes durante la oxidación), siendo esto congruente con lo reportado para PPy-Sox. También se midió el ángulo de contacto, resultando que el PPy-Sox tiene un valor más pequeño que el del PPy, lo cual indica que el PPy-Sox es más hidrofílico que el PPy. La diferencia es debida a los grupos hidrofílicos del PPy-Sox. El análisis de microscopía electrónica de barrido mostró que la morfología del PPy-Sox es distinta de la del PPy, probando que la sobreoxidación afecta la morfología. Finalmente, se determinó la resistividad del PPy-Sox y del PPy con el método de cuatro puntos. El PPy-Sox tuvo mayor resistividad que el PPy, debido a que el PPy-Sox (a diferencia del PPy) no es un conductor eléctrico. Estos resultados muestran que el material obtenido corresponde efectivamente al PPy-Sox.

En la última parte del estudio se evaluó si el PPy-Sox presenta el comportamiento de una MIC, para lo cual se realizaron pruebas cronopotenciométricas. Las curvas obtenidas mostraron el comportamiento típico de una MIC. Del análisis de éstas se dedujo que el PPy-Sox es un material cuya distribución de cargas y/o morfología es heterogénea.

En conclusión, en este trabajo se muestra que el PPy-Sox presenta características de una MIC. Las evidencias experimentales prueban que es posible realizar una separación selectiva de cationes por electrodiálisis usando PPy-Sox como MIC.

Referencias

1. Xu, T. J. *Membr. Sci.* **2005**, *63*, 1-29.
2. Stathmann, H.; Grabowski, A.; Eigenberg, G. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, *52*, 10364-10379.
3. Mizutani, Y. J. *Membr. Sci.* **1990**, *49*, 121-144.
4. Nagarale, R. K.; Gohil, G. S.; Shai, V. K. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2006**, *119*, 97-130.
5. MacDiarmid, A. G. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2001**, *40*, 2581-2590.
6. Adaptada de: Bidan, G., 1995. Sensing effects in electroconducting conjugated polymers. In: G. Harsányi, ed., *Polymer Films in sensor applications*, 1st ed. Budapest: Technomic, pp.206-260.
7. Li, Y.; Qian, R. *Electrochim. Acta* **2000**, *45*, 1727-1731.
8. Rodríguez, I.; Scharifker, B. R.; Monstany, J. J. *Electroanal. Chem.* **2000**, *49*, 117-125.
9. Palmisano, P.; Maltesta, C.; Centonze, D.; Zamboni, P. G. *Anal. Chem.* **1995**, *67*, 2207-2211.
10. Hsueh, C.; Brajter-Toth, *Anal. Chem.* **1994**, *66*, 2458-2464.
11. Jaramillo, A.; Spurlock, L. D.; Young, V.; Brajter-Toth, A. B. *The Analyst* **1999**, *124*, 1215-1221.
12. Mondal, S.; Sangaranarayanan, M. V. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2016**, *18*, 30705-30720.
13. Adaptada de: Özkorucuklu S. P.; Şahin, Y.; Alsancak, G. *Sensors* **2008**, *8*, 8463-8478
14. Zhuang, Z.; Li, J.; Xu, R.; Xiao, D. *Int. J. Electrochem. Sci.* **2011**, *6*, 2149-2161.
15. Şahin, Y.; Ercan, B.; Şhain, M. *Talanta* **2008**, *75*, 369-375.
16. Gao, Z.; Zi, M.; Chen, B. J. *Electroanal. Chem.* **1994**, *373*, 141-148.

Los intrigantes elementos químicos conocidos como “Tierras Raras”. Historia e importancia

Verónica García Montalvo*

Resumen

¿Cuáles son los elementos químicos conocidos como *tierras raras* y a qué deben su nombre? En este contexto se presenta su historia y se da un vistazo a la enorme importancia de este grupo de elementos químicos en conmemoración el año internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos 2019.

Introducción

William Crookes, quien fuera uno de los científicos más importantes en la Europa del siglo XIX, inventor del tubo de rayos catódicos y descubridor del elemento químico talio, dijo una vez [1]:

“Las tierras raras nos desconciertan en nuestras investigaciones, nos desconciertan en nuestras especulaciones y nos persiguen en nuestros sueños. Se extienden como un mar desconocido ante nosotros, burlándose, mistificando y murmurando extrañas revelaciones y posibilidades.”

Un comentario suficientemente inusual para empezar a hablar de elementos químicos de la tabla periódica, uno de los íconos más importantes en la ciencia. Las *tierras raras* son los elementos químicos pesados ubicados en la primera fila del bloque *f* de la tabla periódica moderna (conocidos genéricamente como lantánidos o lantanoides) y la primera familia de los metales de transición (Grupo 3) mostrados en la Figura 1.

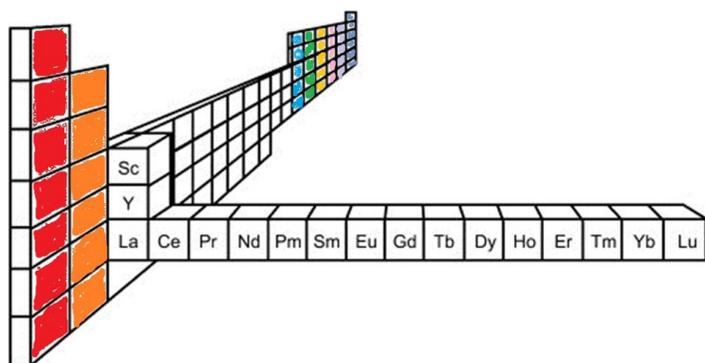


Figura 1. Tierras raras: Sc, Y, La (Grupo 3) y Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu (lantanooides) [Elaboración propia].

Para el tiempo en el que Dimitri Ivánovich Mendeléyev, padre de la tabla periódica, presentara su sistema periódico, solo seis de los diecisiete elementos pertenecientes a las *tierras raras* habían sido descubiertos (1869). Estos seis elementos y los que poco a poco se fueron conociendo, representaron un problema para todos los descubridores del sistema periódico, para quienes el hallazgo de una nueva tierra rara significaba un nuevo enigma. Esto debido a que cada una de las tierras raras mostraba un comportamiento químico muy similar, lo que hacía muy difícil asignarles alguna posición en los arreglos propuestos hasta entonces. Incluso las predicciones que hicieron Mendeléyev o Newland al respecto de elementos por descubrirse con altos pesos atómicos no se materializaron, al contrario de otras predicciones de Mendeléyev que sí lo hicieron y que fortalecieron el esquema propuesto, como el *eka-aluminio* (galio), el *eka-silicio* (germanio) o el *eka-boro* (escandio, que sí pertenece a las tierras raras). Mucho del fracaso se atribuye a la presencia de las desconcertantes tierras raras que no podían ser ubicadas correctamente [1].

El nombre de lantánidos viene del griego *lanthaneis* que significa “yacer escondido” y data del siglo XVIII. Estos elementos fueron conocidos inicialmente como *tierras raras* junto con el escandio, el itrio y el lantano (todos del Grupo 3). El término *tierras raras* se debe a que, inicialmente se identificaron como parte de un nuevo tipo de “tierra”, que era una referencia coloquial a los óxidos metálicos insolubles en agua. El término “raras” tiene su origen en la dificultad para lograr su separación del mineral madre y a la propia separación entre ellos en esa época, debido a sus amplias similitudes químicas. Algunos argumentan aún hoy, que fueron llamadas “raras” porque en un principio se presumía que eran escasos [2, 3] pero en realidad, históricamente era el tiempo de los descubrimientos y no había forma de cuantificar o imaginar la cuantificación de los nuevos elementos descubiertos. El hecho es que las *tierras raras* no son particularmente raras con relación a su abundancia, pues en su mayoría son más abundantes que metales tan conocidos como la plata, el oro, el platino o el mercurio.

En la actualidad, la reserva mundial de *tierras raras* se estima en alrededor de 150 millones de toneladas métricas en forma de óxidos, mientras que el consumo anual fluctúa entre 120,000 - 140,000 toneladas y va en aumento (2.2%) [4, 5]. Por otra parte, la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) recomienda el nombre de *lantanooides* para los elementos que constituyen la primera fila del bloque *f*, sobre el de lantánidos, ya que éste hace una mejor referencia al parecido de estos elementos con el lantano sin incluirlo, porque el lantano no es parte del bloque *f* [6].

*Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma de México
vgm@unam.mx

La Historia

La historia de las *tierras raras* comienza en 1787 cerca de Estocolmo, Suecia, cuando Carl Axel Arrhenius, un oficial del ejército encontró una roca negra extraña a la que llamó *itterbite* por Ytterby (el nombre del pueblo más cercano) [2, 7]. El mineral llegó a manos de Johan Gadolin, un químico finlandés, en 1794, quien lo analizó y descubrió que se trataba de una mezcla de sílice con otra tierra desconocida (un posible óxido metálico), pero no se estableció si realmente se trataba de algún óxido hasta 1808. Gadolin (Imagen 1) llamó a la nueva tierra (óxido) *itterbia*, nombre que más tarde se acortó a *itria* y al mineral de origen se le llamó *gadolinita* en su honor.

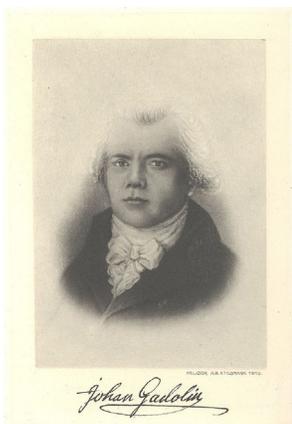


Imagen 1. Johan Gadolin (1760 - 1852) [8].

Aproximadamente una década más tarde, Martin Klaproth, químico alemán descubridor del zirconio, uranio, titanio y cromo, encontró otro mineral al que llamó *cerita*, pero no fue él sino Jöns Berzelius, reconocido químico sueco, y el geólogo Wilhelm Hisinger, quienes aislaron y nombraron al óxido metálico aislado como *ceria*, en honor al asteroide Ceres recientemente descubierto y en alusión a lo que Klaproth había hecho al nombrar al uranio en honor al recién descubierto planeta Urano. Estos dos óxidos, *itria* y *ceria*, eran muy similares, pues no podían extraerse de ellos los metales correspondientes con las técnicas usuales de la época. El aislamiento del cerio a partir de la *ceria* ocurrió hasta finales de la década de 1830, cuando Carl Mosander, pupilo de Berzelius, logró descomponer el óxido usando vapor de potasio y aisló un elemento al que nombró *cerio* (Ce). Además, logró separar otra tierra (óxido) que se hallaba en pequeñas proporciones y la denominó *lantana* (del griego *λανθανεῖν*, “escondido, oculto”), mientras que al nuevo elemento químico que suponía formaba el óxido lo llamó *lantano* (La). También logró separar otro óxido de la *ceria*, la *didimia* (nombre derivado del vocablo griego para “gemelo”), pensando que contenía el elemento *didimio*, pero 44 años más tarde se demostró que no era un sólo óxido, sino que estaba formado en realidad por dos óxidos.

En 1844, Mosander se puso a trabajar con la *itria* (la misma de J. Gadolin, proveniente del mineral *gadolinita*) y encontró que se trataba de un óxido realmente complejo. Además del propio óxido de itrio, descubrió que las muestras de *itria* natural contenían óxido de cerio (*ceria*), óxido de *didimio* (*didimia*), óxido de lantano (*lantana*) y, lo más importante, dos óxidos desconocidos hasta entonces: uno amarillo al que denominó *erbia* y otro rosado al que llamó *terbia*. Tras años de muchos informes falsos de nuevas tierras,

estos dos últimos nombres se confundieron con otros supuestos óxidos y fue hasta 1860 que hubo que acordar formalmente los nombres que debían tener los óxidos realmente conocidos. Esto finalmente resultó en un intercambio de nombres entre los dos últimos óxidos de Mosander; la *erbia* se convirtió en *terbia* y viceversa [9].

