



Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Química



# Química General

## *Una Aproximación Histórica*

José Antonio Chamizo

### Sobre el título

Química General apela, en su sentido más amplio, a introducir los diversos aspectos de la práctica química que se han sucedido a lo largo de la historia. No es la Química General convencional, desarrollada por los fisicoquímicos de principios del siglo XX y que se encuentra en cualquier libro con ese nombre y que se presenta en el Apéndice 2 del presente texto. La premisa es que todos los alumnos que quieran adentrarse en los diversos terrenos que la Química abarca hoy deben, desde el principio, reconocerse en el mismo. Hay espacio para todos los interesados en esta tecnociencia, en cualquiera de sus ramas o especializaciones.

En esta obra, la Química General se aborda, además del encuadre histórico que considera desde las prácticas alquímicas hasta la contaminación por plásticos de los océanos, con otros elementos que enriquecen el panorama de su devenir a través del tiempo:

- Relatos en primera persona de algunos de los protagonistas
- Instrumentos y experimentos
- Química Orgánica, Organometálica y/o Femtoquímica
- Espectroscopia
- Industria química

Con ello se pretende mostrar a los jóvenes que inician el camino de la Química, la diversidad de prácticas e intereses que han acompañado a nuestra comunidad a lo largo de milenios.







# **QUÍMICA GENERAL**

UNA APROXIMACIÓN HISTÓRICA







# QUÍMICA GENERAL

UNA APROXIMACIÓN HISTÓRICA

José Antonio Chamizo



**Primera edición: 2018**

Fecha de edición: 25 de mayo de 2018

D.R. © 2018 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán,

C.P. 04510, Ciudad de México.

ISBN: 978-607-30-0852-5

Tamaño: 25.0 MB

Tipo de impresión: PDF

Tiraje: 1 (web)

“Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio,  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales”

**Publicación autorizada por el Comité Editorial de la Facultad de Química.**

**Hecho en México.**

# Índice

<b>Presentación</b>	<b>10</b>
<b>Introducción</b>	<b>11</b>
La continuidad	11
La ruptura	12
<b>1 Alquimia</b>	<b>14</b>
1.1 Acontecimientos	15
1.2 Instrumentos: Alambique	19
1.3 Textos originales	
<i>Alegorías y analogías en la literatura alquímica.</i> Croeland	20
<i>Opera Omnia.</i> Paracelso	22
1.4 Experimentos	
Obtención de cobre a partir de uno de sus minerales	24
1.5 La reacción química. Ácidos y bases	27
<i>Industria y medio ambiente. Licores alcohólicos</i>	29
1.6 Autoevaluación	30
<b>2 Protoquímica</b>	<b>32</b>
2.1 Acontecimientos	33
2.2 Instrumentos: Bomba de vacío	35
2.3 Textos originales	
<i>El químico escéptico.</i> Boyle	36
2.4 Experimentos	
Los metales se pueden quemar	38
2.5 La reacción química. Ácidos y bases	40
<i>Industria y medio ambiente. Ácido sulfúrico</i>	41
2.6 Autoevaluación	42
<b>3 Primera revolución (1754-1818)</b>	<b>44</b>
3.1 Acontecimientos	45
3.2 Instrumentos:	
Cuba hidroneumática	47
Balanza de precisión	48
Calorímetro	48
3.3 Textos originales	
<i>Tratado Elemental de Química.</i> Lavoisier	49
<i>Un nuevo sistema de filosofía química.</i> Dalton	51
3.4 Experimentos	
La descomposición del agua por electrólisis	53
3.5 La reacción química. Ácidos y bases	54
<i>Industria y medio ambiente. Carbonato de sodio</i>	56
3.6 Autoevaluación	57
<b>4 Segunda revolución (1828-1874)</b>	<b>60</b>
4.1 Acontecimientos	61
4.2 Instrumentos:	
Kaliapparat	63
Polarímetro	65
4.3 Textos originales	
<i>Bosquejo de un Curso de Filosofía Química.</i> Cannizzaro	66
<i>Principios de química.</i> Mendeleiev	69
4.4 Experimentos	
Los colorantes sintéticos	72
El nacimiento de la espectroscopia	73



4.5 La reacción química. Ácidos y bases	74
<i>Industria y medio ambiente. Los colorantes</i>	75
4.6 Autoevaluación	76
<b>5 Tercera revolución (1887-1923)</b>	<b>78</b>
5.1 Acontecimientos	79
5.2 Instrumentos:	
Tubo de rayos catódicos	82
Espectrógrafo de masas	83
5.3 Textos originales	
<i>La síntesis de amoníaco a partir de sus elementos. Haber</i>	84
<i>Valencia y la estructura de los átomos y las moléculas. Lewis</i>	86
5.4 Experimentos	
La baquelita, el primer plástico sintético	89
5.5 La reacción química. Ácidos y bases	91
<i>Industria y medio ambiente. La síntesis artificial del amoníaco</i>	93
5.6 Autoevaluación	94
<b>6 Cuarta revolución (1945-1966)</b>	<b>96</b>
6.1 Acontecimientos	97
6.2 Instrumentos	
Cromatografía de gases	100
Resonancia Magnética Nuclear	101
6.3 Textos originales	
<i>Ciencia y paz. Pauling</i>	103
<i>Avances recientes en la química de los productos naturales. Woodward</i>	105
6.4 Experimentos	
Cromatografía de partición, separación de los colorantes de la espinaca	108
6.5 La reacción química. Ácidos y bases	109
<i>Industria y medio ambiente. Los plásticos</i>	111
6.6 Autoevaluación	112
<b>7 Quinta revolución (1974-1999)</b>	<b>116</b>
7.1 Acontecimientos	117
7.2 Instrumentos	
Resonancia Magnética Multinuclear ( <sup>19</sup> F, <sup>31</sup> P, <sup>13</sup> C, <sup>15</sup> N)	120
Detector de Captura de Electrones (ECD)	121
Microscopio de Barrido de efecto túnel (STM)	122
Fotólisis de destello con láser de zafiro-titanio	124
7.3 Textos originales	
<i>Femtoquímica. Zewail</i>	125
<i>Homenaje a Gaia. Lovelock</i>	127
7.4 Experimentos	
Síntesis de ferroceno, el inicio de la Química Organometálica moderna	129
7.5 La reacción química. Ácidos y bases	131
<i>Industria y medio ambiente. Medicamentos</i>	132
7.6 Autoevaluación	133
<b>Conclusiones</b>	<b>135</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>136</b>
<b>Apéndice 1</b>	
Ejemplos de Diagramas Heurísticos y Rejillas Argumentativas de Toulmin (RAT)	139
<b>Apéndice 2</b>	
Química General Paradigmática	145

## **A Andoni**

*Recuerde el alma dormida,  
avive el seso y despierte  
contemplando  
cómo se pasa la vida,  
cómo se viene la muerte  
tan callando...*



# Presentación

*Después de todo, los libros de texto se escriben tiempo después de los descubrimientos y los procedimientos de confirmación cuyos resultados registran. Además se escriben con propósitos pedagógicos.*

*El objetivo de un libro de texto es el de darle al lector, de la manera más económica y fácil de asimilar, un enunciado de los que la comunidad científica contemporánea cree que sabe, así como de los usos principales que puede dársele a ese conocimiento.*

*La información relativa a la forma en que se adquirió ese conocimiento –el descubrimiento– y a la razón de que haya sido aceptado por la profesión–confirmación– es, en el mejor de los casos, un exceso de equipaje. No obstante que incluir esa información podría aumentar los valores “humanistas” del texto y fomentar la educación de científicos más flexibles y creativos, haría también que el texto se alejara de la facilidad de aprender el lenguaje científico contemporáneo.*

*Hasta la fecha sólo el último objetivo ha sido tomado en serio por la mayoría de los escritores de libros de texto de ciencias naturales.*

**T. Kuhn, 1971**

*Dejemos de buscar un sentido a la historia, puesto que no la tiene. Está constantemente a punto de abortar. El mundo no va a ninguna parte. A cada instante puede volver la barbarie; con él, lo peor es siempre lo más probable. Pero nos vemos obligados a rehusar la evidencia y resistir lo ineluctable:*

*para dar una pequeña oportunidad a la eternidad, puesto que no podemos predecir el futuro, no nos queda más que inventarlo.*

**J. Attali, 1999**

**E**l presente texto concreta una idea acariciada hace mucho tiempo: construir un curso de introducción a la Química a partir de su historia. A lo largo de muchos años, mis alumnos, en la Facultad de Química de la UNAM o en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav), han venido participando de diversas aproximaciones a ese fin y en diversas asignaturas. He abordado la historia de nuestra disciplina en Química General, Química Organometálica, Historia de la Química, Historia y Filosofía de la Química e Historia y Filosofía de la Ciencia. También en diplomados para profesores, en bachillerato, licenciatura y en posgrado. Además, a través de la escritura de otros tantos libros, muchos de los cuales aparecen en la sección de bibliografía del presente. Todo lo anterior me llevó a consolidar una manera particular de hacerlo, una aproximación original que consolidé recientemente en estancias académicas en la Universidad de Cincinnati y en la Autónoma de Barcelona. Así llegué a un primer borrador que probé en dos asignaturas diferentes con alumnos de licenciatura en el curso 2017-2. De esa prueba, eliminando lo que parecía excesivo y precisando lo que se reconoció como fundamental, resulta este documento.

Me acompañaron en este trayecto varios colegas de diversos países, pero particularmente Plinio Sosa, Bill Jensen y Agustí Nieto, con intensas, extensas y muy históricas discusiones. Quiero agradecer la paciencia y el trabajo de esos muchos alumnos que leyeron fragmentos del texto, resolvieron ejercicios, realizaron prácticas de laboratorio, construyeron diagramas heurísticos o sostuvieron argumentos, en especial a dos de ellos, que recibieron su grado de químicos por sus trabajos de tesis en estos temas: Carlos de la Mora y Alberto Basante. Finalmente, al Consejo Técnico de la Facultad de Química, a Brenda Álvarez por su dedicado trabajo editorial y a la DGAPA-UNAM por su apoyo para realizar las estancias ya indicadas y la publicación del presente libro.

**JAC**

# Introducción

*Para dominar el tiempo y la historia,  
y para satisfacer las propias aspiraciones  
a la felicidad y a la justicia o los temores frente al engañoso  
e inquietante concatenarse de los acontecimientos,  
hemos buscado la forma de dividir los tiempos históricos.*  
**J. LeGoff, 2001**

**T**al como hoy la conocemos, la Química es resultado de una multitud de herencias que, concretadas en oficios, influyeron en la vida cotidiana de todas las culturas. No deja de ser sorprendente que prácticas tan diferentes como la del herrero –y la metalurgia–, el curandero –y la farmacia–, el alfarero –y la cerámica–, el panadero –y la biotecnología– hayan podido estar reunidas y terminar por fundirse en un campo común: la Química, donde se estudia, se practica y se transmite cómo transformar las sustancias.

La historia es lo que contamos hoy, con la información que tenemos de ayer. Hay diversas maneras de hacerlo que se sostienen en diferentes posturas historiográficas. Por un lado, hay dos posturas que ubican el tiempo desde donde la historia se cuenta, es decir, desde el pasado o desde el presente y que en términos históricos se reconocen como anacrónica (A) y diacrónica (D). En la estrategia anacrónica, el pasado se estudia y se valida de manera “absoluta” a la luz del presente. Esta postura etiquetada con el nombre de interpretación “whig” ha sido ampliamente utilizada y también muy cuestionada. Por otra parte, la estrategia diacrónica consiste en estudiar la ciencia del pasado de acuerdo con las condiciones que existían realmente en ese pasado. Sin embargo, esto no es más que un ideal, ya que los historiadores no pueden liberarse totalmente del tiempo en el que viven.

Particularmente alrededor de las ciencias y las tecnologías se pueden identificar dos grandes tendencias:

- La de una extendida continuidad, alrededor de diferentes formas o estilos de conocer.
- La de ruptura, alrededor de la idea de revolución científica u obstáculo epistemológico.

A continuación se presentarán las ideas principales de ambas tendencias.

## La continuidad

*La historia de la ciencia no es el resultado de hechos sucesivos o el  
reemplazo de un tipo de conocimiento por otro, sino más bien  
la coincidencia, a lo largo del tiempo, de la acumulación compleja y  
la variedad simultánea de conocimiento.*  
**J. Pickstone, 2000**

**L**a epistemología es la rama de la Filosofía que busca responder a la pregunta ¿cómo conocemos? De entre las diversas respuestas, aquí se trabajará con la propuesta por el historiador y filósofo inglés J. Pickstone. De acuerdo con él hay tres formas de conocer: la historia natural, el análisis y la síntesis.

La historia natural se refiere a una primera clasificación de los componentes del mundo. Comprende la variedad de objetos naturales o artificiales, normales o patológicos. Es el espacio de las taxonomías (celestes, geológicas o biológicas) y del lugar donde se vuelven públicas: los jardines botánicos, los zoológicos y los grandes museos de ciencias.

Si la variedad y el cambio son identificados por la historia natural, el análisis busca el orden por disección. El análisis aparece cuando los objetos se pueden ver como compuestos de “elementos”

o cuando los procesos se pueden ver como el “flujo” de un “elemento” a través de un sistema. Es el espacio de los laboratorios de Anatomía, Química, Física e Ingeniería y del lugar donde se vuelven públicos: escuelas, institutos, politécnicos, hospitales y universidades.

Si el análisis considera el separar cosas, la síntesis es sobre cómo ponerlas juntas. El análisis especifica la composición de lo “conocido” para, posteriormente, poniendo juntos los “elementos”, crear nuevos objetos o fenómenos. La síntesis se basa en la producción sistemática de la novedad. Es el espacio “privado” del control, ya sea por motivos militares o económicos, de los laboratorios de Biomedicina y Farmacia, de diseño de nuevos materiales o de Física nuclear, así como del lugar donde se vuelven públicos, el complejo tecnocientífico industrial.

Estas tres formas de conocer pueden coincidir en el mismo periodo histórico, aunque se reconoce que la historia natural es la más antigua y la síntesis, la más moderna. En el mundo globalizado, la creación de la novedad sirve cada vez más al mercado y es decisiva en la batalla económica que se libra, particularmente, entre las grandes compañías transnacionales. El producto de la ciencia, “el conocimiento científico” es así cada día menos público y más privado.

La Química es una de las disciplinas científicas que mejor ejemplifican esta tendencia. La antiquísima y también moderna clasificación de las sustancias en ácidos y bases es historia natural. La separación de las mezclas en sustancias y éstas, a su vez, en elementos es nuestro análisis que permitió, separando del aire los gases que lo constituyen, el nacimiento de la Química tal y como hoy la conocemos. Finalmente, unir esos elementos para producir nuevas sustancias es la síntesis. Las decenas de millones de sustancias sintéticas que pueblan nuestro mundo es una demostración de la capacidad tecnocientífica de la Química.

De manera breve, la tecnociencia se caracteriza por ser un conjunto de acciones eficientes, basadas en conocimiento científico que transforman al mundo basándose en una serie de valores, como lo pueden ser la ganancia económica, el prestigio social, la resolución de problemas que afectan a una determinada población, etc. Por oposición a lo que comúnmente se acepta que es la ciencia moderna, la tecnociencia implica no sólo una profesionalización, sino una empresarialización de la actividad científica. La tecnociencia como tal surgió en el siglo XIX con las industrias farmacéutica y eléctrica.

## La ruptura

*El paradigma es un criterio para seleccionar problemas que, mientras se dé por sentado el paradigma, puede suponerse que tienen soluciones.*

**T. Kuhn, 1971**

Una revolución científica es para el filósofo e historiador estadounidense T. Kuhn: “una clase especial de cambio, que abarca cierta índole de reconstrucción de los compromisos de cada grupo”. Los compromisos que comparten los grupos o comunidades científicas se reconocen con la palabra paradigma. Entre una revolución científica y otra, las comunidades científicas desarrollan “ciencia normal”, periodo durante el cual los compromisos fundamentales de los grupos, es decir, el paradigma, no se cuestionan y el conocimiento crece y se acumula.

Así las diferentes comunidades científicas comparten a lo largo de la historia un paradigma y alrededor del mismo trabajan haciendo “ciencia normal” que es para Kuhn:

la actividad en que inevitablemente, la mayoría de los científicos consumen casi todo su tiempo, se predica suponiendo que la comunidad científica sabe cómo es el mundo. Gran parte del éxito de la empresa se debe a que la comunidad se encuentra dispuesta a defender esa suposición, si es necesario, a un costo elevado. Por ejemplo, la ciencia normal suprime frecuentemente innovaciones fundamentales, debido a que resultan necesariamente subversivas para sus compromisos básicos.

Cuando hay una revolución científica, la comunidad cambia su paradigma, modificando las actividades relacionadas con la ciencia normal y, de manera muy importante, su enseñanza, ya que después de la revolución se escriben de nuevo los libros de texto.

Una revolución científica ocurre cuando se presenta uno o varios de los siguientes acontecimientos:

- Relatos de la época, generalizados y persistentes, que hacen afirmaciones explícitas de que una revolución científica se está llevando a cabo.
- Cambios explícitos y significativos en el contenido, el vocabulario y la organización de los libros de texto antes y después del periodo en cuestión.
- Cambios significativos en el énfasis de la investigación y la práctica científica; por ejemplo, a través del uso de nuevos instrumentos.
- Cambios significativos en la estructura de las organizaciones académicas y profesionales, incluyendo la fundación de nuevas cátedras, nuevos institutos de investigación, nuevas sociedades científicas y revistas nuevas, es decir, aparecen nuevas subdisciplinas.

Con esta aproximación al estudio de la historia, es posible reconocer que las épocas históricas están marcadas no sólo por personas, instituciones o subdisciplinas, sino también por objetos epistémicos, esto es, entidades que identificamos como partes constitutivas de la realidad.

Para el caso de la Química se pueden reconocer cinco revoluciones como se muestra en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Las cinco revoluciones de la Química.

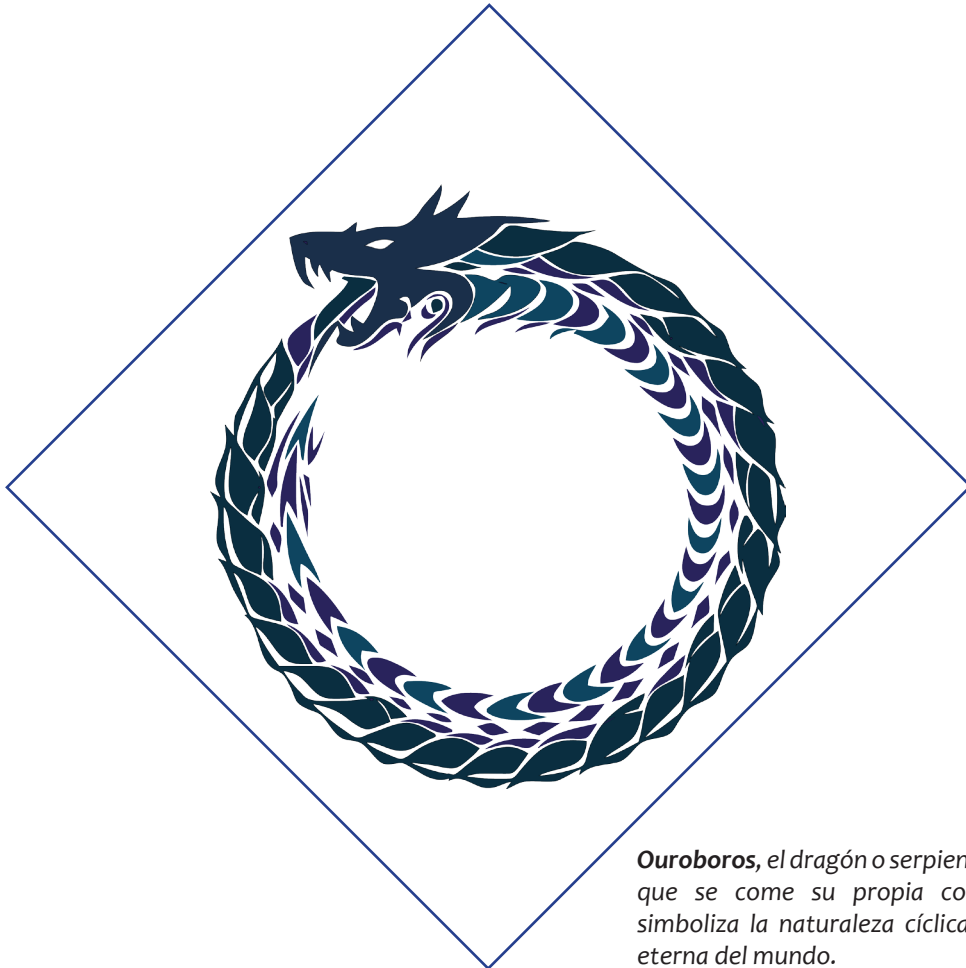
AÑOS	PROTAGONISTAS	INSTRUMENTOS	SUBDISCIPLINAS	ENTIDADES
① 1754- 1818	Black, Cavendish, Priestley, Lavoisier, Dalton	cuba neumática balanza calorímetro	Química	átomo
② 1828- 1874	Wholer, Berzelius, Liebig, Cannizzaro, Pasteur, Mendeleiev	kaliapparat polarímetro	Orgánica	molécula
③ 1887- 1923	Thomson, Ostwald, Lewis, Aston, Curie, Rutherford	tubo de rayos catódicos espectrómetro de masas	Fisicoquímica	electrón, núcleo, isótopo, radical
④ 1945- 1966	Zavoisky, Tiselius, Pauling, Woodward, Martin, Synge, Mulliken	cromatógrafo, UV, IR, Resonancia Magnética Nuclear	Química Instrumental Química Cuántica Biología Molecular	espín
⑤ 1974- 1999	Lovelock, Fisher, Wilkinson, Crutzen, Molina, Rowland, Kroto, Curl, Samlley, Cram, Lehn, Pedersen, Binning, Roher, Zwill	detector de captura de electrones microscopía de efecto túnel de barrido fotólisis de destello con haz láser de Ti-zafiro	Organometálica Química verde Supramolecular Nanoquímica Femtoquímica	nanopartícula

Sin embargo, para tener una idea más completa de la Química no se pueden ignorar sus milenarios antecedentes, es decir, la alquimia y un periodo de transición que aquí se denominará la *protoquímica*.

A lo largo del presente texto, ocultando y simplificando el complejo devenir de los acontecimientos humanos y mostrando la manera en la que los químicos han conocido el mundo, en buena medida a través del uso de instrumentos y experimentos, se ordena la historia de la Química en siete grandes periodos: el primero corresponde a la alquimia con toda su carga alegórica y mística; el segundo es el paso de los oficios a la ciencia moderna: la protoquímica; para finalmente identificar las cinco revoluciones químicas que marcan el desarrollo de nuestra disciplina.



# 1 Alquimia



**Ouroboros**, el dragón o serpiente que se come su propia cola, simboliza la naturaleza cíclica y eterna del mundo.

## 1.1 Acontecimientos

*La historia de la civilización humana ha sido, en cierto sentido, la historia de lo artificial.*

*Cuando los primeros humanos se apartaron de la caza por la agricultura, ya habían dominado muchas técnicas para la preparación de pieles animales para el vestido y de plantas y productos minerales para la construcción.*

*En algún punto la lana comenzó a reemplazar la desnudez, lo que representa un excelente ejemplo de lo artificial para sustituir a lo natural, aunque este periodo de transición ha sido durante mucho tiempo perdido en la memoria colectiva de la humanidad.*

**Bernadette Bensaude-Vincent, 2008**

**D**e lo que hoy es Japón, provienen los restos de los primeros materiales cerámicos fechados hace más de 15 mil años. Aunque en zonas aledañas de Asia se han encontrado restos semejantes producidos miles de años después, nuestra historia empieza con la extracción y manipulación de los metales y la construcción de las primeras piezas de cerámica, hecho ocurrido hace cerca de 8 mil años en la zona de Medio Oriente (aproximadamente lo que hoy abarcan los territorios de Egipto, Iraq, Irán, Líbano, Siria y Turquía). Eso sucedió allí y no en otra parte, porque además de estar disponibles las materias primas adecuadas, las sociedades humanas que habitaban esa parte del mundo habían ya domesticado el trigo y el olivo, además de las cabras y las ovejas, lo que les garantizaba, junto con los peces y las frutas del lugar una segura y variada ingesta alimenticia, acompañada originalmente de pan y cerveza, y posteriormente de vino. Asimismo, gracias a lo anterior, empezaron a construir asentamientos fijos que darían lugar a las ciudades de las que se derivarían los Estados. Éstos se procuraron a sí mismos identidad mediante la edificación de grandes monumentos (que implicaban a enormes contingentes humanos) como las pirámides en Egipto y también en lo que hoy es México. De Egipto provienen las primeras piezas de vidrio; de Mesopotamia (Iraq), las primeras armas de bronce, y de Creta, los primeros tejidos teñidos. Las expediciones militares del macedonio Alejandro Magno hasta la India ponen en contacto a las culturas mediterráneas e hindúes que permiten intercambiar plantas, animales (por ejemplo, las vacas y el ajonjolí fueron domesticados originalmente en el valle del Indo) y tecnología.

En su largo batallar, Alejandro Magno fundó varias ciudades y una de ellas Alejandría, que ocupa la desembocadura del Nilo, donde se unieron el pensamiento griego con los saberes prácticos egipcios (por ejemplo, el de las técnicas de momificación) puede identificarse como el primer núcleo urbano en el que surgió la alquimia. Los alquimistas, como los magos y curanderos y a diferencia de los sacerdotes, intervenían en el mundo (la diversidad de la preparación de venenos y remedios curativos es otro ejemplo) y en eso se asemejan y son simiente de los químicos actuales. Sin embargo, en el mundo mítico el nombre es parte esencial de lo nombrado y conocer un nombre es apropiarse de algo propio de lo nombrado, poseer un medio para controlarlo. Esta manera particular de entender e intervenir en el mundo hizo que los alquimistas tuvieran a la Iglesia católica como un fuerte enemigo, la que a través de la Inquisición a finales del siglo XV declaró fraudulentas sus prácticas.