Para facilitar el seguimiento de los descubrimientos de minerales, tierras y elementos presentamos un esquema de la procedencia de los descubrimientos (Figura 2).

El trayecto no fue sencillo, pues fue hasta finales de la década de 1870 que los químicos, entonces armados con nuevas técnicas, retomaron las investigaciones de las tierras raras. En 1878, Jean de Marignac, químico suizo, obtuvo nitrato de erbio, supuestamente puro, a partir del mineral *gadolinita*; al calentar éste hasta su descomposición, entonces pudo extraer con agua el ya conocido óxido de erbio (*erbia*), y además un nuevo óxido al que nombró *iterbia*. Al año siguiente, Lars Nilson, químico sueco, separó otra tierra más de la *iterbia*, a la que llamó *escandia* (en honor a Escandinavia) que está formada por el escandio (Sc). El mismo año, Per Cleve, otro sueco, logró aislar tres fracciones de la *erbia*, llamando a las dos nuevas *holmia* (en honor al nombre latino de Estocolmo) y *thulia* (por la legendaria tierra de Thule, nombre antiguo para Escandinavia). Estos óxidos eran los correspondientes óxidos de holmio (Ho) y tulio (Tu).

Poco después, Paul Émile Lecoq de Boisbaudran, químico francés, comenzó a aplicar la novedosa espectroscopía para analizar a las tierras raras y detectó un nuevo óxido en la ya conocida tierra *didimia*, al que llamó *samarita*, porque el mineral en el que estaba trabajando era llamado “*samarskita*” (encontrado por el coronel ruso Vasili Samarski-Bykhovets y nombrado en su honor). De este óxido se aisló el samario (Sm) que curiosamente es el primer elemento químico llamado en honor a una persona.

En 1886, Paul Lecoq aisló otra tierra de la inicial *samarita* y la llamó *gadolinia* en honor a Johan Gadolin por lo que el *gadolinio* (Gd, metal aislado de este óxido) fue el segundo elemento que recibió el nombre en honor a una persona. Ese mismo año, Paul Lecoq aisló otra tierra de la *holmia* y la llamó *disprosia*, del griego que

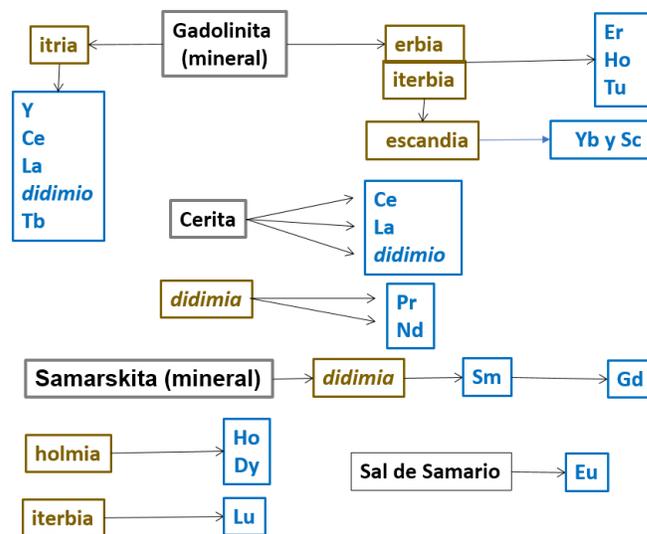


Figura 2: Esquema sobre el descubrimiento de las tierras raras. [Elaboración propia]

significa "difícil de alcanzar", que era el óxido de disprosio (Dy). En 1885, el austriaco Karl von Welsbach logró separar también de la *didimia* otros dos óxidos: la *praseodimia* ("didimia verde", en griego) y la *neodimia* ("nueva didimia" o "nuevo gemelo"); de ellas se pudo identificar a los lantanoides *praseodimio* (Pr) y *neodimio* (Nd).

Ya en el nuevo siglo, 1901, Eugène Demarçay aisló al europio de sales de samario (supuestamente puras), nombrando al nuevo elemento en honor al continente europeo. En 1907, Georges Urbain aisló al lutecio (Lu) que separó de la *iterbia* y que nombró así por el nombre en latín de París, en honor a su lugar de nacimiento [9]. La tenacidad de Urbain fue ejemplar; perfeccionó los procedimientos de separación de los óxidos de las tierras raras, por ejemplo, para la obtención de tulio muy puro, tuvo que realizar 15,000 cristalizaciones.

Al respecto de la ubicación de estos nuevos elementos en la tabla periódica, Georges Urbain viajó a Oxford para reunirse con Henry Moseley después de enterarse de su innovador trabajo sobre la dependencia de la secuencia de los elementos en la tabla periódica con la carga positiva del núcleo, o número atómico (van den Broek), hecho que descubrió gracias a su trabajo experimental midiendo la longitud de onda de los rayos X emitidos por los diferentes elementos. Según la historiografía, Urbain le entregó a Moseley una muestra que contenía una mezcla de tierras raras y lo desafió a identificar qué elementos estaban presentes. Después de aproximadamente una hora, se dice que Moseley sorprendió a Urbain al identificar correctamente la presencia de erbio (Er), tulio (Tu), iterbio (Yb) y lutecio (Lu) en la muestra del francés. La misma hazaña le había llevado a Urbain varios meses a través de métodos de análisis químicos. Urbain luego le pidió a Moseley que le dijera las cantidades relativas de los diversos elementos en la muestra y se sorprendió de nuevo al recibir una respuesta que coincidió casi exactamente con su laborioso análisis químico. El trabajo de Moseley mostró claramente que los elementos sucesivos en la tabla periódica tienen un número atómico mayor en una unidad. A partir de este hecho, comenzó a trabajar para resolver varias controversias sobre los aproximadamente 70 nuevos elementos que habían sido reclamados por varios químicos. Aclaró muchas disputas y logró identificar qué brechas quedaban por llenar en el sistema periódico hasta ese entonces, encontrando que había siete casos por descubrir correspondientes a los números atómicos 43,

61, 72, 75, 85, 87 y 91 que pertenecían a los desconocidos, hasta ese entonces, tecnecio (Tc), prometio (Pm), hafnio (Hf), renio (Re), astato (At), francio (Fr) y protactinio (Pa), respectivamente [1].

El único lantanoide que falta por reseñar es el elemento número 61, que finalmente se aisló analizando subproductos de la fisión del uranio generados en un reactor nuclear situado en Tennessee (EUA) y al que se dio el nombre de prometio (Pm) en honor al dios de la mitología griega que dio fuego al hombre [9]. Jacob A. Marinsky, Lawrence E. Glendenin y Charles D. Coryell, probaron su existencia en 1944, pero reivindicaron su descubrimiento hasta 1947, después de la Segunda Guerra Mundial.

Aplicaciones

Por mucho tiempo la química de los lantanoides giró alrededor de su descubrimiento y separación, pero después de esto quedó un poco rezagada ante el rápido desarrollo de la química moderna, hasta que poco a poco comenzó su ascenso. En 1969 C. C. Hinckley [11] informó sobre el uso de complejos paramagnéticos de Eu(III) para la resolución de los espectros de resonancia magnética nuclear (RMN) ^1H , que permitían que los espectros de resonancia magnética nuclear ^1H de 60 MHz cambiaran de señales sin rasgos distintivos a espectros de primer orden bien resueltos. Pero ya no tuvieron mayor desarrollo debido a la innovación de campos magnéticos elevados y técnicas multidimensionales en la espectroscopía de RMN.

El producto químico más importante, probablemente, fue el uso de la *zeolita* del tipo *faujasita* intercambiadora a base de lantanoides como catalizador de craqueo que se usa para refinar el petróleo crudo para obtener gasolina y otros combustibles [12-13]. Tales catalizadores son, desde un punto de vista económico, probablemente los catalizadores más exitosos jamás desarrollados.

En muchos aspectos de la industria automotriz, los lantanoides son cada vez más importantes. Se pueden encontrar en convertidores catalíticos y en aleaciones para imanes permanentes muy potentes y estables utilizados en los sistemas de frenos antibloqueo, bolsas de aire y motores eléctricos de los vehículos del futuro [14]. Los lantanoides se usan para teñir vidrios y cerámicas, y los siliciuros de lantanoides como cerio o samario mejoran la resistencia de los aceros de baja aleación (Figura 3). Hoy en día, se les puede encontrar en todas partes, como en las pantallas de televisión y los monitores de computadora que contienen fósforos de lantanoides. Las fibras de vidrio utilizadas para el transporte de datos contienen lantanoides, y nuestras oficinas y casas están iluminadas con lámparas luminiscentes basadas en lantanoides tricolor que ahorran energía. Los nuevos billetes del euro introducidos en Europa en 2002 están protegidos contra la falsificación por compuestos de Eu(III) que se iluminan por excitación con luz UV. El neodimio, por ejemplo, se utiliza en la producción de rubíes artificiales para láser y otros amplificadores de luz (Figura 4).

Las primeras aplicaciones médicas se convirtieron en realidad poco después del desarrollo de la resonancia magnética y la introducción de esta técnica en el diagnóstico médico. La Imagen por Resonancia Magnética (IRM) es una técnica de RMN que visualiza, con una resolución muy alta, la morfología del cuerpo. La intensidad en una imagen tridimensional refleja la intensidad de la señal de ^1H RMN del agua en la parte correspondiente del cuerpo.

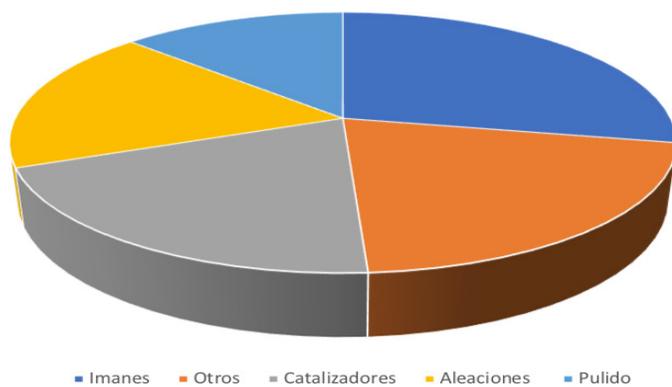


Figura 3: Consumo de tierras raras por uso final con base en peso, 2017. La categoría "aleaciones" incluye tanto a las tierras raras utilizadas para la aleación con acero, magnesio y aluminio (9%), como a las aleaciones utilizadas en las baterías de NiMH (9%) [10].

Las intensidades de estas señales y, en consecuencia, el contraste de las imágenes, dependen de la relajación magnética de los núcleos que puede mejorarse con compuestos paramagnéticos, y el ión Gd(III) es ideal para mejorar el contraste en las exploraciones de IRM. Se han desarrollado quelatos de Gd(III) [16] tan seguros para administración humana como una aspirina^{MR}; hoy en día alrededor del 30% de las imágenes por resonancia magnética se realizan después de la administración de un agente de contraste basado en Gd(III).

En la actualidad, se están desarrollando agentes de contraste inteligentes que pueden informar parámetros como la concentración de enzimas, pH, pO₂ y temperatura. Los radioisótopos de los lantanoides muestran una variedad de características que son adecuadas para aplicaciones que van desde el diagnóstico con tomografía por emisión de positrones (TEM) hasta la radioterapia. Las propiedades luminiscentes de los lantanoides también se han utilizado en el diagnóstico médico, y se ha desarrollado una variedad de bioensayos y sensores luminiscentes que aprovechan las propiedades luminiscentes únicas de estos elementos [17].

Las aplicaciones de lantanoides aumentan a pasos agigantados hoy en día; de hecho, no se podría entender el mundo actual sin los lantanoides. Estos elementos son considerados prioritarios en la escena mundial por su enorme importancia científica y tecnológica, siendo parte esencial del futuro próximo y lejano del mundo en que vivimos [18].