Hace unos 5 mil años, en Mesoamérica habían sido domesticados el maíz, los frijoles y los guajolotes. Con las frutas, aves y peces silvestres la base alimenticia estaba completa, aunque está en discusión la ingesta de proteína animal. No había animales grandes para ser comidos ni para arrastrar los carros de ruedas. Las únicas ruedas conocidas en nuestro continente se utilizaron sólo en algunos juguetes mexicanos. Por el contrario, llamas y alpacas, los mamíferos más grandes de América, vivían en la región andina, donde no se han documentado las ruedas. La papa fue domesticada allí. Los dos grandes áreas culturales de nuestro continente, la andina y la mesoamericana, se desarrollaron y prácticamente desaparecieron sin ningún contacto.

En otras partes del mundo, como ya se indicó, la domesticación de plantas y animales, el uso de carros de ruedas, la metalurgia, la lengua escrita y la pólvora se difundieron fácilmente de un lugar a otro. En diferentes culturas de América se habían desarrollado una amplia variedad de productos, muchos



**Figura 1.1.** Alexander Battling the Persians, from *The Deeds of Alexander the Great* (Alejandro combatiendo a los persas, de *Las hazañas de Alejandro el Grande*). Autor: Antonio Tempesta (1555–1630). Fecha: 1608. Este grabado forma parte de la colección del Museo Metropolitano de Arte (MET) de la ciudad de Nueva York.



**Figura 1.2.** Detalle de *The Death of Socrates* (La muerte de Sócrates). Autor: Jacques Louis David (1748–1825). Fecha: 1787. Esta pintura al óleo forma parte de la colección del Museo Metropolitano de Arte (MET) de la ciudad de Nueva York.



de ellos eran soluciones a las demandas de la vida diaria en ese momento. Por lo que sabemos, estas culturas profundamente religiosas interpretaban el mundo sólo a través de sus dioses. Sin embargo, como en el caso de la alquimia europea o china, el conocimiento empírico era enorme.

Aparte de una antigua tradición en el uso de las plantas medicinales y las técnicas de embalsamamiento de los Andes, hay que mencionar que además del uso de diferentes metales conocidos en Europa, únicamente el platino se documenta en el actual Colombia o que la grana cochinilla, junto con el “caracol púrpura” o el brillante tinte rojo del árbol Brasil (que dio su nombre a todo un país), pintaron de colores al mundo y que el látex (la suspensión coloidal de partículas de goma en agua), que antecedió a la industria de los plásticos, se extrajo principalmente del arbusto guayule y árboles de las selvas de México, Perú y Brasil hace miles de años.

Muchos años después del inicio de la alquimia en Alejandría, también en la zona de influencia del Islam, en lo que hoy es Iraq e Irán, el alambique se perfeccionó, se preparaban medicinas y surgió la primera farmacia. Las bebidas con alcohol (palabra de origen árabe como casi todas las que empiezan en castellano con la sílaba *al*) se destilaban. Es en el siglo XI cuando se publicaban las primeras recetas para producir pólvora en China (en esta región fue donde se domesticó al cerdo, el gusano de seda y el arroz) nación poseedora también de una antigua tradición alquímica más tecnológica que la mediterránea. Años después, a través de los viajes del veneciano Marco Polo, continuados por frailes franciscanos, la medieval Europa trabó relaciones con la refinada China y de pronto el papel, la brújula, la seda y la pólvora se instalaron en lo que llamamos Occidente. Hacia el 1500, en pleno Renacimiento, la alquimia, en sus muchas y diferentes versiones, se practicaba desde Inglaterra hasta China, pero poco a poco cedió el paso a la iatroquímica que, con más intereses medicinales y absorbiendo el incipiente racionalismo de la época, intentaba explicar la razón de venenos y medicamentos.

Los venenos son conocidos por la mayoría de las sociedades humanas desde la más remota antigüedad. Es famosa la imagen que recuerda la ingestión de cicuta por Sócrates en el 399 a.n.e. Siglos antes, los chinos ya usaban el opio tanto con propósitos benéficos como venenosos. En Roma y, posteriormente, en las ciudades italianas del Medioevo y el Renacimiento, hay diversas historias de príncipes y reyes que experimentaban venenos y antídotos con sus esclavos y prisioneros de guerra; de mujeres aristócratas que los usaban para escapar de los matrimonios arreglados y de la familia Borgia, que los usó para acceder al papado. De esa larga y oscura tradición destaca sobremano la frase del médico, alquimista, viajero errante e irreverente Paracelso, quien atravesó la herida y asolada Europa de principios del siglo XVI: “todas las sustancias son venenosas. La dosis correcta diferencia el remedio del veneno”.



La población mundial alcanzó, en el año 1000, los **310 millones de habitantes**. La esperanza de vida es difícil de estimar, por las enormes diferencias existentes entre las diversas culturas que poblaban el planeta, pero una buena estimación la coloca sobre los 30 años, semejante a la que se tenía en la Edad de bronce o en la Grecia antigua, o durante la europea Edad Media o en la América precolombina.

AÑO	HECHOS TECNOQUÍMICOS	HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES
-8000	Se producen objetos con materiales cerámicos en diversos lugares del mundo.	• Comienza la agricultura y crianza de animales
-6000	Los primeros objetos de cobre se producen en Asia.	• La civilización más antigua: Mesopotamia
-2000	Se fabrican objetos de bronce en Asia y Europa y de hule en Mesoamérica.	• Los sumerios inventan la escritura cuneiforme
-1500	Inicia la producción del vidrio en Egipto.	• Cultura minoica en Creta
-1000	Se fabrica papel y pólvora y se utiliza gas natural como combustible en China.	• Se inicia el comercio en el mundo
-500	Se inicia la fabricación de acero en la India.	• Se introduce la brújula en China (-1000)
-400	Se establece en Grecia la idea de los cuatro elementos y Demócrito introduce la idea del átomo. En Alejandría se enseñan las operaciones químicas básicas: filtración, destilación y sublimación. Inicia la alquimia griega.	• Los olmecas construyen pirámides (-800)
-100	En lo que hoy es México se comienza a utilizar un tinte púrpura rojizo obtenido de la grana cochinilla.	• Alejandro Magno invade el norte de la India (-326)
300	El tratado hindú <i>Arthashastra</i> , recopilado durante cinco siglos, da detalles de procesos médicos, metalúrgicos y pirotécnicos, además de la producción de venenos, licores fermentados y azúcar. Zóximo escribe <i>Cheirokmeta</i> , tal vez el primer libro de alquimia.	<b>a.n.e. / d.n.e.</b>
900	Los muchos autores musulmanes que escribieron con el sobrenombre de Jabir indican diversas sales de As, S y Hg, así como la manera de reconocer el Cu por su color a la flama. En la zona de influencia musulmana destacan los persas Al Razi y Avicena. Comienza la destilación del alcohol partiendo del vino y se perfeccionan los alambiques.	• Los mayas inventan el cero (250)
1300	Descubrimiento del ácido nítrico.	• Invasión musulmana a España (711)
1317	En Aviñón, el papa Juan XXII prohíbe la alquimia.	• Carlomagno (800)
1473	<i>De rerum natura</i> de Lucrecio es traducido al latín, lo que permite que los europeos conozcan las ideas atómicas de Demócrito.	• Los vikingos llegan al norte de América (1000)
1530	Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim conocido como Paracelso desarrolla la iatroquímica, introduciendo la Química en la Medicina.	• Viajes de Marco Polo a China (1270-1290)
1553	Bartolomé de Medina inventa en la Nueva España el método de beneficio de la plata en frío.	• Se utilizan las pistolas en Europa (1347)
1597	Libavius publica <i>Alchemia</i> donde se indica, por ejemplo, la preparación del HCl.	• Cristóbal Colón llega a lo que hoy conocemos como América (1492), el nuevo continente

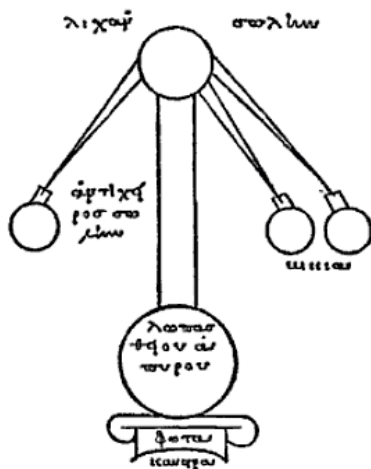


## 1.2 Instrumentos: Alambique

El alambique es un instrumento descrito y, seguramente, inventado por los alquimistas de habla griega que habitaban en la ciudad egípcia de Alejandría entre los años 300 a.n.e. hasta el 200 d.n.e. Se debe a Zóximo de Panópolis<sup>1</sup> la siguiente descripción de uno de ellos:

He de describiros el tribikos. Porque así se llama el aparato hecho de cobre y descrito por María, la trasmisora del Arte. Dice lo que sigue:

Háganse tres tubos de cobre dúctil un poco más gruesos que los de una sartén de cobre de un pastelero; su longitud ha de ser aproximadamente de un codo y medio. Háganse tres tubos así y también un tubo del ancho de una mano y con una abertura proporcionada a la de la cabeza del alambique. Los tres tubos han de tener sus aberturas adaptadas en forma de uña al cuello de un recipiente ligero, para que tengan el tubo pulgar, y los dos tubos deben unidos lateralmente en cada mano. Hacia el fondo de la cabeza del alambique hay tres orificios ajustados a los tubos, y cuando se hayan encajado éstos se sueldan en su lugar, recibiendo el vapor el superior de una manera diferente. Entonces, colocando la cabeza del alambique sobre la olla de barro que contiene el azufre y tapando las juntas con pasta de harina, colóquense frascos de vidrio al final de los tubos, anchos y fuertes para que no se rompan con el calor que viene del agua del medio. He aquí la figura:



<sup>1</sup> También conocido como Zóximo “El alquimista” vivió hace mil 700 años en el sur de Egipto. Se le reconoce como el autor del primer libro de alquimia, al que llamó *Cheirokmeta* que en griego significa “cosas hechas con las manos”.

El historiador de la Química S. Taylor indica que la ilustración fue dibujada 700 años después. En la **Figura 1.3**, se muestran los alambiques que aparecen en el libro *Alchemia* de Libavius donde se puede observar la gran variedad de estos instrumentos y que permitían separar de mejor manera el destilado que los alquimistas llamaban *theion hudor*. No está claro qué se quería decir con estas palabras, salvo que *theion* significa sulfurosa o divina mientras *hudor* es agua... lo que sugiere que se destilaban huevos con la intención de encontrar “el aliento vital” una vez que estos aparentemente tenían una gran potencia generadora de vida. Durante siglos, los alquimistas destilaron todo tipo de productos vegetales y animales.

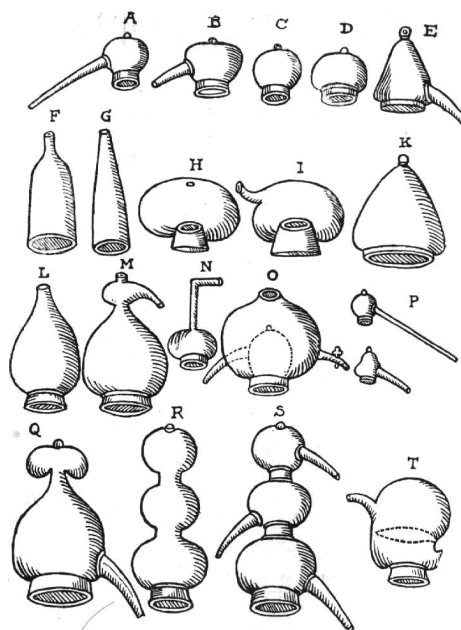


Figura 1.3. Dibujos de alambiques tomados de un libro renacentista: *Alchymia* (1606), de Andreas Livabyus.

María “La Judía”, también conocida como María “La Profeta”, es la primera alquimista de la que se tengan testimonios escritos. Vivió en Alejandría hace 2 mil años. Se le atribuye la invención del alambique, así como del uso del baño que lleva su nombre (baño María) y que permite regular la máxima temperatura que puede alcanzar un recipiente sumergido en el baño. Sobre la misma época, en China, hay también testimonios del trabajo de una mujer alquimista perteneciente a la familia Fang y a la que se le atribuye la conversión del mercurio en plata... seguramente el primer relato de la purificación de la plata.

## 1.3 Textos originales

### *Alegorías y analogías en la literatura alquímica*

(Fragmento)<sup>2</sup>

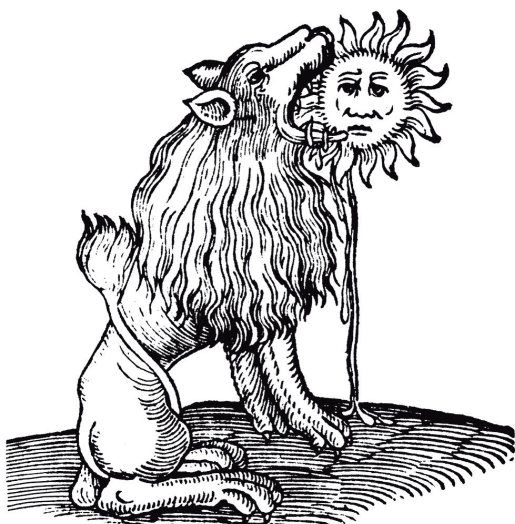


Figura 1.4. Grabado en madera de un león devorando el sol, tomado de un tratado de alquimia del siglo XVI: *Rosarium philosophorum sive pretiosissimum donum Dei* (1550).

Al empezar un estudio de la alquimia, nos enfrentamos con el hecho de que el objetivo último de los alquimistas prácticos, la preparación de la “piedra filosofal”,<sup>3</sup> era inconseguible. Ello no excluye automáticamente, sin embargo, la posibilidad de realizar un estudio serio sobre la alquimia dentro de la historia de la Química. Los diversos procesos empleados (disolución, sublimación, destilación, calcinación, etc.), así como las sustancias utilizadas, eran indudablemente químicos. Si bien no podemos dejar de calificar las metas y creencias últimas de los alquimistas tardíos como fantásticas, debemos admitir que los medios químicos que adoptaron para conseguir sus fines usualmente eran bastante racionales a la luz de la teoría química actual. Los distintos alquimistas vieron su tarea como la imitación de la Naturaleza dentro de las paredes de laboratorio.

Es importante hacer notar que el concepto de perfección no sólo tiene un aspecto químico, sino también uno moral y psicológico. En gran medida, debido a esta razón, el cuerpo de literatura que se llama alquímico tiene una naturaleza dual; sin embargo, sólo un reducido número de obras puede clasificarse claramente como pertenecientes a los respectivos campos de la Química o de la psicología [...] Por lo general, los alquimistas preferían usar un lenguaje basado en la analogía y más apropiado para la poesía o el misticismo que para una ciencia exacta. Debido al amplio uso de la alegoría no era posible, por un lado, reconocer claramente un manuscrito de alquimia que se refiriera a reacciones químicas y era posible, por otro, leer un significado alquímico en obras alegóricas en las que el autor no había tenido la intención de una interpretación tal...

[...] La primera barrera para un estudio de alquimia consistía en apreciar la relación de cualquier texto dado con el tema. La segunda dificultad consistía en interpretar las diversas analogías usadas que se referían a sustancias y procesos químicos. Era más la excepción que la regla en la literatura alquímica el que una sustancia empleada en una reacción química recibiera su nombre común. La práctica habitual era usar el lenguaje común con una significación esotérica; un uso alternativo consistía en la utilización de analogías. Tales analogías podían trabajarse en gran detalle y usarse para describir una serie de reacciones químicas o, de otro modo, la analogía se limitaría a una referencia al color de una sustancia. Entre las más comunes analogías

<sup>2</sup> Crosland, 1988.

<sup>3</sup> En la alquimia temprana, la piedra filosofal era una sustancia capaz de transformar metales básicos en oro. Más tarde, se le atribuyeron propiedades adicionales –tales como la cura de enfermedades y el poder de otorgar la inmortalidad.



Figura 1.5. Ilustración de un monstruo de tres cabezas dentro de un matraz que representa la piedra filosofal alquímica: sal, azufre y mercurio, tomada de la obra de finales del siglo XVI *Splendor solis*.

empleadas estaban la comparación de metales con el nombre y las “imperfecciones” de los metales con los sufrimientos humanos; algunas formas de simbolismo sexual y una comparación del reino mineral con el animal y vegetal eran también bastante comunes [...] Un libro de alquimia dedica una sección a los “pájaros filosóficos” y explica el uso del cuervo, el cisne y el águila para representar la tierra, el agua y el aire, respectivamente. Los pájaros podían emplearse no solamente para sugerir sustancias sino también operaciones. El proceso de destilación se consideraba algunas veces de modo separado como evaporación y condensación y se representaba por un pájaro en vuelo hacia arriba o abajo, respectivamente. El proceso completo de destilación podía, por tanto, mostrarse mediante dos pájaros en sentido contrario. Incluso un químico práctico como Glauber pensó que era adecuado emplear analogías tan extravagantes como la que aparece en la siguiente descripción de salitre:

Cualquiera que sea el espíritu ácido que resulte, o el Águila con sus afiladas garras, su sal fija, o el feroz León, lo lograrán; y lo que resulte imposible para estos dos, el Grífido, que ha surgido del Águila y el León, lo hará artificialmente.

[...] Las referencias a las partes masculinas y femeninas de una mezcla no eran poco usuales. El oro se comparaba a lo masculino y la plata a lo femenino. Mientras los primeros alquimistas creyeron que los metales se producían por la unión de azufre y mercurio, era natural que hablaran, metafóricamente, de estas dos sustancias como “padre y madre” o “masculino” y “femenino”:

*Sulphur enim est quasi pater, argentum vivum quasi mater metallorum.*

El azufre es una especie de padre, como madre de los metales la plata a los vivos.

Esta analogía es bastante común en la alquimia europea tardía, pero algunas veces se afirma que el mercurio es el principio masculino, mientras que el azufre es el femenino. No había, después de todo, ninguna razón poderosa por la que una debía tomarse como masculina y otra femenina; lo que importaba era que la unión de ambas se consideraba necesaria para producir un metal. De igual manera, se atribuían diferentes sexos a los elementos aristotélicos. “Artefius” consideraba el fuego y el aire como masculinos y el agua y la tierra como femeninos, probablemente porque los primeros dos eran más activos y espirituales, mientras que los segundos correspondían a los dominios de la procreación de peces, animales y plantas. La *Turba Philosophorum* asocia lo masculino con el “hierro” (probablemente no se trate del elemento Fe) y lo femenino con el oropimento. Otra asociación relacionaba las partes volátiles de una reacción química (femeninas) con las partes fijas o no volátiles (masculinas). Otra analogía más consistía en llamar masculina a una sustancia que era capaz de coagular a otra, y femenina a una sustancia que era coagulable. Probablemente el vinagre y la leche satisfacerían estas categorías respectivas. Algunos escritores alquimistas que usaban analogías sexuales llegaron al extremo de basar el razonamiento químico en ellas. Así, en una reacción química, se decía que no más de dos sustancias eran necesarias ¡porque el matrimonio es la unión solamente de dos personas!



## *Opera Omnia (Fragmento)*<sup>4</sup>

Entre todas las sustancias del Mundo, existen tres cuyos cuerpos vemos reunidos siempre en el cuerpo de cada uno de los seres. Estas tres sustancias –Azufre, Mercurio y Sal– al reunirse (*componuntur*) componen los cuerpos, a los que nada ya podrá ser añadido, excepto el soplo de la vida y cuanto con él se relacione. Quiere decir que siempre que tomáis en vuestras manos un cuerpo cualquiera, tenéis invisiblemente en ellas las tres sustancias bajo una sola forma o especie. Hablaremos pues de estas tres cosas, ya que en la forma bajo la cual existen, se encuentra toda la salud.

Así, cuando tenéis en la mano un trozo de madera, el testimonio de lo que veis os dirá que se trata de un solo cuerpo. Sin embargo, esto no puede seros de ninguna utilidad ni beneficio, ya que el ultimo aldeano puede ver lo mismo. Vosotros en cambio debéis saber que en vuestras manos están el Azufre, el Mercurio y la Sal, y si realmente llegáis a percibir por separado estas tres cosas, bien sea por su aspecto o por su contacto, os digo que habréis adquirido al fin los ojos y la visión de un verdadero médico, ya que el médico debe percibir estas tres sustancias con la misma precisión con que el aldeano ve la simple madera.

Este ejemplo debe hacernos pensar que las tres sustancias se hallan igualmente en el cuerpo del hombre.

Así, aunque en los huesos humanos están juntos el Azufre, el Mercurio y la Sal, sólo cuando lleguéis a poderlos examinar por separado podréis decir que sabéis lo que es un hueso y que conocéis la razón y el mecanismo de sus enfermedades. Pues por más que la percepción de las apariencias exteriores esté al alcance de todos, corresponde a los médicos esa especial visión interior (*contuitio*) por la cual nos es dado el secreto de las cosas.

Será necesario pues que las hagamos visibles y aunque la Medicina sea relativamente defectuosa para esta manera de mirar, tendremos que ir levantando los velos que las cubren con toda paciencia y acabar mostrando la naturaleza en sus estrictas sustancias.

Si meditáis esto y consideráis hasta qué punto y en cuántas clases llega a reducirse la materia última de las cosas, veréis que en todas ellas están las tres sustancias perfectamente independientes entre sí. Y que con ello el médico logra lo que el impostor o el profano no pueden conseguir.

Es preciso, por lo tanto, conocer primero estas tres sustancias y sus propiedades en el Macrocosmos (*in magno mundo*) para poderlas referir y hallar después fácilmente en el hombre (*Microcosmos*), comprendiendo así lo que él es y lo que en él existe.

Para vuestro mejor entendimiento volveremos al ejemplo de la madera: si quemáis el cuerpo de la madera y observáis lo que ocurre, veréis que hay una cosa que arde –el Azufre–, otra que echa humo –el Mercurio– y otra que queda en cenizas –la Sal–. Este fenómeno de quemar la madera confunde el entendimiento del rústico, pero da al médico en cambio un principio inicial de la mayor importancia, ya que lo prepara a poseer el ojo clínico.

Quedamos pues con que hemos encontrado las tres sustancias separadas unas de otras y con que todas las cosas las contienen igualmente. Y que si dichas sustancias no se perciben siempre a primera vista, pueden revelarse y hacerse visibles bajo la influencia del arte.

Sólo el Azufre arde; y nada puede sublimarse en humo fuera del Mercurio; así como nada puede dejar cenizas que no sea la Sal.

La ceniza es la sustancia, es decir, la parte de que se compone la materia de la madera. Y aunque ella sea la última y no la primera sustancia, sirve para testimoniar (*testatur*) la existencia de la primera materia, al lado de la cual –y también de la segunda– se halla unida en el cuerpo vivo. Pues si bien es cierto que todo lo que aparece en el cuerpo vivo se halla al alcance del vulgo, no es igual cuando se trata de las sustancias para las que, según hemos explicado, es necesario un trabajo previo de separación.

No he de referirme aquí a la primera sustancia porque no os hablo ahora de Filosofía y sí solamente de Medicina.

En cambio os diré que allí donde veáis humo, estará la segunda sustancia, volatilizada y sublimada por el fuego. Pues por más que el Mercurio no sea visible aislado en su primer estado, sí lo es en el momento de su huida, para la cual se transforma en humo, último estado bajo el cual no puede fijarse, permaneciendo así inaprehensible.

---

<sup>4</sup> Paracelso, 1945.

De la misma manera, todo aquello que arde, apareciendo a nuestros ojos en espléndidas brasas, es el Azufre. Pues así como el Mercurio se sublima por virtud de su volatilidad, el Azufre –que es fuego– representa la tercera sustancia de las que entran a formar parte de la constitución del cuerpo.

De todo lo que acabamos de exponer, debemos deducir la teoría que nos permita establecer claramente la naturaleza del Mercurio, del Azufre y de la Sal, que hallamos en la madera y en todas las demás materias, y además el grado y forma en que contribuyen a la composición del Microcosmos (del hombre). Pues ya sabéis que el cuerpo del hombre no es otra cosa que Azufre, Mercurio y Sal, sustancias en las que se aloja la salud y la enfermedad y todo lo que con cualquiera de ambos estados se relaciona.

Os insisto en esto porque es verdaderamente en estas tres sustancias donde asienta la razón de las enfermedades y no en los cuatro elementos o cualidades.

Así por ejemplo, aunque las piedras, los metales y muchas otras sustancias no puedan arder y carezcan de propiedades combustibles, pueden, sin embargo, llegar a hacerse incandescentes (*flagrabilia*), como lo demuestra la ciencia de la Alquimia. Lo mismo puede decirse a propósito de la sublimación de diversas sustancias e incluso de la misma Sal.

El arte así puede poner en evidencia lo que no alcanzan a –ver los ojos– de los profanos, es decir, el proceso de la separación, tras el cual aparecen realmente ante nosotros todas las sustancias.

Si ahora queremos hablar de las propiedades y de la naturaleza de estos tres principios deberemos considerar la cuestión de la siguiente manera: La Naturaleza, tanto si es buena o mala, sana o enferma, se halla (*sita*) en el Mercurio, en el Azufre y en la Sal. Y toda sustancia, es decir, cada una de estas sustancias, posee su naturaleza característica.

Si ahora, estos tres principios se mezclan en el mismo cuerpo, sus tres naturalezas se manifestaran bajo una sola forma; que expresará no obstante la predominancia de cada naturaleza individual y no la de la sustancia común resultante.

[...] Quiero pues que todas las cosas que puedan ser demostradas de diversas maneras, se presenten de acuerdo a sus principios, de los que han de provenir sus enfermedades.

Así repetimos: Todo cuerpo que conserva unidas sus tres sustancias, se mantiene en buena salud. En cambio, cuando esas sustancias se disuelven o disgregan, ocurrirá que una se corromperá, otra se inflamará, otra se disipará de uno u otro modo... etc., y estaremos en presencia de verdaderas enfermedades. Tanto tiempo como el cuerpo se mantenga unido, así se conservará exento de enfermedad; por el contrario, tan pronto se disuelva (*dissipetur*), manifestará todo cuanto precisamente le interesa saber al médico.