Referencias

- Scerri, E. R. (2006) *The Periodic Table: Its Story and Its Significance*, Oxford University Press: New York, pp 368.
- Krogt, P. van der. "The Discovery and Naming of the Rare Earths" *Elementymology & Elements Multidict*. 12 Dec. 2011. <https://elements.vanderkrogt.net/rareearths.php>
- Klinger, J. M.; A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age, *Extr. Ind. Soc.* **2015**, 2, 572–580. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.05.006>
- Abundance in Earth's Crust. WebElements.com. 9 marzo 2007. <https://web.archive.org/web/20070309033534/http://www.webelements.com/webelements/properties/text/image-flash/abund-crust.html> (visitado 13 de febrero de 2020).
- Paulick, H.; Machacek, E.; The global rare earth element exploration boom: An analysis of resources outside of China and discussion of development perspectives, *Resour Policy*, **2017**, 52, 134-153. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.02.002>
- Fluck, E.; New notations in the Periodic Table, *Pure&Appl. Chem.*, **1988**, 60, 431-436.
- En 1989, la ASM (Sociedad Americana de los Metales) colocó una placa a la entrada de la mina de Ytterby para conmemorar su importancia en la historia del descubrimiento de las "tierras raras".
- Johan Gadolin (1760-1852). De Lysippos-Trabajo propio, Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4401345> (visitado 13 de febrero de 2020).

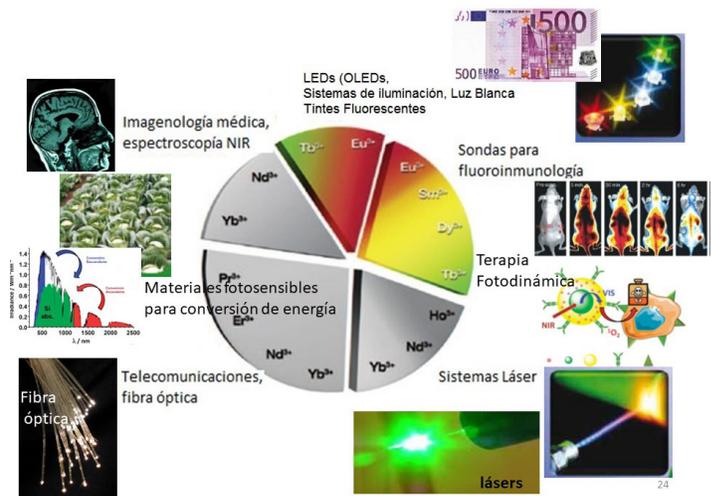


Figura 4: Uso de las tierras raras por sus propiedades luminiscentes, incluidos en la categoría "otros" de la figura 3 [15].

9. Weeks, M. E.; Cap. XVI, *Discovery of the Elements*, Kessinger Publishing Reprints; **2003**, pp 230.

10. Elaborada con base en: Otro sueño: Tierras Raras en Argentina. Dónde están, qué son y para qué sirven. El dominio de China. <http://miningpress.com/nota/280658/otro-sueno-tierrasraras-en-argentina-donde-estan-que-son-y-para-que-sirven-eldominio-de-china> (visitado 15 de abril de 2020).

11. Hinckley, C. C.; Paramagnetic shifts in solutions of cholesterol and the dipyrindine adduct of trisdipivalomethanatoeuropium(III). A shift reagent, *J.A.M. Chem. Soc.*, **1969**, 91, 5160-5162.

12. Scherzer, J.; Ritter, R. E.; Ion-Exchanged Ultrastable Y Zeolites. Gas Oil Cracking over Rare Earth-Exchanged Ultrastable Y Zeolites. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* **1978**, 17, 219-223. <https://doi.org/10.1021/i360067a008>

13. Scherzer, V.; Octane-Enhancing, Zeolitic FCC Catalysts: Scientific and Technical Aspects, *Catal. Rev. Sci. Eng.* **1989**, 31,(3), 215-354. <https://doi.org/10.1080/01614948909349934>

14. Peters J. A.; Raber, J.; Periodic Table, The Lanthanides, *Chem. Eng. News* **2003**. <http://pubs.acs.org/cen/80th/print/lanthanides.html>.

15. Adaptada de: Armelao, L.; Quici, S.; Barigelletti, F.; Accorsi, G.; Bottaro, G.; Cavazzini, M.; Tondello, E. *Coord. Chem. Rev.* **2010**, 254, 487–505.

16. Rogosnitzk M.; Branch, S.; Gadolinium-based contrast agent toxicity: a review of known and proposed mechanisms, *Biometals.*, **2016**; 29, 365–376. <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9931-7>

17. Wang, X.; Chang, H.; Xie, J.; Zhao, B.; Liu, B.; Xu, S.; Pei, W.; Ren, N.; Huang, L.; Huang, W.; Recent developments in lanthanide-based luminescent probes, *Coord. Chem. Rev.*, **2014**, 273–274, 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2014.02.001>

18. Murugesu M; Schelter, E. J.; Not Just Lewis Acids: Preface for the Forum on New Trends and Applications for Lanthanides, *Inorg. Chem.*, **2016**, 55 (20), 9951–9953. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.6b02353>

Los elementos de la tabla periódica y la superconductividad

Gustavo Tavizón¹ y Francisco Morales²

La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró 2019 como el año internacional de la tabla periódica. En ese año se cumplieron 150 años desde que Dmitri Ivanovich Mendeleev propuso un arreglo de los elementos con base en las características de sus átomos, creando así la Tabla Periódica. Sin duda, la tabla periódica es una piedra angular de la ciencia que ha permitido su avance, dando lugar al entendimiento y creación de todas las sustancias conocidas; obviamente, esto ha redundado en beneficio de la humanidad. Un aspecto muy particular de la tabla periódica es su relación con un fenómeno físico fascinante, la superconductividad. Este fenómeno, aunque poco conocido en el dominio público, se presenta en muchos materiales, y los elementos de la tabla periódica no son la excepción. El contenido de este trabajo consiste en la descripción de las características fundamentales de la superconductividad, algunos aspectos históricos del descubrimiento de este fenómeno, y las características superconductoras de los elementos de la tabla periódica.

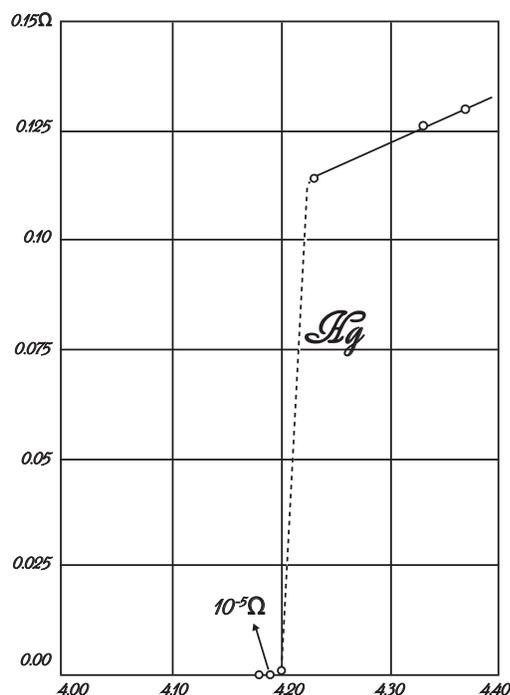


Figura 1. Gráfica obtenida por H. K. Onnes cuando descubrió el fenómeno de la superconductividad en el mercurio. El eje vertical representa la resistencia eléctrica, en Ohms, y el eje horizontal la temperatura, en Kelvin.

¹Facultad de Química, ²Instituto de Investigaciones en Materiales Universidad Nacional Autónoma de México

¹gtavizon@unam.mx, ²fmleal@unam.mx

Introducción

La superconductividad es uno de los fenómenos más estudiados en la historia de la física y la química. La razón radica en sus aspectos más básicos. Esta propiedad resulta de fenómenos cuánticos de nivel microscópico que se revelan en las propiedades macroscópicas. Son dos las propiedades macroscópicas fundamentales que permiten identificar a un material como superconductor: resistencia eléctrica cero y diamagnetismo perfecto (inducción del campo magnético en el interior del material igual a cero). Estas características implican aplicaciones extraordinarias, por ejemplo, conducción de energía eléctrica sin pérdidas de energía y generación de campos magnéticos muy intensos, mayores a los que se pueden generar con bobinas de cobre o con imanes permanentes. Es importante señalar que el fenómeno de la superconductividad se presenta a temperaturas muy por debajo de la temperatura ambiente y que la temperatura a la que aparece el fenómeno se le denomina temperatura crítica (T_c). Por esta razón las aplicaciones actuales de los superconductores requieren de métodos de enfriamiento para lograr temperaturas menores que la T_c .

Hasta hace relativamente poco tiempo, se pensaba que la superconductividad de las sustancias era un fenómeno extraordinario; ahora, se sabe que hay diferentes formas en las que puede inducirse esta propiedad en los sólidos. Se tiene la convicción -principalmente apoyada por los teóricos de la superconductividad- de que se trata de un fenómeno más bien universal y que el problema reside en encontrar las condiciones en las que puedan producirse los fenómenos cuánticos microscópicos que dan lugar a la superconductividad [1,2]. Estas condiciones están directamente relacionadas con los electrones responsables de formar una corriente eléctrica, las vibraciones atómicas y su interacción. Una forma de inducir superconductividad es la aplicación de una presión mecánica (ahora pueden conseguirse hasta 7 millones de atmósferas); de esta manera se ha conseguido observar superconductividad en muchos materiales, en particular, en elementos de la tabla periódica. Otros métodos para inducir superconductividad son: irradiación con iones muy energizados, amorfización de la estructura cristalina (creación de defectos), crecimiento epitaxial de películas extremadamente delgadas, y el dopaje de carga [1,3].

Breve historia del descubrimiento de la superconductividad

Un acontecimiento importante en el descubrimiento de la superconductividad fue la licuefacción del He. Entre 1898 y 1899, James Dewar, en Gran Bretaña, había conseguido obtener hidrógeno líquido y tiempo después, hidrógeno sólido. Se inició entonces una carrera por licuar el helio, el último gas por condensar; por un lado, estaba el grupo de Dewar, y por otro, el

laboratorio de bajas temperaturas que Heike Kamerlingh Onnes había iniciado en la Universidad de Leyden, en los Países Bajos. A mediados del mes de julio de 1908, Kamerlingh Onnes consiguió la licuefacción de He y encontró que la temperatura del He líquido era de 4.2 K. Por aquellos años existía una controversia en relación al comportamiento eléctrico de los metales; algunos científicos pensaban que la resistencia eléctrica de un metal seguiría disminuyendo conforme la temperatura descendiera, y que en el límite de 0 K, el sólido debería ser un conductor perfecto; otros, bajo la lógica de que en 0 K no existiría energía cinética para los electrones, pensaban que la resistencia de los metales tendría que tender a ser infinita conforme la temperatura se disminuyera. Un tercer grupo tenía la hipótesis de que la resistencia eléctrica a temperaturas cercanas al cero absoluto debería ser constante y que dependería de la pureza del material. Onnes decidió estudiar la resistencia del Hg, ya que entonces era el metal más fácil de purificar (por destilación). En 1911 Onnes consiguió llevar al Hg a una temperatura de 4.2 K; observó que la resistencia disminuía dos mil veces, hasta hacerse la millonésima parte de su valor a 298 K. Entre las más importantes observaciones que el equipo de Onnes había observado al enfriar Hg a temperaturas tan bajas, fue que la resistencia eléctrica mostró un descenso abrupto al alcanzar una temperatura de 4.2 K, como ilustra la Figura 1. Cuando Onnes publicó sus resultados, indicaba que había accedido a un nuevo estado del Hg, en el que se mostraba la propiedad de supraconductividad (así la llamo él); al poco tiempo este término cambió por el de superconductividad que se mantiene a la fecha. Las investigaciones del equipo de trabajo de Onnes siguieron en curso y se dedicaron entonces a investigar con otros metales de alta pureza.