Os daré otro ejemplo: Cuando habéis conocido veinte hombres distintos, unidos por un pacto o una creencia, y que al cabo de un tiempo los encontráis de nuevo pero separados, podéis reconocerlos perfectamente uno a uno, e incluso saber, a poco que los observéis, por qué o cómo decidieron separarse.

Así, en la separación, es como debéis conocer todas las cosas, pues sólo de ese modo podréis saber lo que se ha separado, remediando justamente el principio que en cada caso corresponda.

Si no obráis de esta manera sólo os quedará el principio de la muerte, es decir, la destrucción de toda soberanía.

Resumiendo: el Azufre, el Mercurio y la Sal son las tres primeras sustancias que durante la vida permanecen ocultas y que con la separación de la vida se revelan y manifiestan.



Figura 1.6. Retrato de Paracelso, sosteniendo una espada. De J.J. Boissard, *Icones et effigies Virorum Doctorum*, 1645.

# 1.4 Experimentos

## Obtención de cobre a partir de uno de sus minerales

Son pocos los metales que no forman parte de un compuesto y se les encuentra en forma de “pepitas” como el oro y la plata. Se cree que el oro empezó a trabajarse hace 7 mil años. Fue y es altamente estimado a causa de su belleza y rareza. Constituye la recompensa universal en todos los países, culturas y épocas. Amarillo, brillante, maleable, inalterable, ha sido para muchos el símbolo de la perfección. Los egipcios decían que el oro poseía los extremos poderes del Sol encerrados en su cuerpo. Así los metales libres son muy raros; baste decir que la palabra *metal* proviene de un vocablo griego que significa buscar, procurar.

Los utensilios más antiguos de cobre nativo encontrados en lo que hoy conocemos como Medio Oriente cuentan con más de 7 mil años de edad. Estos primeros artículos de cobre, no tenían todavía utilidad práctica como metales en sí y se empleaban al igual que las piedras. La metalurgia del cobre surgió cuando empezó a obtenerse éste de sus minerales, usando el fuego para fundirlo y carbón vegetal para reducirlo. El primer mineral utilizado para este fin pudo haber sido la malaquita.

La malaquita es un mineral ya conocido por aquellos tiempos, de color verde vistoso, razón por la cual era empleado en la joyería o para fabricar algún tipo de maquillaje. Uno puede imaginar que la obtención del cobre ocurrió accidentalmente, cuando algunos pobladores arrojaron las hermosas piedras verdes de malaquita al fuego producido por el carbón vegetal y al extinguirse el fuego, hallaron un reluciente metal.

Otros metales fueron aislados posteriormente en el “Viejo Mundo” (oro, plata, cobre, estaño, mercurio, plomo y hierro) y con los utensilios que se fabricaron con ellos se transformó el mundo. En Mesoamérica también se conocieron estos metales. Se ha insistido que los americanos sólo trabajaban los metales nativos, o sea que nunca alcanzaron la edad de hierro, ya que este metal lo encontraron únicamente en meteoritos. Sin embargo, un hacha hallada en Monte Albán, con 18% de hierro, prueba lo contrario.

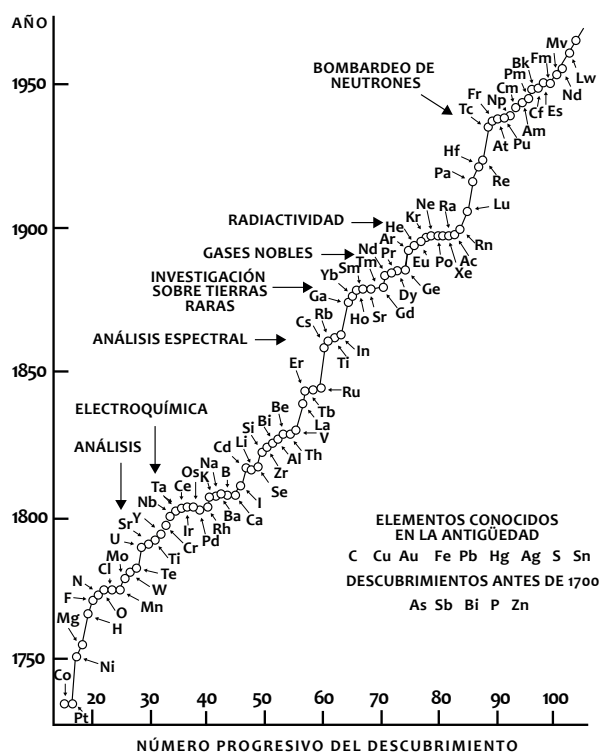


Figura 1.7. Cronología del descubrimiento de los elementos químicos y las técnicas que llevaron a sus respectivos hallazgos. Fuente: Cruz, Chamizo y Garritz, 1986.

## Materiales y sustancias sugeridos

- Mechero Bunsen
- Soporte Universal
- Anillo para soporte
- Tela de asbesto
- Crisol de porcelana
- Una pieza de malaquita
- Carbón vegetal

## Un procedimiento posible

1. Colocar la pieza de malaquita en el crisol de porcelana. Calentar la misma durante 15 minutos o hasta que cambie totalmente a color negro. Esperar a que se enfríe un poco.
2. Llenar hasta la tercera parte del crisol con carbón vegetal bien pulverizado, tener la precaución de que quede totalmente cubierta la pieza de color negra obtenida en el paso anterior.
3. Tapar el crisol perfectamente para evitar la entrada de aire. Calentar por aproximadamente 90 minutos. Dejar enfriar bien y separar la pieza del carbón.

## El vidrio

La fabricación del vidrio es quizá una de las tecnologías más antiguas. Se inventó en Egipto hace aproximadamente 5 mil años al calentar una mezcla de arena, cenizas vegetales y piedra caliza. En 1674, G. Ravenscroft sustituyó la piedra caliza por óxido de plomo y obtuvo un vidrio más pesado y también más blando que podía pulirse. Esto marcó el inicio de la fabricación de los lentes (que en forma rudimentaria habían empezado los árabes 500 años antes) y, con ello, de los telescopios y microscopios. Fue hasta el siglo XIX cuando se conoció la composición química de este material: dióxido de silicio; carbonato de sodio y carbonato de calcio. El color se lo da la presencia de óxidos metálicos en pequeñas cantidades; por ejemplo, de hierro para el color café, de cobalto para el azul, de oro para el rojo.

El vidrio tiene diversas propiedades, algunas de las más importantes son:

- Su transparencia, lo que permite ver lo que hay dentro de los objetos hechos con este material.
- Su insolubilidad en agua y en disoluciones ácidas y alcalinas. Es un material prácticamente inerte y con él se construyeron muchas de las vasijas y recipientes usados en los laboratorios.
- Su fragilidad: el vidrio se rompe. Sin embargo, los químicos modernos han fabricado vidrio prácticamente irrompible, esto es, que resiste el impacto de una bala, o aquel que puede ser enrollado, el que se usa en las fibras ópticas, que no son más que delgados hilos de vidrio.
- Su diversidad. Hay vidrios naturales, como la obsidiana que los artesanos del México prehispánico convirtieron en puntas de flechas o en máscaras. La obsidiana es un vidrio volcánico. Fue granito que se fundió durante la actividad volcánica y que no cristalizó cuando se enfrió. Los cristales son sólidos ordenados, el vidrio no está ordenado, por eso no es un sólido cristalino. Hay también miles de vidrios artificiales algunos de los cuales se pueden comer como sucede cuando ingerimos caramelos.



**Figura 1.8.** Jarra de vidrio egipcia del siglo V de n.e. Pieza del Museo del Louvre en París, Francia.



### Materiales y sustancias sugeridos

- Balanza
- Vidrios de reloj
- Espátula
- Mortero
- Crisoles
- Mufla
- $\text{Na}_2\text{CO}_3$
- $\text{H}_3\text{BO}_3$
- $\text{MnO}_2$
- $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
- Pinzas para mufla
- Guantes y lentes de protección

### Un procedimiento posible

1. Pesarse las cantidades señaladas en la **Tabla 1.1** (en gramos) para cada tipo de vidrio, moler y mezclar en un mortero.

**MEDIDAS DE SEGURIDAD:** para efectuar el procedimiento en la mufla se deberá contar con la protección de guantes y lentes adecuados, cubriéndose con la bata de algodón y abrochada en todo momento. Previo a calentar en la mufla se deberá colocar, cerca de ella, un piso de ladrillo refractario y encima de éste una placa de metal.

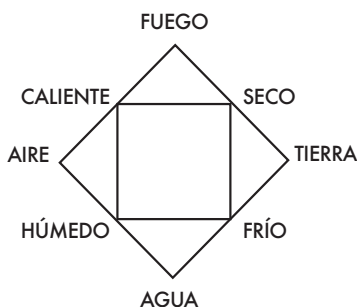
2. Colocar la mezcla en un crisol. Llevar el crisol a la mufla a  $650^\circ\text{C}$  una hora.
3. Posteriormente, elevar la temperatura a  $900^\circ\text{C}$ . Cuando la mezcla esté perfectamente fluida sacar el crisol de la mufla y vaciar el líquido viscoso sobre una placa de metal.

**Tabla 1.1** Cantidades y componentes para hacer vidrio.

Vidrio	Componentes (gramos)				
	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{H}_3\text{BO}_3$	$\text{MnO}_2$	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
A	0.5	4.67	0.07	----	----
B	1.0	4.67	0.07	----	----
C	1.67	4.67	0.07	----	----
D	1.0	4.67	----	----	0.03
E	1.0	----	----	5.33	0.03

## 1.5 La reacción química. Ácidos y bases

Hace más de dos milenios, en el espacio geográfico que hoy ocupa Grecia, uno de sus ciudadanos más prominentes, Aristóteles, usó la palabra griega *ousia*, que en latín significa sustancia en un sentido particular. Brevemente, la sustancia es lo real, un “individual concreto” Aceptaba la existencia de cuatro elementos o sustancias en las que coincidían otras tantas cualidades (húmedo, seco, frío y caliente) además de una sustancia fundamental carente de atributos llamada *hyle*, éter, materia prima o quintaesencia que era la base de todas ellas.



Así, el agua era resultado de mezclar lo húmedo y lo frío; el aire, lo húmedo y lo caliente; el fuego, lo seco y lo caliente, mientras que la tierra, lo seco y lo frío. Los elementos, que aquí podemos llamar filosóficos, nunca se encuentran totalmente puros o aislados, sino combinados entre sí con diferentes intensidades: conservando sus propiedades individuales (lo que hoy llamamos *mezcla*) o perdiéndolas (es decir, adquiriendo una nueva identidad en lo que hoy denominamos *compuesto químico*). El modelo aristotélico explicaba, por ejemplo, la diferencia de los minerales que los mineros encontraban en el seno de la tierra para convertirlos luego en metales. Cada uno de estos minerales recibía diferentes cualidades en la materia prima original en un proceso que puede compararse con la gestación de un feto en la matriz de la mujer.

El pluralismo griego, es decir, la posibilidad intelectual y material de interpretar el mundo de diversas maneras, gestó otra explicación de las sustancias prácticamente contemporánea a la ya descrita: la atomista. Sus principales cultivadores y defensores fueron, en Grecia, Demócrito y Epicuro; años después, en Roma, lo fue Lucrecio. Hoy tenemos importantes evidencias de que también en la India en tiempos semejantes e influenciado por las diferentes religiones que allí se practicaban, se desarrolló un modelo atomista de interpretación de la diversidad del mundo. Para los ateos atomistas griegos, la sustancia más elemental e indestructible es el átomo (palabra que significa indivisible), el ingrediente de todas las cosas. Los átomos son muy pequeños, duros y redondos. Además de poder tener tamaños diferentes, su otra propiedad distintiva es el movimiento, lo que les permite agregarse o separarse. En el mundo únicamente hay átomos y vacío. Como lo dijo Lucrecio:

Pero observa: siempre que los rayos recorren su camino y derraman la luz del sol por las umbrías habitaciones de la casa, verás muchos cuerpos diminutos confundiendo de muchos modos en esos rayos de luz por todo el espacio vacío, y como si estuvieran en perpetuo conflicto, en oleadas de guerra, combatiendo y conteniendo guerrero con guerrero sin pausa, en permanente movimiento, en continuos encuentros y separaciones; así, esto puede ayudarte a imaginar lo que significa que las partículas primordiales de las cosas están en perpetuo movimiento por el magno vacío.

Así, mientras que para Aristóteles (y todos los otros pensadores que asumían la existencia de diferentes sustancias) un objeto era desigual de otro porque estaba en realidad constituido en distintas proporciones de sustancias varias, para los atomistas las diferencias eran aparentes y lo que realmente distinguía a los objetos era el tamaño y el movimiento de los átomos que los conformaban.

Seguramente fue en Alejandría, ciudad fundada por Alejandro Magno hace poco más de 2 mil años en su largo camino de conquista, donde la especulación filosófica griega al entrar en contacto con otras culturas de tradición más artesanal y con aprecio por el trabajo manual, en particular la egipcia (hay que recordar, por ejemplo, su extraordinaria experiencia en la momificación), se concretó en una actividad práctica que desde entonces conocemos como *alquimia*. Hay que tener presente que tanto

en el Imperio romano como en las ciudades griegas que le antecedieron, los esclavos eran quienes realizaban el trabajo y la palabra latina *laborare* nos remite al trabajo manual, el cual era realizado por ellos. En ambos lugares, desde luego origen de las ideas democráticas, del derecho y de la filosofía, ni las mujeres ni los esclavos importaban mucho. Entonces, como ahora, había clases sociales.

Alquimistas fueron los primeros laboratorios y en ellos se llevaron a cabo los primeros experimentos sistemáticos para poner a prueba el modelo que explicaba la diversidad del mundo a partir de las cuatro sustancias elementales. En las proporciones adecuadas, todo podía hacerse, incluido el valioso oro. Así empezó un largo, oscuro y “hermético” trayecto, en un vasto territorio que ocupó parcialmente África, Asia y Europa, donde la extracción de minerales y metales se acompañó de la preparación o mejora de las técnicas para hacer medicamentos, jabones, pigmentos, vidrio o materiales cerámicos y donde fueron las actividades prácticas, alejadas de la reflexión filosófica y realizadas alrededor de mercados y en lugares públicos la que nos dotó de importantísimas técnicas experimentales, especialmente la destilación, y de “nuevas” sustancias, que no se encontraban en el mundo como hasta entonces era conocido, es decir, sustancias “artificiales” como algunos ácidos (la palabra ácido proviene del latín *acidus* que significa amargo y se usaba para el vinagre natural y años después para el artificial ácido sulfúrico) o el alcohol. La cerveza, el vino o los perfumes fueron productos de uso relativamente común. Desde esa época ya se identificaba la característica más importante de un laboratorio: su aislamiento de la vida cotidiana. Esto se logró con los primeros laboratorios de alquimia-química que antecedieron a los de física por casi dos siglos.

Hacia el siglo X de nuestra época, en Bagdad, Mohamed-Abu-Bek-Ibn-Zacarias-al-Razi cuyo nombre latinizado es Rhazes, uno de los más importantes alquimistas, médicos islámicos y ejemplo de la pragmática tradición alquimista, estableció, por primera vez, la separación de las sustancias entonces conocidas de acuerdo con su origen (minerales, vegetales, animales y artificiales). Además identificó al menos 53 de ellas como hoy las conocemos y dejó instrucciones de cómo obtenerlas en su famoso *Libro de los secretos*, dividido en tres partes (aparatos y utensilios, recetas y sustancias) y que puede entenderse hoy como antecedentes de los manuales de Química. Clasificó las técnicas de laboratorio conocidas en la época en cuatro grupos: procedimientos de purificación; de separación; de mezcla y, finalmente, de eliminación de agua o solidificación. Algunas de las sustancias minerales identificadas por él se muestran a continuación con su correspondiente y actualizada fórmula mínima.

Sustancias minerales					
Espíritus (destilables)	Sólidos (metales)	Piedras (minerales)	Vitriolos (sulfatos)	Boratos (rocas)	Sales
Mercurio	Oro	Pirita	Verde (Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		Marina (NaCl)
Azufre	Plata	(FeS <sub>2</sub> )	Azul	Borax	Cal
Sal amoniacal (NH <sub>4</sub> Cl)	Cobre	Hematita (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(CuSO <sub>4</sub> )	(Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )	[CaO/Ca(OH) <sub>2</sub> ]
Rejalgar	Hierro	Malaquita	Blanco	Natron	Potasa
(As <sub>4</sub> S <sub>4</sub> )	Plomo	[Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> ]	(ZnSO <sub>4</sub> )	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	(K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
	Estaño	Vidrio	Alumbre [K <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> ]		Cenizas

Es importante hacer notar que entre las sustancias artificiales enunciadas por Rhazes se encontraban, además de diversos óxidos, el “espíritu de la sal” (HCl) y el aceite de vitriolo (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). La reacción de este último con la sal marina daba lugar al primero, es decir, en nomenclatura actual:



Los alquimistas islámicos nos heredaron múltiples palabras: álcali (que significa ceniza calcinada de ciertas plantas), alcohol, alambique, elixir, azúcar, nafta, pero lo más importante fue pasar de los filosóficos cuatro elementos a listas de sustancias, con sus propiedades y las maneras de obtenerlas.

## Industria y medio ambiente

# Licores alcohólicos

Aunque la destilación es muy antigua, las referencias a la destilación del vino provienen de lo que hoy es el mundo islámico hace poco más de mil 200 años. La bebida obtenida contiene una proporción mayor de alcohol<sup>5</sup> y recibe nombres diferentes según el lugar de origen. Repetidas destilaciones aumentaban la concentración de alcohol en un proceso llamado *rectificación* o *destilación fraccionada*, así que nuevos disolventes fueron fabricados. En el Islam se prohíbe el consumo de licores, por lo que se usaron allí en la fabricación de perfumes y como en el resto del entonces mundo occidental con fines medicinales.

De entre todos los licores destaca, por su importancia histórica, el ron. Hacia el siglo XV, se introdujo en las islas caribeñas el cultivo del azúcar. Su producción requiere, además de cantidades importantes de agua, mucha mano de obra. Así en los años siguientes quedó integrada una cadena de producción que cambió el planeta. Los colonizadores europeos pagaban a los traficantes de esclavos, todos ellos africanos, con ron. De la costa occidental de África (hoy Costa de Oro, Senegal, Nigeria, etc.) los llevaban en condiciones deplorables a las colonias americanas.<sup>6</sup> Allí trabajaban en las plantaciones de azúcar, tabaco o en las minas, cuyos valiosos productos se llevaban a Europa, entre ellas el ron. Los esclavos recibían a cambio de su trabajo, entre otras cosas, ron. El ron se volvió la primera bebida global donde convergían materiales, tecnología y personas de tres continentes.



**Figura 1.9.** Venta de barriles de ron en el mercado de esclavos de Wall Street, Nueva York. Imagen tomada del sitio web de Lapidus Center for the Historical Analysis of Transatlantic Slavery (<https://www.lapiduscenter.org/new-york-citys-slave-market/>).

<sup>5</sup> La graduación de la cantidad de alcohol en una bebida alcohólica se mide actualmente en grados GL (después de Gay-Lussacs). La cerveza tiene de 3 a 5, el vino difícilmente más de 12 y las bebidas destiladas sobre 40.

<sup>6</sup> Poco más de once millones de esclavos africanos fueron trasladados a tierras americanas durante cuatro siglos.

## 1.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron sobre la alquimia construyan una pregunta abierta y contéstena, empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

- Reconoce el contexto político-cultural del desarrollo de la alquimia identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la alquimia al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica las obras, los movimientos o las corrientes artísticas y filosóficas a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.

### 2. Instrumentos

(A).\* ¿Por qué si el agua y el alcohol etílico son sustancias con temperaturas de ebullición diferentes no se pueden separar completamente por destilación?

(A). ¿Cuál es la diferencia entre la destilación simple y la destilación fraccionada? Indica ejemplos del uso de cada una de ellas.

(A). ¿Cuál es la explicación actual del funcionamiento del baño María?

---

\* La letra indica el tiempo desde el que se da la respuesta (A) anacrónico y la (D) diacrónico.

### 3. Textos originales

- El siguiente fragmento del texto de Paracelso ejemplifica el pensamiento alquímico ¿por qué?  
[...] es preciso por lo tanto conocer primero estas tres sustancias y sus propiedades en el Macrocosmos (*in magno mundo*) para poderlas referir y hallar después fácilmente en el hombre (*Microcosmos*), comprendiendo así lo que él es y lo que en él existe.
- El fragmento del texto de Paracelso termina afirmando: “el Azufre, el Mercurio y la Sal son las tres primeras sustancias que durante la vida permanecen ocultas y que con la separación de la vida se revelan y manifiestan”. Indica, desde su momento histórico como podría ser refutado.
- Ejemplifica con al menos cinco sustancias e información actual la premisa de Paracelso: “todas las sustancias son venenosas. La dosis correcta diferencia el remedio del veneno”.

### 4. Experimentos

- ¿Cómo se puede saber que el producto de la reacción es cobre?
- ¿Es posible obtener otros metales con el mismo procedimiento? Explicar la respuesta.
- En qué se diferencian entre sí los vidrios obtenidos.
- ¿Por qué se dice que el vidrio no es un sólido?
- ¿De qué manera se obtiene el vidrio plano que usamos en las ventanas?
- ¿Cuál es la composición del vidrio Pyrex y qué propiedades se derivan de la misma?

### 5. Reacción química. Ácidos y bases

- ¿Qué se entiende por pluralismo?
- Imagina que te transportas varios milenios atrás a Siracusa, donde un rey te pide que determines si su corona (recién fabricada) está hecha de oro puro. La razón por la que el rey te lo pide, es que teme que el orfebre le haya engañado y su corona esté hecha de oro y plata. Propón un método experimental mediante el cual se pueda asegurar que la corona está o no hecha totalmente de oro.
- La forma de conocer de *historia natural* apela a la clasificación. A lo largo de la historia de la alquimia se dieron diferentes clasificaciones de las sustancias. Escribe un argumento defendiendo cuál, en tu opinión, es la más acertada.



# 2 Protoquímica



Grabado que muestra el experimento que, en 1656, O. von Guericke llevó a cabo en Madenburgo, su lugar de origen, para demostrar la existencia del vacío.

↪	⊖	⊙	⊕	▽	⊖	⊕	SM	△	♀	♂	♀	☾	♂	♂	▽
⊖	♂	♂	♂	⊕	⊕	⊕	⊕	⊖	♂	☾	♀	♂	♂	♂	▽
♂	♂	♀	⊖	⊙	⊙	⊙	⊕	♂	☾	♀	PC	♀	♂	♂	⊖
▽	♀	♂	♂	⊕	⊕	⊕	⊕	♀	♂						
SM	☾	♀	▽		♂	♂	♂	♂	♀						
	♀	☾	♂	△				☾	♂						
		♀						♂	♂						
		☾						♀							
	⊙							⊙							

↪ Esprits acides.      ▽ Terre absorbante.      ♂ Cuivre.      △ Soufre mineral. [Principe.  
 ⊖ Acide du sel marin.      SM Substances metalliques.      ♀ Fer.      ♂ Principe huileux ou Soufre  
 ⊕ Acide nitreux.      ♀ Mercure.      ♂ Plomb.      ♀ Esprit de vinaigre.  
 ⊕ Acide vitriolique.      ♂ Regule d'Antimoine.      ♂ Etain.      ♀ Eau.  
 ⊖ Sel alcali fixe.      ♂ Or.      ♂ Zinc.      ♀ Sel. [dents  
 ⊙ Sel alcali volatil.      ☾ Argent.      ♂ Pierre Calaminaire.      ♀ Esprit de vin et Esprits ar-

Tabla de afinidades de Geoffrey. Las sustancias que se encuentran más arriba en cada columna, desplazan a las que se encuentran debajo de ellas.

## 2.1 Acontecimientos

**E**n los laboratorios, como espacios dedicados al trabajo práctico, en lugar de la investigación teórica, las actividades allí realizadas, desde hace miles de años han sido consideradas de menor nivel intelectual. La palabra latina *laborare* nos remite al trabajo manual, el cual era realizado, tanto en el imperio romano como en las ciudades griegas que le antecedieron, por los esclavos. El filósofo inglés del siglo XVII T. Hobbes indicaba la inferioridad social de aquellos que se dedicaban al trabajo práctico: drogueros, jardineros, herreros o mecánicos. Aquellos que suponían que con dinero (con el cual comprar mejores materiales y/o equipamiento) podían obtener conocimiento, estaban equivocados. Para él, como para otros muchos académicos de su tiempo y aún hoy en día, una biblioteca era mucho mejor que un laboratorio. Estas ideas calaron fuertemente en la mentalidad y en las universidades hispanas y posteriormente latinoamericanas, particularmente en lo referente a la investigación y enseñanza de la Química, en la que se privilegió el hablar al hacer.

Desde la más remota antigüedad, en particular a partir de la Edad Media, la preparación de medicamentos, la fabricación de jabones, pigmentos, vidrio, materiales cerámicos y explosivos, y la extracción de metales fueron actividades prácticas, alejadas de la reflexión filosófica y realizadas alrededor de mercados y en lugares públicos. Sin embargo, desde esa época ya se identificaba la característica más importante de un laboratorio: su aislamiento de la vida cotidiana. Esto se logró con los primeros laboratorios de Química que antecedieron a los de Física por casi dos siglos. Así, desde el siglo XVII, el acceso a una fuente de calor permanente y agua corriente fueron configurando el espacio de lo que hoy reconocemos en cualquier lugar del mundo como un laboratorio. Los aparatos y los reactivos allí utilizados eran productos artesanales, contruidos y preparados localmente.