Un descubrimiento trascendente en la comprensión del fenómeno de la superconductividad ocurrió en 1933. Walther Meissner y Robert Ochsenfeld observaron que cuando una muestra de un material superconductor se somete a un campo magnético, la inducción de campo al interior de la muestra es cero. Este comportamiento se interpreta como un diamagnetismo perfecto, ya que la magnetización del superconductor es negativa. Actualmente a este efecto se le denomina “efecto Meissner-Ochsenfeld” o simplemente “efecto Meissner”.

La superconductividad en los elementos de la Tabla Periódica

El comportamiento periódico de los elementos en la tabla periódica significa un conocimiento muy importante del comportamiento químico y físico de los elementos conocidos. Uno de los aspectos de la distribución de los elementos en la tabla periódica se origina del hecho de que los elementos de un mismo grupo presentan el mismo arreglo de los electrones en sus niveles más externos. Dado que el comportamiento químico y muchas propiedades físicas en un sólido se pueden explicar a partir de las interacciones de los electrones más externos, los elementos de un mismo grupo de la tabla periódica tendrán propiedades físicas y químicas similares. Este comportamiento ha sido bien entendido en términos de propiedades atómicas, como volúmenes de iones y átomos, potenciales de ionización, afinidades electrónicas, valencia, etc. Este entendimiento comienza a ser menos claro cuando se pretende extender la periodicidad para explicar propiedades de átomos que hacen una colectividad (fase líquida o sólida). Así, establecer una periodicidad para la temperatura de fusión, por ejemplo, ya no es tan directo. Ante la existencia de varias

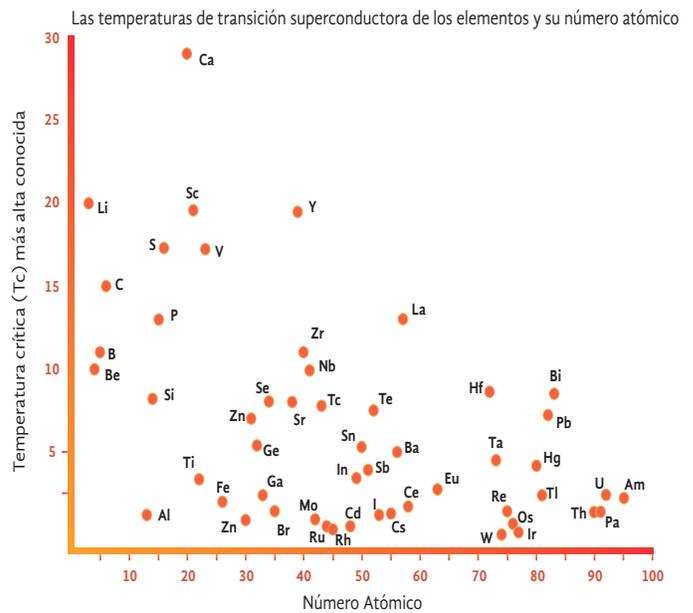


Figura 2. La temperatura de transición superconductora depende de la presión a la que un elemento es sometido, en esta figura se muestra el valor más alto de esta temperatura, en K vs. el número atómico. Como puede verse, difícilmente puede encontrarse una dependencia entre estos valores.

fases en un elemento y sus diferentes propiedades físicas, resulta necesario recurrir a los métodos de la mecánica cuántica para una mejor comprensión de dichas propiedades, con un menor apego a las reglas más inmediatas de las tendencias periódicas de los elementos. Como se mencionó antes, la mejor descripción que se tiene ahora de la superconductividad es aquella en la que se concibe a esta propiedad como el resultado de un fenómeno cuántico colectivo de los electrones de conducción, que tiene como expresiones macroscópicas una resistencia eléctrica nula y un diamagnetismo perfecto.

En los intentos por establecer una relación entre el fenómeno de la superconductividad, y particularmente por relacionar los valores de la temperatura crítica de transición superconductora, con las características de los elementos en la tabla periódica (Figura 2), se puede observar que los elementos de transición que son superconductores parecen seguir una tendencia con el número de electrones de valencia (electrones s y d). La Figura 5 muestra dicho comportamiento para los elementos caracterizados por capas electrónicas 3d, 4d y 5d. Note que la superconductividad ocurre cuando hay 4 y hasta 9 electrones, y que la T_c es alta para aquellos con 5 y 7 electrones de valencia.

Además de la tabla periódica, Figura 3, que se incluye en este trabajo, y que reúne la información sobre las temperaturas críticas de los elementos y las condiciones en las que se obtienen, a continuación se hacen comentarios sobre algunos elementos en particular.

Hidrógeno. Aunque la superconductividad de este elemento ha sido pacientemente esperada, debido a que se ha predicho que, a muy altas presiones, y una vez que ya no es un sólido molecular sino un sólido metálico monoatómico, el hidrógeno mostraría una temperatura de transición superconductora muy elevada (se especula que podría ser a temperatura ambiente).

● En las celdas azules están los elementos que son superconductores en condiciones normales de presión. La temperatura de transición aparece en el segundo renglón de la celda. El tercer renglón de la celda es la temperatura de transición máxima obtenida bajo presión, la cual es indicada en el cuarto renglón de la celda.

● En las celdas en color verde están los elementos que solo son superconductores sometidos a presión. Hay dos casos particulares; el primero es Be, que en forma de película delgada presenta una T_c mayor que en bulto, el segundo caso es el carbono, en el texto se comentan las características en las que presenta superconductividad.

Group 1 IA																		18 VIIIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
1																		2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
H Hydrogen																		He Helium																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
2																		3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Li Lithium 0.4 mK 20 K 20 GPa																		Be Beryllium 26 mK 9.95 K Película																		B Boron 11 K 250 GPa																		C Carbon 15 K nanotubo																		N Nitrogen																		O Oxygen 0.6 K 120 GPa																		F Fluorine																		Ne Neon																																																																																																																																																																																																					
3																		4																		5																		6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																					
Na Sodium																		Mg Magnesium																		Al Aluminum 1.14 K																		Si Silicon 8.2 K 15.2 GPa																		P Phosphorous 13 K 29 GPa																		S Sulfur 17.3 K 190 GPa																		Cl Chlorine																		Ar Argon																																																																																																																																																																																																					
4																		5																		6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																							
19 K Potassium																		20 Ca Calcium 29 K 216 GPa																		21 Sc Scandium																		22 Ti Titanium 0.39 K 3.35 K 56 GPa																		23 V Vanadium 5.38 K 9.2 K 120 GPa																		24 Cr Chromium																		25 Mn Manganese																		26 Fe Iron 2 K 20 GPa																		27 Co Cobalt																		28 Ni Nickel																		29 Cu Copper																		30 Zn Zinc 9 K																		31 Ga Gallium 1.091 K																		32 Ge Germanium 0.9 K 1.4 GPa																		33 As Arsenic 0.8 K 32 GPa																		34 Se Selenium 2.4 K 150 GPa																		35 Br Bromine 1.4 K 190 GPa																		36 Kr Krypton																	
5																		6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																									
37 Rb Rubidium																		38 Sr Strontium 8 K 58 GPa																		39 Y Yttrium 19.5 K 115 GPa																		40 Zr Zirconium 0.546 K 11 K 30 GPa																		41 Nb Niobium 9.2 K 9.9 K 10 GPa																		42 Mo Molybdenum 0.92 K																		43 Tc Technetium 7.77 K																		44 Ru Ruthenium 0.5 K																		45 Rh Rhodium 0.33 mK																		46 Pd Palladium																		47 Ag Silver																		48 Cd Cadmium 0.52 K																		49 In Indium 3.404 K																		50 Sn Tin 3.722 K 5.3 K 11.3 GPa																		51 Sb Antimony 3.9 K 25 GPa																		52 Te Tellurium 7.5 K 35 GPa																		53 I Iodine 1.4 K 25 GPa																		54 Xe Xenon																	
6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																																											
55 Cs Cesium 1.3 K 12 GPa																		56 Ba Barium 5 K 18 GPa																		57 La Lanthanum 4.8 K 9 K 13 K 16 GPa																		58 Ce Cerium 1.7 K 5 GPa																		59 Pr Praseodymium																		60 Nd Neodymium																		61 Pm Promethium																		62 Sm Samarium																		63 Eu Europium 2.75 K 142 GPa																		64 Gd Gadolinium																		65 Tb Terbium																		66 Dy Dysprosium																		67 Ho Holmium																		68 Er Erbium																		69 Tm Thulium																		70 Yb Ytterbium																		71 Lu Lutetium 12.4 K 174 GPa																																			
7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																																																													
87 Fr Francium																		88 Ra Radium																		89 Ac Actinium																		90 Th Thorium 1.368 K																		91 Pa Protactinium 1.4 K																		92 U Uranium 0.8 K 2.4 K 1.2 GPa																		93 Np Neptunium																		94 Pu Plutonium																		95 Am Americium 0.79 K 2.2 K 6 GPa																		96 Cm Curium																		97 Bk Berkelium																		98 Cf Californium																		99 Es Einsteinium																		100 Fm Fermium																		101 Md Mendelevium																		102 No Nobelium																		103 Lr Lawrencium																																			

Figura 3. Tabla periódica de los elementos en donde se presentan las temperaturas críticas determinadas en condiciones normales (fondo azul) y en condiciones de presión o en condición de dimensión menor que 3 (fondo verde).

No existen pruebas experimentales de que el hidrógeno muestre superconductividad, aún a las altas presiones a las que ha sido sometido (140 GPa). La gran reactividad del hidrógeno monoatómico y su extraordinaria difusividad hacen muy difícil someterlo a altas presiones.

Los metales alcalinos. De los 30 elementos de la tabla periódica que muestran transición superconductor a la presión de una atmósfera, entre los alcalinos, solamente el Li tiene una modesta T_c de 0.4 mK. En cambio, cuando es sometido a una presión de 50 GPa muestra una transición superconductor a 20 K [4]. Para el Na se ha estimado que podría ser superconductor ($T_c = 1.2$ K) en altas presiones, 160 GPa [5], pero dicho fenómeno no se ha observado experimentalmente. Aunque anticipada, la superconductividad del K y Rb no se ha observado, aún a altas presiones [6]. Para el Cs se ha encontrado que con una $T_c = 1.3$ K, este metal se hace superconductor a una presión de 12 GPa [7].

Los metales alcalinotérreos. Entre los alcalinotérreos únicamente el Be (hexagonal) presenta una transición superconductor en condiciones de una atmósfera de presión y su T_c vale 0.026 K; en cambio, cuando se consigue preparar como una película delgada (200 Å), a partir de la condensación de sus vapores, su T_c alcanza 9.85 K [8,9]. En los casos de Ca, Sr y Ba, estos presentan una fase

superconductor a altas presiones y la temperatura de transición depende del valor de la presión aplicada. Para Ca, la máxima T_c es de 29 K y se consigue a 216 GPa [10]; para Sr la T_c máxima vale 8 K a 58 GPa [11] y para Ba vale alrededor de 5 K a 20 GPa [12]. Una explicación del comportamiento de Ca, Sr y Ba en altas presiones contempla su transformación en metales de banda d por efecto de la presión [13].

Los elementos de transición. Con el criterio de exhibir transición superconductor a una atmósfera de presión, se puede hacer la primera separación de este amplio grupo de metales. De los elementos de este grupo, con configuración electrónica del tipo d^1 , y en el que también se incluiría a Lu, solamente el La presenta, a presión normal, una T_c de 4.8 K para una fase hexagonal, y T_c de 6 K para una fase cúbica; el resto de ellos, Sc, Y, y Lu, son superconductores de alta presión y cuyo valor máximo de T_c depende casi linealmente de la presión aplicada. La T_c para Sc es de 19.6 K a 107 GPa; para Y es de 20 K a 115 GPa [14]; para La (fase cúbica) es de 12 K a 13 GPa y de 7 K (fase hexagonal) a 2 GPa; para Lu es de 12.4 K a 174 GPa [15–17]. Luego, del grupo 4 al 10, con excepción de Cr-Ni y Pt, todos son superconductores con $T_c < 10$ K. Los elementos del grupo 11: Cu, Ag y Au, los mejores conductores eléctricos de la tabla periódica, no exhiben

superconductividad a presión normal. Los del grupo 12: Zn, Cd y Hg son superconductores a presión normal. Entre los datos por mencionar de este grupo de elementos es que Nb presenta la temperatura crítica más alta bajo presión normal, 9.25 K, y que en condiciones de alta presión, V exhibe también una T_c alta, 17.2 K a 120 GPa [1]. El Tc, que es un metal en el que todos sus isótopos son radiactivos, muestra una temperatura crítica de 8.2 K [18]. Para los elementos con un ordenamiento magnético de largo alcance (antiferromagnético o ferromagnético): Cr, Fe, Co y Ni, no se ha reportado superconductividad en condiciones de presión normal. Cuando por efectos de la presión aplicada hay una fase no magnética, ésta puede presentar transición superconductor. Esta observación puede también extenderse a los elementos "cercanamente magnéticos": Pd y Pt, en los que tampoco se ha observado una fase superconductor de bulto [14,19]. Se ha reportado que en Cr existe una fase cúbica centrada en la cara (FCC), crecida epitaxialmente entre un par de películas de Au, cuya T_c es de 3.0 K y representa una fase metaestable de Cr. Los autores de la investigación atribuyen la superconductividad a la formación de un compuesto de Au-Cr-Au [20]. Para Fe a presiones de 15-30 GPa se forma una fase no magnética (HCP), con una T_c máxima de 2.0 K [21]. Para Pd podría esperarse una transición superconductor relativamente alta; sin embargo, ésta no se ha observado a temperaturas de 1.7 mK; en cambio, cuando en películas delgadas de Pd se han inducido defectos estructurales mediante irradiación con iones He^+ , se ha conseguido hacer que Pd sea superconductor en una presión normal a 3.2 K [22].

Los elementos de la serie de los lantánidos. Entre estos elementos, solamente aquellos que presentan los orbitales 4f llenos (La y Lu) son superconductores a presión normal, La con $T_c = 6$ K y Lu con $T_c = 0.1$ K [23], aunque debe mencionarse que no existe otro reporte que confirme esta propiedad en baja presión (Lu a 174 GPa, tiene $T_c = 12.4$ K). El resto de los lantánidos, con el momento magnético asociado con sus orbitales 4f internos, no muestra superconductividad. Las excepciones importantes dentro de la serie de los lantánidos están representadas por Ce y Eu, que en condiciones de alta presión muestran transición superconductor a 1.7 K para Ce a 5 GPa, y a 2.75 K para Eu a 142 GPa.

Los elementos de la serie de los actínidos. Estos elementos se caracterizan por un llenado progresivo de los orbitales 5f conforme se avanza en la serie. El estudio de las propiedades de estos elementos, principalmente de los más pesados, se dificulta por varias razones. En primer lugar, la cantidad disponible de ellos es muy escasa (Fm, Md, No, Lr); los elementos transuránicos son muy difíciles de investigar, porque al ser muy radiactivos se dificulta su manejo con seguridad; también presentan un calentamiento propio que impide el acceder a muy bajas temperaturas, además de mostrar un decaimiento que

conduce a la degradación e impurificación de las muestras [24]. En presión normal, el Th tiene una $T_c = 1.37$ K; el Pa con $T_c = 1.43$ K; para U únicamente la fase ortorrómbica con $T_c = 0.8$ K es superconductor, y las fases tetragonal y cúbica con T_c en 0.8 y 2.1 K, se estabilizan con la ayuda de otros elementos. El Am presenta dos fases superconductoras, una con T_c de 0.79 K (fase α , hexagonal) a presión normal, y otra de 1.1 K (β , fase cúbica); bajo presión, a 6 GPa tiene T_c de 2.2 K. Para α -Np y α -Pu existen estudios que pronostican transición superconductor, pero en ninguno de ellos se ha observado esta transición a temperaturas superiores de 0.5 K. Cm, Bk y Cf, por presentar orden magnético, no se consideran como potenciales superconductores en presión normal [24].

Elementos del grupo p, grupos 13-15

a) Elementos del grupo 13 (B, Al, Ga, In y Tl). El boro muestra una T_c que depende de la presión aplicada, a 175 GPa muestra una T_c de 6.0 K, en tanto que ésta es de 11.2 K a 250 GPa [25]. Los elementos restantes de este grupo, Al, Ga, In y Tl presentan superconductividad a una presión normal. Para Al (bulto) la transición superconductor se presenta a 1.2 K [26], en tanto que en nanopartículas de Al recubiertas con Al_2O_3 (core-shell), esta ocurre a 3.9 K [27]. Para Ga, la fase estable, α -Ga, presenta una T_c de 1.2 K, la fase β , metaestable, muestra 6.04 K [28], y en películas amorfas de Ga se ha observado una T_c de 8.6 K [29]. Todos los elementos de este grupo, con excepción de B, presentan una fase que es superconductor a una presión normal.

b) Elementos del grupo 14 (C, Si, Ge, Sn y Pb). Entre los primeros superconductores conocidos está el Pb con una T_c de 7.2 K. Para

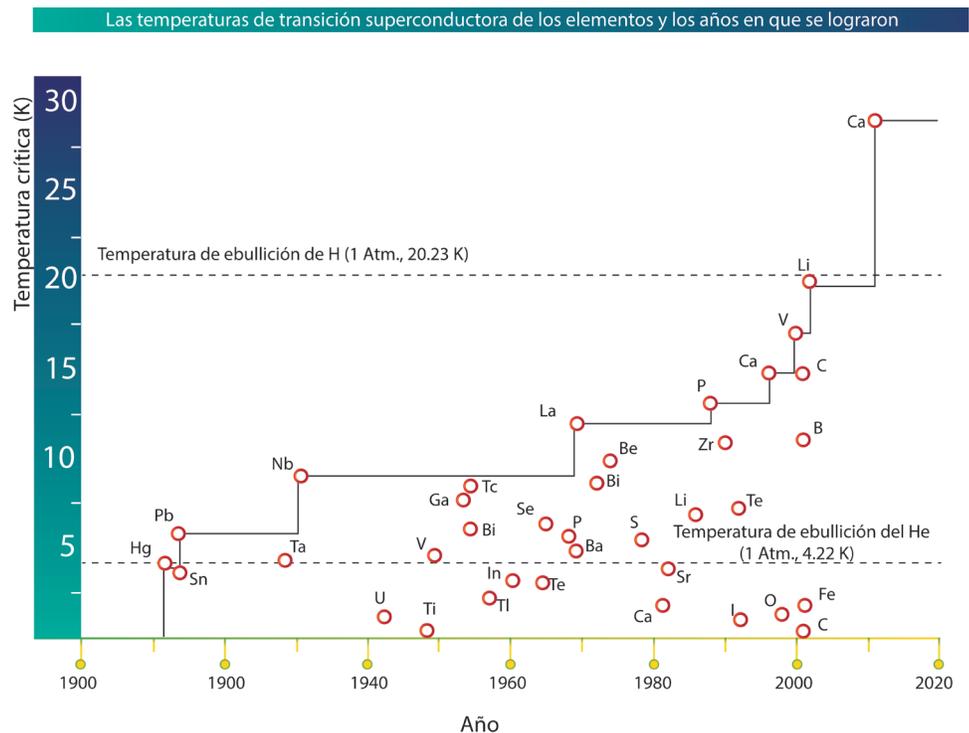


Figura 4. La temperatura de transición superconductor (T_c o K) depende de la presión a la que un elemento es sometido, en esta figura se muestra el valor más alto de esta temperatura vs. el año de descubrimiento.

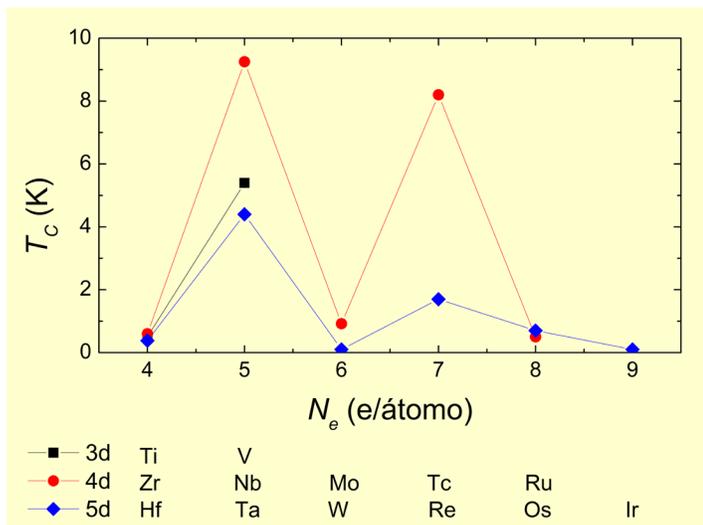


Figura 5. Temperatura crítica, T_c , de los elementos de transición que son superconductores. Note que la T_c es más alta para los elementos con 5 y 7 electrones.

el carbono se conocen ahora una gran cantidad de alótropos, los más conocidos son el grafito, el diamante, las nanoesferas de carbono (C_{60} , por ejemplo), los nanotubos de pared simple y múltiple, y el grafeno. Entre estos alótropos, ni grafito ni diamante (aquí polimorfos) se conocen como superconductores, aunque la cantidad de superconductores con otros elementos intercalados en estos es muy amplia y las temperaturas de transición conocidas son muy variadas [30]. En su forma elemental, el carbono puede ser superconductor con una estructura de tubos de pared simple embebidos en una matriz de zeolita con canales de 4 Å de diámetro, la T_c máxima observada fue de 20 K [31]. Recientemente se encontró que el grafeno puede mostrar superconductividad cuando dos láminas sobrepuestas de este material son giradas, una con respecto a la otra, en un ángulo mágico que resultó ser de 1.1° ; la temperatura de transición que se reportó fue de 1.7 K [32]. Silicio y germanio son superconductores de alta presión; Sn y Pb presentan una fase superconductora a presión normal de 3.72 y 7.19 K, respectivamente, y la temperatura crítica de una fase de Sn a 11.3 GPa alcanza 5.3 K.

c) Elementos del grupo 15 (N, P, As, Sb y Bi). El nitrógeno, a diferencia de los demás elementos de este grupo, es un elemento que no ha sido reportado superconductor aun a muy altas presiones (2.4 millones de atmósferas, donde deja de ser un sólido de moléculas diatómicas para formar un sólido de átomos). Por otro lado, los elementos restantes se hacen superconductores de alta presión. En P la T_c más alta es de 9.5 K a 32 GPa, y se mantiene la controversia sobre a qué fase corresponde, si a la de P negro (ortorrómbico) o a una similar a la de P blanco (cúbica simple) [33]. Recientemente, en monocristales de P negro a 12 GPa, se ha mostrado que la transición superconductora de esta fase de P (llamada A7) ocurre a 7.2 K [34].

d) Elementos del grupo 16 (O, S, Se, Te, Po). Los elementos de este grupo, con excepción de Po, son superconductores a muy alta presión ($P \geq 35$ GPa). En 1998 se reportaron dos experimentos importantes para el oxígeno; por un lado, la metalización del sólido que se presenta a 95 GPa, y por otro, una transición superconductora de 0.6 K, que aparece a presiones $P \geq 100$ GPa

[35]. En el caso de Po, ninguno de sus 33 isótopos es estable, y para la fase α del mismo (la única cúbica simple a presión normal de los elementos de la tabla periódica), se ha propuesto que por efectos de contracción de su volumen, podría ser superconductora con T_c de 7.11 K [36].

e) Elementos del grupo 17 (F, Cl, Br, I, At). El Br sometido a presión experimenta una transición en la que pasa de un sólido molecular a un “sólido monoatómico” a una presión de 80 GPa; luego se transforma en un superconductor a presiones mayores de 90 GPa, con una $T_c = 1.5$ K. El yodo, semejante al Br, también sufre varias transiciones con la presión. Inicialmente es un sólido molecular y eléctricamente es un aislante. A presiones de alrededor de 15 GPa se metaliza (i.e., eléctricamente se comporta como un metal) y a una presión de 21 GPa sufre una disociación para pasar a ser un sólido monoatómico. Finalmente, se transforma en un superconductor de $T_c = 1.2$ K a 26 GPa [37,38].

f) Grupo de los gases nobles (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, Og). Ninguno de los elementos de los gases nobles ha mostrado transición superconductora, aun a muy altas presiones. La ausencia de esta propiedad en los gases nobles ha sido asociada con una interacción muy débil del tipo electrón-fonón y un bajo coeficiente del calor específico electrónico [3].