En 1661, el irlandés R. Boyle publicó *The sceptical chemist*, obra en la que además de continuar exaltando el valor de los experimentos como principal vehículo de conocimiento (tres años antes había construido con su ayudante R. Hooke su propia máquina *pneumática*, logrando que sus resultados experimentales con la bomba del vacío fueran aceptados en reuniones públicas, como antes lo fueron las de van Guericke, contra las ideas del anteriormente mencionado e influyente Hobbes) amplía la idea de que la materia está compuesta de pequeñas partículas que se comportan mecánicamente. Boyle marca el inicio de la transición entre la alquimia (él aceptaba la transmutación de la materia) y la Química, mientras que, por otro lado, se identifica el nacimiento de la Termodinámica a sus experimentos, junto con los de van Guericke. Sin embargo, sus explicaciones mecánicas de las reacciones químicas, (originalmente provenientes de otro alquimista convencido I. Newton) fallaron una y otra vez.

En una dirección semejante, el francés E. Geoffroy presentó años después la primera tabla de afinidades, con la que se puede “predecir” cuándo una sustancia se unía a otra, interpretando lo que sucedía en términos de atracciones de corto alcance. Bajo una fuerte influencia animista, por afinidad se entendía simpatía o apetito. No obstante, los intentos por matematizar las afinidades fracasaron. La tradición pragmática de los químicos de su tiempo prevaleció y el bávaro G. Stahl propuso el modelo del flogisto para explicar exitosamente la combustión y la calcinación. Cuando surgió, sus defensores lo consideraban sólo un principio; conforme pasó el tiempo, los protoquímicos lo empezaron a tomar como una sustancia material (se daba un paralelismo entre éste y otros fluidos incorpóreos tales como la electricidad, el magnetismo y el calor). El periodo protoquímico concluyó en 1732, cuando el médico holandés H. Boerhaave publicó *Elementa Chemiae*, con lo que transformó una práctica artesanal en una disciplina de carácter científico que se puede enseñar en las universidades. Boerhaave fue el primer médico que empezó a medir la temperatura del cuerpo empleando el termómetro de mercurio inventado años atrás por su compatriota D.G. Fahrenheit. En ese texto incorpora, de una u otra manera, las ideas de Boyle, Stahl y Geoffroy.





# En 1700, la población mundial alcanzó los 650 millones de personas.

AÑO

HECHOS TECNOQUÍMICOS

HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES

1661 El irlandés R. Boyle publica *The sceptical chemist* en la que además de continuar exaltando el valor de los experimentos como principal vehículo de conocimiento (tres años antes había construido con su ayudante R. Hooke su propia máquina neumática) amplía la idea de que la materia está compuesta de pequeñas partículas que se comportan mecánicamente.

1669 El alquimista H. Brand aísla químicamente en Hamburgo el fósforo, a partir de la orina. Este elemento se suma así al Cu, Pb, Au, Ag, Fe, C, Sn, S, Hg, Zn y As descubiertos en ese orden con anterioridad.

1675 El francés N. Lemery publica *Cours de Chymie* donde indica: "En química, la palabra principio no debe entenderse de manera demasiado precisa, pues las sustancias así denominadas son principios con respecto a nosotros y mientras no podamos avanzar más en la división de los cuerpos". Divide las sustancias en minerales, vegetales y animales.

1679 Muere J. Mayow, médico inglés que demostró que los metales se podían quemar.

1714 El holandés D.G. Fahrenheit construyó el primer y preciso termómetro de mercurio.

1718 • El bávaro G. Stahl propone el modelo del flogisto para explicar la combustión y la calcinación.

• E. Geoffrey presenta en Francia la primera tabla de afinidades.

1732 El médico holandés H. Boerhaave publica *Elementa Chemiae* con lo que transforma una práctica artesanal en una disciplina científica que se puede enseñar en las universidades.

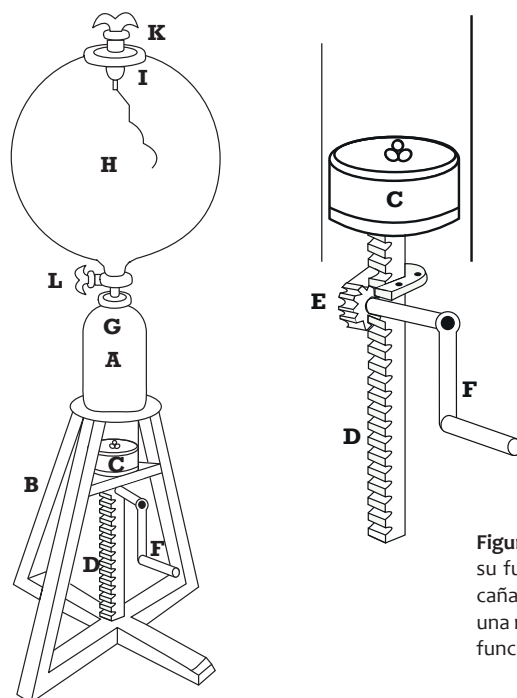
1736 El curandero inglés J. Ward produce en grandes cantidades ácido sulfúrico a través de un procedimiento utilizado años atrás en Francia y Holanda.

- En Europa se establecen las bases del capitalismo.
- Aparecen las primeras sociedades científicas: la Royal Society en Londres (1662) y la Académie des sciences en París (1666).
- Newton explica las leyes de la mecánica.
- Van Leeuwenhoek observa bacterias, con el microscopio que él mismo construyó.
- Los turcos sitian Viena, (1683).
- Linneo clasifica a la naturaleza en tres reinos.
- El viaje, en carroza, entre Manchester y Londres tarda cuatro días.
- En música, J.S. Bach; en Literatura, Molière; en Arquitectura, G.L. Bernini, y en Filosofía, G.W. Leibniz marcan el Barroco tardío.

## 2.2 Instrumentos: Bomba de vacío

En 1654, teniendo como testigos a los más altos dignatarios de la Iglesia católica, Otto von Guericke demostró la fabricación de vacío. El instrumento para fabricar el vacío fue denominado “bomba de vacío” y uno de los sorprendidos asistentes a la demostración (el arzobispo von Schornborn) lo compró y envió a un colegio jesuita para su estudio. El posterior intercambio de correspondencia entre von Guericke y los jesuitas propició que el primero escribiera el libro *Mechanica Hydraulico-pneumatica* en 1657, en donde describió su invento. Ese mismo año, en su ciudad natal, von Guericke llevó a cabo su famoso experimento (conocido desde entonces como *las esferas de Madenburgo*), en el que demostró que dos cuadrillas de ocho caballos cada una tirando en dirección opuesta no podían separar las esferas cuando se había fabricado un vacío en el interior de las mismas. Así, von Guericke refutó la idea, prevaleciente desde tiempos de Aristóteles y sostenida por los filósofos y científicos que le sucedieron, que indicaba que la naturaleza aborrece el vacío. El vacío existía y se podía fabricar con un instrumento. Su fabricación artificial no cuestionaba su existencia. El texto de von Guericke fue estudiado por R. Boyle, quien se embarcó en sus propios experimentos con una versión modificada de la bomba de vacío, publicando sus resultados en 1660, en el libro *New Experiments Physico-Mechanical touching the Spring of Air and its Effects*, el cual fue traducido al latín (la lengua de las ciencias en aquella época) al siguiente año.

Sobre la bomba de vacío se generó una importantísima disputa entre dos grandes pensadores del periodo protoquímico. Por un lado, el mismo R. Boyle y, por el otro, el influyente pensador político T. Hobbes, crítico de la experimentación sistemática. Lo que se discutía era el valor del conocimiento que se podía obtener de un experimento. Boyle sostenía que los hechos podían ser fabricados por instrumentos como la bomba de vacío, de manera que diversas autoridades reconocidas (arzobispos católicos, en el caso de von Guericke o caballeros en Inglaterra) pudieran ser testigos de los experimentos y coincidiendo en sus conclusiones alcanzar un nuevo conocimiento. En oposición a lo anterior, Hobbes buscaba en las leyes naturales las explicaciones adecuadas, lo que colocaba a los experimentos como productos artificiales y poco confiables de un gremio exclusivo, el de los científicos. Poco a poco, Boyle, con la ayuda de R. Hooke, perfeccionó el instrumento, enfrentando así muchas de las objeciones experimentales que Hoobes había manifestado (resultado de errores en el diseño, la construcción o la operación de la bomba de vacío) y con el apoyo de la recién establecida Royal Society estableció la primacía del experimento (mejor dicho, de las regularidades experimentales) y de los hechos empíricos sobre las certezas deductivas de la filosofía natural. Se podían fabricar hechos experimentales que un instrumento adecuadamente calibrado corroboraba.



**Figura 2.1.** Bomba de vacío de R. Boyle (1660) y explicación de su funcionamiento. El pistón de la ventosa (C) era sólido. La caña o la varilla del pistón tenía dientes cortados, para formar una rejilla; el pistón era movido por una rueda dentada (E) que funcionaba en la cremallera, girada por un mango (F).

## 2.3 Textos originales

### *El químico escéptico*

(Fragmento)<sup>1</sup>



Figura 2.2. Robert Boyle (1627-1691).

Dado que una gran parte de esas personas doctas, especialmente médicos, que han visto los defectos de la Filosofía vulgar sin alcanzar aún a comprender y apreciar la corpuscular se han inclinado hacia la doctrina de los químicos,<sup>2</sup> y dado que los espargíricos acostumbran a construir todas las cualidades de los cuerpos a partir del predominio de alguno de sus tres principios hipostáticos, supongo que podré no sólo conseguir que mi opinión no parezca demasiado pretenciosa, sino también (lo que es mucho más importante) promover la más feliz recepción de la hipótesis mecánica sobre las cualidades, exponiendo aquí (si bien de manera breve y general) algunos de aquellos defectos que he observado en la explicación química de las propiedades.

[...] He aquí la primera consideración en la que observo que la teoría química no llega lo bastante lejos. Mas hay otras ramas de su deficiencia, pues incluso cuando las explicaciones parecen alcanzar los fenómenos, no son primarias y por así decir lo suficientemente fontales. Para explicarlo no recurriré en este momento más que a estas dos consideraciones. La primera de ellas es que esas mismas sustancias que los químicos consideran sus principios están todas ellas dotadas de diversas cualidades.<sup>3</sup> Así la sal no es un cuerpo fluido, sino consistente, posee su peso y es soluble en agua, es diáfana u opaca, fija o volátil, con sabor o insípida (me expreso así, mediante disyunciones porque no todos los químicos concuerdan en estas cosas y no afecta a mi argumentación que se decida acerca de una u otra de estas cualidades en discusión). Además, según ellos, el azufre es un cuerpo fusible, inflamable, etc. y, según la experiencia, es consistente, pesado, etc. Por tanto, hemos de recurrir a principios más primarios y generales, para explicar algunas de esas cualidades, puesto que dándose en los cuerpos que se suponen perfectamente similares u homogéneos, no se puede pretender que las que se hallan en uno de ellos se deriven de otro. Y aunque podría responder muchas cosas a la afirmación de que pertenece a la naturaleza de un principio poseer esta o aquella cualidad, como por ejemplo a la del azufre ser fusible, por lo que no hemos de pedir cuentas de por qué sea así, me limitaré ahora a señalar que este argumento sólo se basa en una

<sup>1</sup> Boyle, 2012.

<sup>2</sup> Se trata de los paracelsianos, designados también con el nombre de *espargíricos* por su dedicación al arte espargírica de extracción de los metales.

<sup>3</sup> No pudiendo ser, por tanto, la explicación última de las cualidades, ya que las suyas, precisando a su vez explicación, conducen a un regreso infinito, sólo evitable alcanzando una explicación en términos de algo que no posea esas cualidades. Como se verá, el mecanicismo corpuscular satisface este requisito metodológico, pues los átomos sólo pueden presentar propiedades espaciales y no afecciones cualitativas.

suposición y no tendrá ninguna fuerza si de las afecciones primarias<sup>4</sup> de los cuerpos se puede deducir una buena explicación mecánica de la fusibilidad en general, sin necesidad de suponer un azufre primigenio como el que imaginan los químicos, o sin derivarlo de él en otros cuerpos. Ciertamente, dado que no solo el salitre, la sal marina, el vitriolo y el alumbre, sino también la sal de tártaro y la sal volátil de orina son todas ellas fusibles, no veo bien cómo pueden los químicos derivar la fusibilidad ni siquiera de las sales obtenidas de su propio análisis, como la sal de tártaro y la de orina, de la participación en el ingrediente sulfúreo; especialmente dado que, si se intentase tal cosa, se echaría por tierra la hipótesis de los tres cuerpos simples con los que querrían componer todos los mixtos. Y aún así quedaría por explicar en razón de que el principio que se supone que dota a otro de tal cualidad resulta estar dotado a su vez de ella, pues es patente que una masa de azufre no es un cuerpo atómico o diamantino, sino que consta de una multitud de corpúsculos de determinadas formas conectadas de diverso modo, por lo que se puede preguntar razonablemente por qué tal reunión de partículas y no muchas otras, constituye un cuerpo fusible.