Como comentario final, se puede decir que la búsqueda de una correlación entre la T_c y la periodicidad de los elementos superconductores en la tabla periódica ha resultado infructuosa. Como puede verse en la Figura 2, encontrar una dependencia entre la temperatura crítica y el número atómico, se presenta como una tarea difícil. Lo anterior queda aclarado si se consideran las ideas fundamentales de la teoría propuesta en 1957 por Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS). En esta teoría, dos ingredientes son indispensables: los modos de oscilación de los átomos (en la mecánica cuántica se denominan *fonones*) y la densidad de electrones en el estado más alto de energía que pueden ocupar, conocida como densidad de estados electrónicos al nivel de la energía de Fermi. Estas dos características dependen en primera instancia, y visto de una manera sencilla, de la masa del átomo y de la valencia. Si estas características no son las adecuadas, la superconductividad no se presenta, pero cuando ésta se presenta, la T_c depende de esas características. La aplicación de una presión a los elementos, en general a cualquier sólido, modifica las frecuencias de vibración de los átomos y también la densidad de estados al nivel de Fermi; si los valores de esos parámetros son adecuados, la superconductividad se presentará, o si el elemento ya es superconductor la temperatura crítica se puede incrementar, aunque también puede ocurrir lo opuesto. Las técnicas experimentales para producir altas presiones han tenido un gran desarrollo y esto ha permitido estudiar los elementos sometidos a presiones más altas. Se ha encontrado que algunos incrementan notablemente su T_c . La Figura 4 muestra gráficamente cómo ha evolucionado la T_c de los elementos a través de los años. Hasta ahora no se conoce una teoría de la superconductividad que prediga dicho estado, incluida la teoría BCS, que es la más exitosa en describir el estado superconductor de los elementos y de muchos compuestos y aleaciones superconductoras.

Agradecimientos: los autores aprecian la ayuda recibida de Vianey Islas Bastida (Facultad de Química, UNAM) en la elaboración de los gráficos de este trabajo.

Referencias

1. Buzea, C.; Robbie, K. Assembling the puzzle of superconducting elements: a review, *Supercond. Sci. Technol.* **2005**, *18*, R1–R8.
2. U. of N.D. McKenna Hall, Workshop on The Possibility of Room Temperature Superconductivity and Related Topics, (2005) June 10th and 11th, <https://www3.nd.edu/~its/rts/index.html>
3. Buzea, C. Recent Developments in Superconductivity Research. A century of Superconductivity -updates of the periodic table of superconducting elements. Barry P. Martins, Ed., 1st, Nova Science Publishers, Inc., New York, NY, 2007.
4. Shimizu, K.; Ishikawa, H.; Takao, D.; Yagi, T.; Amaya, K. Superconductivity in compressed lithium at 20 K, *Nature*. **2002**, *419*, 597–599.
5. Tutchton, R.; Chen, X.; Wu, Z. Is sodium a superconductor under high pressure?, *J. Chem. Phys.* **2017**, *146*, 014705.
6. Shi, L. D. A. Papaconstantopoulos, Theoretical predictions of superconductivity in alkali metals under high pressure, *Phys. Rev. B*. **2006**, *73*, 184516.
7. Schilling, J. S. Superconductivity in the alkali metals, *High Press. Res.* **2006**, *26*, 145–163.
8. Falge, R. L. Superconductivity of hexagonal beryllium, *Phys. Lett. A*. **1967**, *24* 579–580.
9. Granqvist, C.-G.; Claesson, T. Superconducting transition temperatures of vapour quenched beryllium, *Phys. Lett. A*. **1974**, *47*, 97–98.
10. Sakata, M.; Nakamoto, Y.; Shimizu, K.; Matsuoka, T.; Ohishi, Y. Superconducting state of Ca-VII below a critical temperature of 29 K at a pressure of 216 GPa, *Phys. Rev. B*. **2011**, *83*, 220512.
11. Mizobata, S.; Matsuoka, T.; Shimizu, K. Pressure Dependence of the Superconductivity in Strontium, *J. Phys. Soc. Japan*. **2007**, *76*, 23–24.
12. Dunn, K. J.; Bundy, F. P. Pressure-induced superconductivity in strontium and barium, *Phys. Rev. B*. **1982**, *25*, 194–197.
13. Mc Mahan, A. K. Pressure-induced changes in the electronic structure of solids, *Phys. B+C*. **1986**, *139–140*, 31–41.
14. Debessai, M.; Hamlin, J. J.; Schilling, J. S. Comparison of the pressure dependences of T_c in the trivalent d-electron superconductors Sc, Y, La, and Lu up to megabar pressures, *Phys. Rev. B*. **2008**, *78*, 064519.
15. Wittig, J.; Probst, C.; Schmidt, F. A., Gschneidner, K. A. Superconductivity in a New High-Pressure Phase of Scandium, *Phys. Rev. Lett.* **1979**, *42*, 469–472.
16. Wittig, J. Pressure-Induced Superconductivity in Cesium and Yttrium, *Phys. Rev. Lett.* **1970**, *24*, 812–815.
17. Maple, M.B.; Wittig, J.; Kim, K. S. Pressure-Induced Magnetic-Nonmagnetic Transition of Ce Impurities in La, *Phys. Rev. Lett.* **1969**, *23*, 1375–1377.
18. Dougherty, R.; Kimel, J. D. Superconductivity Revisited, 1st Ed., Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
19. Slocombe, D. R.; Kuznetsov, V. L.; Grochala, W.; Williams, R. J. P.; Edwards, P. P. Superconductivity in transition metals, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2015**, *373*, 20140476.
20. Khan, H. R.; Superconducting Gold Alloys. A review of the state of the art, *Gold Bull.* **1984**, *17*, 94.
21. Zhimizu, K. et al. Superconductivity in the non-magnetic state of iron under pressure, *Nature*. **2001**, *412*, 316.
22. Stritzker, B.; Superconductivity in Irradiated Palladium, *Phys. Rev. Lett.* **1979**, *42*, 1769.
23. Nikulin, E. I.; Volkenshtein, N. V.; Startsev, V. E. Superconductivity of lutetium, *JETP Lett. (Engl. Transl.)* **1973**, *17*, 337.
24. Griveau, J.-C.; Colineau, É. Superconductivity in transuranium elements and compounds, *Comptes Rendus Phys.* **2014**, *15*, 599–615.
25. Eremets, M. I. Superconductivity in Boron, *Science (80-)* **2001**, *293*, 272–274.
26. Cochran, J. F.; Mapother, D. E.; Mould, R. E. Superconducting Transition in Aluminum, *Phys. Rev.* **1956**, *103*, 1657–1669.
27. Smolyaninova, V. N.; Zander, K.; Gresock, T.; Jensen, C.; Prestigiacomo, J. C.; Osofsky, M. S. et al., Using metamaterial nanoengineering to triple the superconducting critical temperature of bulk aluminum, *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 15777.
28. Campanini, D.; Diao, Z.; Rydh, A.; Raising the superconducting T_c of gallium: In situ characterization of the transformation of α -Ga into β -Ga, *Phys. Rev. B*. **2018**, *97*, 184517.
29. Kuz'menko, V. M.; Mel'nikov, V. A.; Rakhubovskii, V. I. Mechanisms of spontaneous crystallization of amorphous metallic films, *Sov. Phys. JETP*. **1984**, *59*, 612.
30. Kubozono, Y.; Eguchi, R.; Goto, H.; Hamao, S.; Kambe, T.; Terao, T. et al., Recent progress on carbon-based superconductors, *J. Phys. Condens. Matter*. **2016**, *28*, 334001.
31. Tang, Z. K. Superconductivity in 4 Angstrom Single-Walled Carbon Nanotubes, *Science (80-)*. **2001**, *292*, 2462–2465.
32. Cao, Y.; Fatemi, V.; Fang, S.; Watanabe, K.; Taniguchi, T.; Kaxiras, E.; et al., Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices, *Nature*. **2018**, *556*, 43–50.
33. Zhang, R.; Waters, J.; Geim, A. K.; Grigorieva, I. V. Intercalant-independent transition temperature in superconducting black phosphorus, *Nat. Commun.* **2017**, *8*, 15036.
34. Li, X.; Sun, J.; Shahi, P.; Gao, M.; MacDonald, A. H.; Uwatoko, Y. et al., Pressure-induced phase transitions and superconductivity in a black phosphorus single crystal, *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2018**, *115*, 9935–9940.
35. Shimizu, K.; Sahara, K.; Ikumo, M.; Eremets, M. I.; Amaya, K. Superconductivity in oxygen, *Nature*. **1998**, *393*, 767–769.
36. Szczyński, R.; Durajski, A. P.; Pach, P. W. Superconductivity in α -polonium at the reduced volume, *J. Phys. Chem. Solids*. **2014**, *75*, 224–229.
37. Shimizu, K.; Yamauchi, T.; Tamitani, N.; Takeshita, N.; Ishizuka, M.; Amaya, K.; et al., The pressure-induced superconductivity of iodine, *J. Supercond.* **1994**, *7*, 921–924.
38. Amaya, K.; Shimizu, K.; Eremets, M. I.; Kobayashi, T. C.; Endo, S. Observation of pressure-induced superconductivity in the megabar region, *J. Phys. Condens. Matter*. **1998**, *10*, 11179–11190.

Elementos Químicos.

El silicio (Si) y la Industria Electrónica

Joaquín Palacios Alquisira*

Aspectos históricos (1,2)

En 1787 Lavoisier sospechó que la sílica (SiO_2) era un óxido de un elemento nuevo que no había sido identificado. Sir Humphry Davy trató de aislarlo en el año 1808, y le dio el nombre con el que se le conoce actualmente. Davy pensó que se trataba de un metal, por tanto, lo llamó "Silisium".

En 1811 Gay Lussac y Thenard experimentaron calentando tetracloruro de silicio (SiCl_4) con potasio puro:



pero no identificaron al silicio como un elemento nuevo. El nombre actual le fue asignado hasta 1817 por Thomas Thomson quien fue un químico escocés. Thomson clasificó al nuevo elemento como un no metal, y cambió en el nombre la terminación *-ium* correspondiente a los metales por *-on* (en inglés), que corresponde a los no metales, como el carbono y el boro.

El silicio fue purificado y caracterizado en 1823 por Jacob Berzelius, quien lo preparó en su forma amorfa, siguiendo el mismo proceso propuesto por Gay Lussac. Partió de potasio metálico muy puro más tetracarburo de silicio y también silicatos. Berzelius logró obtenerlo en su forma pura como un polvo café. Se considera a Berzelius como el descubridor de este elemento.

Deville en 1854 logró obtener silicio en su forma cristalina más común; para ello empleó el método electrolítico, a partir de cloruro de sodio y cloruro de aluminio, el cual contenía aproximadamente 10% en peso de silicio como contaminante. Recientemente se han obtenido otras formas alotrópicas del silicio como el llamado siliceno (I).



Figura 1. Lingote final de silicio y obleas una vez cortadas.

Propiedad	Carbono (grafito)	Silicio
Estado de agregación	Sólido	Sólido
Densidad (g/cm^3)	2.26	2.33
Punto de fusión ($^\circ\text{C}$)	3727	1414
Punto de ebullición ($^\circ\text{C}$)	4830	3265
Electronegatividad en la escala de Pauling	2.5	1.8
Configuración electrónica	$1s^2 2s^2 2p^2$	$[\text{Ne}] 3s^2 3p^2$
Conductividad eléctrica (S/m)	6.1×10^4	4.35×10^{-4}
Conductividad térmica (W/(K m))	129	149
Estados de oxidación	+4, +2	+4

Tabla 1. Tabla comparativa de las propiedades del C y Si en estado sólido puro.

Propiedades físicas y químicas (3-6,8-20)

El silicio tiene como símbolo Si, su número atómico es 14, pertenece a la familia 14A de la clasificación periódica. El elemento puro es un sólido muy duro y frágil, de coloración grisácea con brillo. Químicamente se le clasifica como un metaloide tetravalente. Es poco reactivo, aunque más que el carbono, y tiene gran afinidad por el oxígeno.

El silicio puro es un sólido a temperatura ambiente, funde a temperatura elevada ($T_m = 1,414^\circ\text{C}$), su temperatura de ebullición ($T_b = 3,265^\circ\text{C}$); como en el caso del agua, su densidad en estado líquido ρ_L es mayor que en el estado sólido ρ_s ; a diferencia de la mayoría de las sustancias, se expande a la temperatura de congelación, por lo tanto, partículas sólidas de Si flotan en su líquido. Los isótopos más comunes son: Si-28, Si-29, Si-30, Si-31 y Si-32. La conductividad térmica es de $4.35 \times 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$. Por lo tanto, el Si es un semiconductor; el elemento mejora su conductividad eléctrica a altas temperaturas (a diferencia de los metales), y es un buen conductor del calor. Su dureza es alta: en la escala de Mohs alcanza el valor de 7.

El silicio puro y cristalino es de color gris con lustre metálico, es quebradizo y por molienda se transforma fácilmente a partículas pequeñas de polvo.

¹ Semiconductor: Sustancia no metálica que conduce la corriente eléctrica; su conductividad aumenta con la temperatura.

*Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, polylab1@unam.mx

Material	Conductividad Eléctrica (S/cm)	Conductividad Térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Calor Específico (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	Punto de fusión (°C)
Plata (Ag)	63 × 10 ⁶	429	232	961.93
Cobre (Cu)	58.108 × 10 ⁶	400	385	1084.62
Oro (Au)	45.5 × 10 ⁶	317	128	1064.43
Silicio (Si)	4.5 × 10 ⁻⁴	148	700	1414.8
Politiofeno	1 × 10 ⁻¹	~ 4.4 (T amb.) 62.71 (27°C)	-----	>350
Polipirrol	2 × 10 ³	3.77 (10-60°C)	0.8 - 1.4	>300
Polianilina	4.62 × 10 ⁻¹	----	-----	>330
Poliacetileno	>1 × 10 ⁴	100.09 (27°C)	-----	327
Poli (p-fenileno)	10 ² - 10 ³	45.13 (27°C)	-----	-----
Poli (fenilo-vinilideno)	3-5 × 10 ³	-----	-----	190 -200
Grafeno	0.96 × 10 ⁸	5000	25 J mol ⁻¹ K ⁻¹	~3700 - 4000
Óxido de grafeno	6.6	8.8	----	~ 3600

Tabla 2. Comparación de la conductividad eléctrica, conductividad térmica, calor específico y punto de fusión de varios materiales inorgánicos y Si vs. materiales polímeros semiconductores sintéticos.

Cristaliza en la forma cúbica centrada en las caras (FCC), y presenta la estructura del diamante. Tiene cuatro electrones de valencia. Es un semiconductor eléctrico;¹ la resistencia eléctrica de los monocristales de Si cambia significativamente cuando se les aplica presión (estrés mecánico) que provoca el efecto piezoeléctrico, fenómeno de deformación que ocurre en determinados cristales naturales como el cuarzo o sintéticos, en los que la deformación en alguna de sus caras da como resultado una diferencia de potencial (voltaje).

Pierre Curie y su hermano Jacques descubrieron el fenómeno piezoeléctrico en el cuarzo y en la sal de Rochelle en 1880 y lo denominaron “efecto piezoeléctrico” (del griego *piezein*, “presionar”). Dada su capacidad de convertir la deformación mecánica en voltaje eléctrico, y el voltaje eléctrico aplicado en deformación mecánica, los cristales piezoeléctricos encuentran un vasto campo de aplicación en: transductores de presión, agujas para los reproductores de discos de vinilo, micrófonos, cristales resonadores para los relojes, osciladores electrónicos de alta frecuencia y generadores de chispas en encendedores.

El silicio dopado con boro se convierte en un superconductor con una temperatura de transición T_c igual a 0.4 K. La temperatura crítica T_c , es la temperatura por debajo de la cual los materiales semiconductores se convierten en superconductores.

En la producción de semiconductores, se denomina dopaje al proceso intencional de agregar impurezas a un semiconductor extremadamente puro con el fin de cambiar y mejorar sus propiedades eléctricas.

El silicio se clasifica químicamente como metaloide ya que dona o comparte sus cuatro electrones externos para formar cuatro enlaces como lo hace el carbono, y se combina con muchos elementos y compuestos. A diferencia del carbono acepta electrones adicionales y forma cinco o seis enlaces en su forma activa. El silicio tetravalente es químicamente poco activo, reacciona

con los halógenos en medio alcalino diluido. Solo reacciona con ácidos muy fuertes (los hiperácidos) como el nítrico combinado con fluorhídrico, y el trifluorometansulfónico. El silicio forma cadenas largas de polímeros que tienen propiedades útiles en muchas áreas de la medicina y como materiales selladores.

Abundancia (1)

El silicio (Si) es un elemento abundante en el universo, ocupa el octavo lugar. No aparece como un elemento puro en la naturaleza; se encuentra presente en forma de: polvos, arenas, en planetoides y planetas, en varias formas de sílica (SiO₂) o silicatos. El noventa por ciento de la corteza terrestre está formada de minerales tipo silicatos, por tanto el silicio ocupa el segundo lugar como el elemento más abundante en la tierra, puede llegar hasta el 28% en peso, solo después del oxígeno que es el más abundante. Las plantas usan al silicio para reforzar las paredes celulares y además nutre a los vegetales.

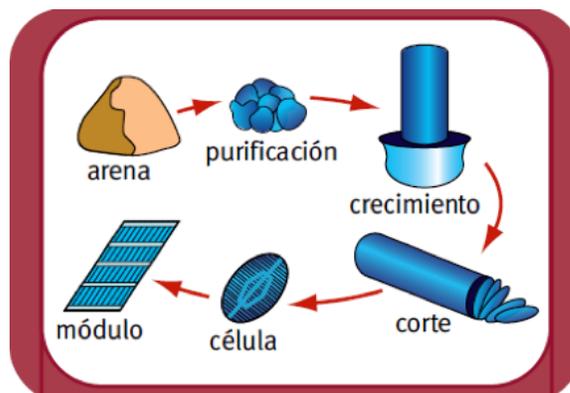


Figura 2. Esquema del proceso de obtención del silicio y su aplicación final en el módulo fotovoltaico, celda solar.

Aplicaciones Tecnológicas (1,7,19)

Las aleaciones de hierro-silicio (ferrosilicón) y aluminio-silicio (Al/Si) son muy importantes en la industria metalúrgica.

El silicio grado metalúrgico se prepara comercialmente a partir de sílica de alta pureza con carbono o madera en una estufa de arco eléctrico con electrodos de carbono a 1,900°C.



Si hay exceso de carbón



El silicio grado metalúrgico se usa principalmente en la industria del aluminio vaciado; el aluminio se emplea hasta en un 55% de la producción de silicio, y otra parte se va a la industria química para preparar sílice fría, como silanos y silicones.

Con el silicio de muy alta pureza (llamado 9 N grado electrónico) se producen semiconductores; este material se prepara por la técnica electrolítica repitiendo varias veces el proceso hasta alcanzar la pureza 9 N, o sea 99.9999999%.

Otras Aplicaciones del Silicio (7,9)

Los compuestos del Si con oxígeno e hidrógeno resisten bien las altas temperaturas, por eso se emplean para producir utensilios para cocina, charolas para hornear y guantes de cocina.

Como se muestra en la Tabla 3, otros compuestos de silicio que contienen carbono llamados silicones tienen importantes aplicaciones en medicina, como implantes, válvulas, lentes de contacto. Materiales de construcción: los silicatos se emplean comercialmente como: arcilla, arena (SiO_2) y piedras de construcción, todos ellos materiales estructurales. Los silicatos se usan en la fabricación de cemento Portland, combinado con arena, grava y granito se tiene el cemento usado en las grandes



Figura 3. Piedra vena de cuarzo y areniscas, se emplean para la fabricación de vidrio.



Figura 4. Sílice (SiO_2) y cristobalita se emplean para la elaboración de cerámica fina.

Aplicaciones en la industria	Vidrios, porcelana, lubricantes, barnices, abrasivos, pinturas, adhesivos, impermeabilizantes, transductores
	Repelentes de agua
	Láseres con $\lambda = 456 \text{ nm}$
	Constituyente de las aleaciones de acero al silicio (Fe-C-Si)
Industria de la construcción	Ladrillos, esmaltes, hormigón, cemento Portland y cerámicas
Tecnología espacial	Celdas fotovoltaicas, sensores de radiación solar o radiómetros fotovoltaicos y radares
Industria electrónica	Transistores, celdas solares, semiconductores, microprocesadores, circuitos integrados sobre oblea de silicio y microdispositivos
Agricultura	Fertilizantes en forma de mineral primario rico en silicio
Medicina	Silicones: implantes de seno y lentes de contacto, prótesis valvulares cardíacas e implantes de mama

Tabla 3. Tabla de aplicaciones del silicio y sus compuestos [21].

construcciones. Materiales cerámicos y vidrio: los minerales base silicatos se usan para fabricar vidrio y cerámica, como vajillas y otras piezas de decoración, así como ladrillos refractarios.

Preparación de Silicio Grado Electrónico (1,2)

Para la construcción de dispositivos semiconductores es necesario un silicio de mayor pureza, silicio ultrapuro, que puede obtenerse por métodos físicos o químicos.

Los métodos físicos de purificación del *silicio metalúrgico* se basan en la mayor solubilidad de las impurezas en el silicio líquido, de forma que éste se concentra en las últimas zonas solidificadas.

El primer método usado de forma limitada para construir componentes de radar durante la segunda guerra mundial consiste en moler el silicio de forma que las impurezas se acumulen en las superficies de los granos; disolviendo éstos, parcialmente, se obtenía un polvo más puro.

La fusión por zonas: el primer método usado a escala industrial consiste en fundir un extremo de la barra de silicio y trasladar, lentamente, el foco de calor a lo largo de la misma de modo que el silicio vaya solidificando con una pureza mayor al arrastrar a la zona fundida gran parte de las impurezas. El proceso puede repetirse las veces que sea necesario hasta lograr la pureza deseada y luego cortar el extremo en el que se han acumulado las impurezas.

De la producción global de silicio, sólo una pequeña fracción, digamos del orden de una milésima parte, se vuelve a purificar para producir el llamado *silicio grado semiconductor* que es utilizado en la industria electrónica, donde los requerimientos de pureza del material son mucho mayores.

Los métodos químicos para purificar al silicio usados actualmente, se aplican a compuestos de silicio que sean más fáciles de purificar. Los compuestos comúnmente usados son el triclorosilano (SiHCl_3), el tetracloruro de silicio (SiCl_4) y el silano (SiH_4).

El proceso es el siguiente:

Primero el silicio metalúrgico se convierte en gas mediante un proceso químico. Para ello, el silicio metalúrgico sólido se hace reaccionar con ácido clorhídrico (HCl) a 300 °C en un reactor para obtener triclorosilano, según la reacción:



La clave del proceso es que, durante la reacción, las impurezas del silicio tales como Fe, Al, o B reaccionan con el HCl formando haluros (FeCl₃, AlCl₃ y BCl₃). Estos compuestos se pueden separar del silicio realizando un proceso de destilación fraccionada, que consiste en la separación sucesiva de los líquidos de la mezcla del SiHCl₃ y los diversos haluros (impurezas), aprovechando la diferencia entre sus puntos de ebullición.

Finalmente, el SiHCl₃ ya purificado se hace reaccionar con hidrógeno a 1100 °C durante 200 – 300 horas mediante la siguiente reacción:



El proceso tiene lugar en el interior de grandes cámaras de vacío, en las que el silicio se condensa y se deposita sobre barras de polisilicio para obtener sobre ellas el silicio ya purificado.

Este silicio es ahora *silicio grado semiconductor* o silicio electrónico (EGS, por sus siglas en inglés: *Electronic Grade Silicon*). Este proceso es denominado proceso *Siemens*.

El silicio producido por éste y otros métodos similares se denomina silicio policristalino y típicamente tiene una fracción de impurezas de 0.001 ppm (partes por millón) o menor.

El segundo método para obtener silicio grado electrónico es el método *Dupont* que consiste en hacer reaccionar tetracloruro de silicio a 950 °C con vapores de zinc muy puros:



Este proceso produce un silicio de alta pureza, pero no es usado comercialmente pues su obtención es muy compleja y, además, resulta químicamente muy inestable.

Con el proceso *Siemens* y el método *Dupont* tenemos un material muy puro, pero no en forma cristalina. Para que un dispositivo electrónico (celdas solares, circuitos electrónicos, etc.) funcione eficientemente, es necesario que el material de partida sea cristalino y lo más libre posible de defectos.

La técnica más ampliamente usada para obtener monocristales de silicio es la conocida como crecimiento *Czochralski*. En esta técnica lo que se hace es fundir el silicio en un horno apropiado bajo atmósfera inerte e introducir en la fundición una “semilla”, esto es un monocristal de silicio con la orientación cristalina con la que se desea crecer el lingote. Simultáneamente, se rota la semilla respecto del crisol y se tira hacia arriba. Todo el proceso se con rapidez y temperatura controladas. Durante la fundición del Si se pueden introducir impurezas controladas; dependiendo de qué tipo sean, tendremos un Si de tipo *p* o de tipo *n*.

Los átomos de silicio se “pegan” a la semilla copiando la estructura cristalina de ésta. El silicio se comienza a solidificar a medida que sale de la fundición obteniéndose un lingote cilíndrico que puede llegar a las 6” pulgadas de diámetro y 1 a 2 metros de longitud. En este proceso se agregan al Si trazas de algún elemento del

grupo 15 de la Tabla Periódica, tal como el fósforo (≈ 1 ppm). Este material que contiene un exceso de electrones respecto del silicio puro se denomina **silicio tipo *n***; en este caso decimos que el silicio está dopado con fósforo. Cuando el Si se dopa con un elemento del grupo 13 de la Tabla Periódica tal como el boro, se obtiene el **silicio tipo *p***.

Si unimos estos dos tipos de materiales obtenemos una mezcla *p-n*, que no es más que el conocido diodo. Al unirlos se produce un acomodamiento de las cargas: los electrones en exceso en el lado *n* tienden a ir al lado *p*, donde hay faltantes de ellos.

Como resultado de este fenómeno, el lado *n* queda con una carga neta positiva debido a los núcleos de fósforo, y el lado *p* queda con una carga neta negativa debido al exceso de electrones. Se genera, de esta forma, un campo eléctrico en el interior del material. Este campo eléctrico lo que hace es empujar las cargas permitiendo que éstas lleguen a los contactos metálicos situados en la superficie.

Existe, además, otro método de purificación del lingote de Si, que es el denominado *Zona Flotante*. Consiste en re-fundir al lingote crecido por el método *Czochralski*, calentarlo en forma localizada y así sacar las impurezas a la superficie.

Dado que sólo hacen falta unos 100 micrones (0.1 mm) de silicio para obtener prácticamente todos los fotones, se corta el lingote en obleas de unos 300 micrones de espesor. Finalmente, con un ataque químico se elimina el daño superficial producido por el corte. Ya tenemos las obleas; lo que sigue es obtener a partir de ellas las celdas solares, los dispositivos electrónicos, los circuitos integrados, etc.

Por sus propiedades, el silicio monocristalino es el material base de la industria electrónica y microelectrónica, empleado para la fabricación de transistores, celdas solares y todo tipo de dispositivos semiconductores.



Figura 5. La arena sílicea se utiliza para la producción de moldes de fundición.



Figura 6. La piedra sílex es empleada en la fabricación de abrasivos.

Bibliografía

1. Martínez, M. *Materiales y materias primas. Silicio*. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación tecnológica: Buenos Aires. 2011.
2. Mártel, I. *Silicio, la materia prima de dos revoluciones: la electrónica y la energética*. [Online], 2016. <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2016/11/18/silicio-la-materia-prima-de-dos-revoluciones-la-electronica-y-la-energetica/> (visitado abril 21, 2020).
3. Elementos. Elementos de la Tabla Periódica y sus propiedades. [Online]. <https://elementos.org/es/silicio> (visitado 20 de ago. de 2019).
4. Zhang, T.; Wu, X.; Luo, T. Polymer Nanofibers with Outstanding Thermal Conductivity and Thermal Stability: Fundamental Linkage between Molecular Characteristics and Macroscopic Thermal Properties. *J. Phys. Chem. C*, **2014**, 118, 36, 21148-21159.
5. Proyecto de innovación para la enseñanza de la química. Tabla periódica de los elementos. [Online]. <http://quimicageneralpapimeunam.org.mx/tabla%20periodoca/TABLA%20PERIODICA.htm> (visitado abril 21, 2020).
6. Lenntech. Tratamiento y purificación del agua. Tabla periódica. Elementos. Silice. [Online]. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm> (visitado abril 21, 2020).
7. Rodríguez, M. El Silicio y los silicatos. [Online], 2011. (visitado abril 21, 2020) <http://depa.fquim.unam.mx/silicatos/Introduccion.html>
8. Singh, V.; Bougher, T. L.; Weathers, A.; Cai, Y.; Bi, K.; Pettes, M. T.; Mc Menamin, S.A.; Lv, W.; Resler, D.P.; Gattuso, T.R.; Altman, D.H.; Sandhage, K. H.; Shi, L.; Henry, A.; Cola, B. A. High thermal conductivity of chain-oriented amorphous polythiophene. *Nat Nanotechnol.* **2014**, 9, 384-390.
9. Lunn, B.A.; Unsworth, J.; Booth, N. G.; Innis P. C.; Determination of the thermal conductivity of polypyrrole over the temperature range 280-335 K. *J Mater Sci.* **1993**, 28, 5092-5098.
10. Zhang, T.; Wu, X.; Luo T. Polymer Nanofibers with Outstanding Thermal Conductivity and Thermal Stability: Fundamental Linkage between Molecular Characteristics and Macroscopic Thermal Properties. *J Phys Chem C*. **2014**, 118, 36, 21148-21159.
11. El grafeno: propiedades y aplicaciones. Graphenano nanotechnologies: Murcia. [Online], 2017 (visitado abril 21, 2020). <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
12. Yang, Y.; Cao, J.; Wei, N.; Meng, D.; Wang, L.; Ren, G.; Yan, R.; Zhang, N. Thermal Conductivity of Defective Graphene Oxide: A Molecular Dynamic Study. *Molecules*. **2019**, 24, 1103- 1112.
13. Ficha de datos de seguridad de materiales. Graphene Oxide. Graphenea S.A.: San Sebastián. [Online], 2012 (visitado abril 21, 2020). https://uwaterloo.ca/giga-to-nanoelectronics-centre/sites/ca.giga-to-nanoelectronics-centre/files/uploads/files/graphene_oxide.pdf
14. Productos. Reduced Graphene Oxide. Graphenea. [Online], (visitado abril 21, 2020). <https://www.graphenea.com/products/reduced-graphene-oxide-1-gram>
15. Skotheim, T.A.; Reynolds, J. R. *Handbook of Conducting Polymers. Conjugated Polymers. Theory, Synthesis, Properties and Characterization*. CRC Press: Boca Raton FL. 2007.
16. Ziadán, K. M.; Saadon, W.T. Study of the electrical characteristics of polyaniline prepared by electrochemical polymerization. *Energy Pro.* **2012**, 19, 71-79.
17. Chen, CH. Thermal and morphological studies of chemically prepared emeraldine-base-form polyaniline powder. *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, 89, 8.
18. Olmedo, J; Farías B.; Hernández, C.; Pérez, F.; Vega, A.; Zaragoza, A. Síntesis y propiedades eléctricas de biocompositos polianilina/ carragina. *Memorias Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria*, Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua: Chihuahua, Chih. **2013**.
19. Bustillo, M. A. Las rocas silíceas como materia prima en la industria actual. Rocas Industriales y Ornamentales. *Boletín Geológico y Minero*. **1989**, Vol. 100-6. 1102-1111.
20. Guzmán, F. Cosechador de energía. Electricidad basada en el ruido urbano o ambiental. *Gaceta Digital UNAM*, [Online], **2015**, 4672 <https://boletinboces.wordpress.com/2015/02/24> (visitado abril 21, 2020)
21. Clarson S. J.; Semlyen, J. A. *Siloxane polymers*. Englewood Cliffs, Prentice Hall: N.J., 1993.

Lavaojos

Todos los usuarios de laboratorio deben conocer la ubicación (señalizada) y el funcionamiento correcto.



Existen varios modelos de estaciones de lavado de ojos: montados en tarjas, de barra, de pedestal, de grifo, acopladas a regaderas de emergencia [1].

En general, están diseñadas para que se accionen muy fácilmente, jalando o presionando alguna palanca/válvula y al fluir el agua, el chorro bota las capuchas que cubren las salidas de agua.

La persona afectada debe mantener los párpados abiertos con sus dedos y mover en forma circular los globos oculares para lograr un lavado eficaz.



Lugar de Trabajo

Cuando alguna sustancia (líquidos, vapores o polvos) entre en contacto con los ojos, es importante usar las estaciones de lavado de ojos. Nunca tallarse los ojos.

El lavado de ojos debe realizarse durante mínimo 15 minutos.

Es muy probable que la persona afectada necesite ayuda para dirigirse a la estación y accionarla.

Después, siempre acudir al médico para revisión.

Los accesos deben estar totalmente libres.

Las regaderas de emergencia y estaciones de lavado de ojos deben ubicarse a no más de ~16 m (55 ft) de distancia del área de trabajo o de riesgo.



Las botellas para lavado de ojos deben estar disponibles cuando las estaciones de lavado de ojos se encuentren lejos, y usarse en lo que la persona afectada llega a éstas para realizar un lavado adecuado.

Es importante verificar correcto funcionamiento de estaciones de lavado de ojos (accionarlas por varios minutos, lo que además remueve el agua estancada en la tubería) y cambiar la solución lavaojos o el agua de botellas lavaojos mensualmente.

Se recomienda llevar un registro de verificación de funcionamiento.

*Puedes encontrar información útil en:

- Safety Showers and Eye Washes in the Laboratory - V0002039EL. Youtube, Canal nrscsafetyvideos, <https://www.youtube.com/watch?v=2TbTZIPmZVo>, publicado 14 enero 2015, abril de 2020.
- Safety Showers and Eye Washes Training. Youtube, Canal Convergence Training, <https://www.youtube.com/watch?v=NvLo71GmDmc>, publicado 17 mayo 2013, abril de 2020.

Referencias:

- [1] Regaderas y lavaojos de emergencia. Soluciones Gabamex S. A. de C.V. <https://www.regaderasylavaojos.com.mx/>, abril 2020.
- [2] PEOSH Medical Services and First Aid Standard (29 CFR 1910.151). NJHealth. <https://www.state.nj.us/health/workplacehealthandsafety/peosh/peosh-health-standards/medsvcs.shtml>, abril 2020.
- [3] Refillable Eyewash Station-9492D. Seton. <https://www.seton.com/refillable-eyewash-station-9492d.html>, abril 2020.

Diseño de pictogramas de esta sección: Carlos Rivera Vega



Boletín de la Sociedad Química de México