Me lleva esto a una ulterior consideración que me hace ver que las explicaciones del químico no son lo bastante profundas y radicales, y es la siguiente, que cuando nos dice, por ejemplo, en caso de que lo que dice sea cierto, no hace sino comunicarnos qué ingrediente material es aquél que, mezclado y disperso a través de las otras partes de un cuerpo lo hacen apto para fundirse. Más ello no señala inteligiblemente qué es lo que hace fusible una porción de materia y cómo introduce el ingrediente sulfúreo dicha disposición en el resto de la masa con la que se combina o une. Sin embargo, son tales explicaciones las que busca principalmente un naturalista inquisitivo, por los que las llamaré filosóficas. Y a fin de mostrar que puede haber explicaciones más fontales, me limitaré a observar que, para no alejarnos de nuestro ejemplo, el propio azufre es fusible. Por consiguiente, como he señalado hace poco la fusibilidad, que no es la propiedad de un átomo o partícula, sino la de un agregado de partículas, debería ella misma explicarse en dicho principio antes de derivar de él la fusibilidad de todos los demás cuerpos.

En las notas que siguen<sup>5</sup> se verá que en el propio azufre esa cualidad probablemente se puede deducir de la reunión de corpúsculos de determinadas formas y tamaños entretejidos y conectados de forma conveniente. Y si la naturaleza o el arte o el azar uniese partículas dotadas de semejantes afecciones mecánicas, asociándolas de igual manera, el cuerpo resultante sería fusible aún cuando las partículas componentes nunca hubiesen formado parte del azufre primordial del químico, y quizá tales partículas así unidas podrían haber compuesto el propio azufre aunque no existiese tal cuerpo en el mundo. Y lo que les digo a esos químicos que hacen del ingrediente sulfúreo la causa de la fusibilidad se puede aplicar “mutatis mutandi” a la hipótesis que atribuye más bien esa cualidad al principio mercurial o salino, con lo que consiguientemente no pueden dar una explicación racional de la fusibilidad del azufre. Por tanto, aunque concedo de buen grado que el azufre u otro de los miembros de la “tria prima” puede hallarse abundando incluso en diversos cuerpos dotados de la cualidad que se atribuye a su participación en ese principio, con todo quizá el siguiente ejemplo os ayude a ver que ello puede no ser un signo seguro de que la cualidad poseída emane de ese ingrediente. Si el estaño se mezcla debidamente con cobre u oro o, como he probado, con plata y hierro, los tornará muy frágiles [...] Mas aunque el estaño sea un ingrediente importante de todos esos cuerpos frágiles mencionados, sería muy precipitado afirmar que la fragilidad en general procede del estaño, pues suponiendo que las partes sólidas de los cuerpos consistentes sólo se toquen unas a otras en pequeñas porciones de sus superficies sin trabarse con su contextura, el compuesto metálico u otro cualquiera puede ser frágil aunque no contenga estaño.

---

<sup>4</sup> Las afecciones o cualidades primarias de los cuerpos: las afecciones que pertenecen a un cuerpo considerado en sí mismo, sin consideración con los seres sensibles u otros cuerpos animales, son las ordenaciones de sus corpúsculos (o *prima naturalia*) que Boyle denomina su textura. De ella derivan las cualidades o afecciones secundarias, que no son sino el efecto que las primarias producen sobre los sentidos, como el color o el olor. De este modo, se pueden producir nuevas cualidades en los cuerpos como mero resultado de introducir en ellos nuevas texturas... de ahí incluso la posibilidad teórica de las transmutaciones, pues las cualidades que definen, por ejemplo, al oro, pueden producirse en otro metal manipulando la organización de sus átomos.

<sup>5</sup> Este texto es un capítulo de un tratado mayor (*Experimentos, notas etc. sobre la producción u origen mecánico de diversas cualidades particulares, entre las que se inserta un discurso sobre la imperfección de la doctrina del químico acerca de las cualidades... etc.*) en el que se reducen mecánicamente las cualidades del frío y el calor, los sabores y los olores, la acidez y la alcalinidad... hasta el magnetismo y la electricidad.



## 2.4 Experimentos

### Los metales se pueden quemar

Desde épocas muy tempranas, diversas sociedades humanas se dieron cuenta de que la mayoría de los metales, no el oro ni la plata, podían volverse ceniza o polvo si eran calentados fuertemente. Por muchos años no fue posible explicarse el porqué había un aumento en la masa cuando se pesaban las cenizas o calx resultante de los metales, hasta que Jean Rey, un científico que en 1630 tratara de dar una explicación acerca de lo que sucedía, proponiendo la existencia de un “adhesivo” dentro de los hornos, el cual se mezclaba con las cenizas provocando el aumento en la masa. Su idea, que no estaba tan lejos de la realidad, fracasó pues no logró comunicar sus hallazgos de una manera convincente para la sociedad científica de la época. El médico inglés J. Mayow perfeccionó estos experimentos y atribuyó el aumento del peso en las cenizas a un constituyente del aire, una partícula que de acuerdo con Boyle llamó “espíritu nitro-aéreo” y que retrospectivamente puede pensarse como lo que luego Lavoisier bautizó como oxígeno.

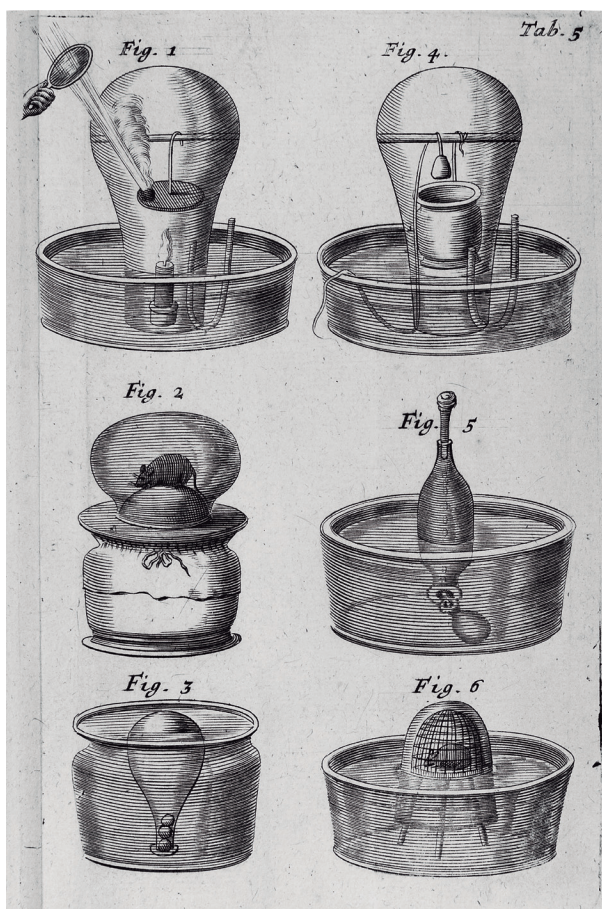


Figura 2.3. Equipos que utilizó Mayow para realizar sus experimentos de combustión.

### **Materiales y sustancias sugeridos**

- Mechero Bunsen
- Balanza
- Tripié
- Pinzas
- Cerillos
- 2 cápsulas de cerámica
- Espátula de metal
- Lentes de seguridad
- Limaduras de hierro
- Magnesio en cinta

### **Un procedimiento posible**

1. Pesar una cápsula de porcelana y anotar su masa.
2. Poner dos cucharillas o espátulas llenas de las limaduras del hierro en la cápsula y volver a pesarla.
3. Colocar la cápsula con las limaduras de hierro en el tripié. Poner la segunda cápsula al revés y encima de la primera cápsula para producir un ambiente más o menos sellado.
4. Usando los lentes de seguridad, encender el mechero de Bunsen. Ajustar la llama abriendo el agujero de aire hasta que se esté quemando fuertemente.
5. Calentar las limaduras del hierro en la cápsula por una hora. Después de ese tiempo hay que permitir que se enfríe por 10 minutos.
6. Utilizar las pinzas para llevar la cápsula a la balanza y pesarla.
7. Repetir el experimento con el magnesio en cinta. En este caso la reacción es mucho más rápida.

## 2.5 La reacción química. Ácidos y bases

Boyle identificó a los elementos como sustancias puras y descubrió que algunos jugos coloridos de plantas cambiaban de color cuando se colocaban en presencia de ácidos o de álcalis, es decir, descubrió lo que hoy llamamos *indicadores ácido-base* (como el tornasol), ello permitió clasificarlos de manera muy simple. Así, además de reconocer a las sustancias por sus propiedades “físicas” (por ejemplo, las disoluciones de los álcalis eran resbaladizas y disolvían a los aceites, mientras que las disoluciones ácidas eran corrosivas y disolvían muchas sustancias) se empezó a reconocer sistemáticamente a las sustancias por las reacciones que llevaban a cabo entre ellas, quedando claro que cuando un ácido reaccionaba con un álcali producía una sal neutra. Así se estableció la reacción fundamental de la Química:



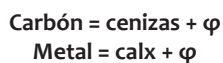
y de la que O. Tachenius, un contemporáneo de Boyle, dijo: “todas las sales pueden dividirse en dos partes: una ácida y otra alcalina”.

Pocos años después, el francés N. Lemery publicó *Cours de Chymie*, libro que recoge ideas de otros protoquímicos de la época y logra presentarlas de manera clara y precisa, lo que lo convierte en un *bestseller* de la época, incluso fue traducido a muchos idiomas. Por ejemplo, a partir del modelo mecánico desarrollado por Boyle explica las propiedades de ácidos y álcalis por su forma: los primeros están constituidos por partículas llenas de agujas, mientras que los segundos por partículas llenas de poros, y que eran percibidos por el tacto como picantes o resbalosos. En la reacción de neutralización, las agujas de unos penetran los poros del otro, de manera que la sal resultante ya no presenta ninguna de las propiedades originales de ambos. Mas aún el poderoso ácido conocido como “agua regia” era capaz de disolver la plata, pero no el oro, por el diferente tamaño de los poros de uno u otro metal.



Figura 2.4. Modelo icónico de la reacción entre un ácido y un álcali.

A través del modelo del flogisto se explicó una gran cantidad del conocimiento alquímico y protoquímico desarrollado hasta mediados del siglo XVIII. Propuesto originalmente por el renano J. Becher, fue desarrollado por el bávaro G.E. Stahl en la hoy Alemania. El experimento de la calcinación de los metales fue explicado por Stahl asumiendo que para que se quemaran los metales deberían tener una sustancia inflamable, invisible y carente de peso a la que llamó *flogisto* (representado como  $\varphi$ ). La pérdida o ganancia de carácter metálico estaba en la inversa proporción que la ganancia o pérdida de flogisto. Lo mismo sucedía en la combustión, la sustancia que se quemaba (carbón, aceite, azufre, etc.) contenía también otra sustancia, el flogisto. Lo anterior se puede representar así:



Cuando la sustancia se quemaba, el flogisto se desprendía. Si las cenizas o la calx resultante era abundante implicaba que la sustancia original tenía poco flogisto, mientras que si el residuo era mínimo, indicaba que la mayoría de la sustancia original era flogisto. Operativamente, eso significaba que para recuperar un metal de su herrumbre lo que hay que añadir es flogisto (o una sustancia que lo tenga en gran cantidad como el carbón). Así este modelo proporcionaba una síntesis explicativa de dos importantes procesos: la combustión y la calcinación. No sólo eso, también explicaba la acidez y alcalinidad. Stahl publicó en 1723 un tratado sobre las sales, en las que da cuenta de que a mayor contenido del flogisto en una sustancia, más alcalina resultaba.



# Industria y medio ambiente

## Ácido sulfúrico

*Podemos juzgar razonablemente la prosperidad comercial de un país, por la cantidad de ácido sulfúrico que consume.*

**J. Liebig, 1843**

El aceite del vitriolo era conocido antes del periodo protoquímico. Su obtención era complicada (principalmente a partir de la destilación del vitriolo verde, es decir, sulfato ferroso heptahidratado),<sup>6</sup> la cantidad obtenida era pequeña (lo que implicaba un alto precio) por lo que sus usos eran pocos, fundamentalmente como agente blanqueador de telas.

Eso cambió a partir de 1736, cuando el curandero J. Ward, en compañía de lo que hoy llamaríamos un químico J. White, al agregar salitre al azufre lo empezó a producir en grandes cantidades en Twickenham, Inglaterra, a través del proceso que denominó “aceite de vitriolo hecho por la campana”.<sup>7</sup> A pesar de las mejoras en el proceso, los historiadores británicos Clow y Clow indican que cuatro años después la empresa de Ward debió trasladarse a Richmond por las quejas de las “distinguidas narices” de Twickenham en la producción del aceite de vitriolo.

En 1746, en Birmingham, J. Roebuck y S. Garbett empezaron a producir ácido sulfúrico utilizando el mismo proceso, pero cambiando los frágiles recipientes de vidrio por otros de robusto plomo (que no reacciona con el ácido) por lo que se conoce como el método de las cámaras de plomo. Con el importante crecimiento de los recipientes, la producción aumentó casi diez veces y tres años después una segunda fábrica se estableció en Escocia. La concentración del ácido a través de este proceso alcanzó el 78%. Durante los siguientes años se realizaron pequeñas mejoras en el proceso, hasta que en 1831, el también inglés P. Phillips descubrió que el platino finamente dividido catalizaba la oxidación a temperaturas entre 400°C y 500°C. En 1913, la empresa química alemana BASF patentó el uso de pentóxido de vanadio como catalizador y es el que, con pequeñas variantes, se usa en la actualidad.

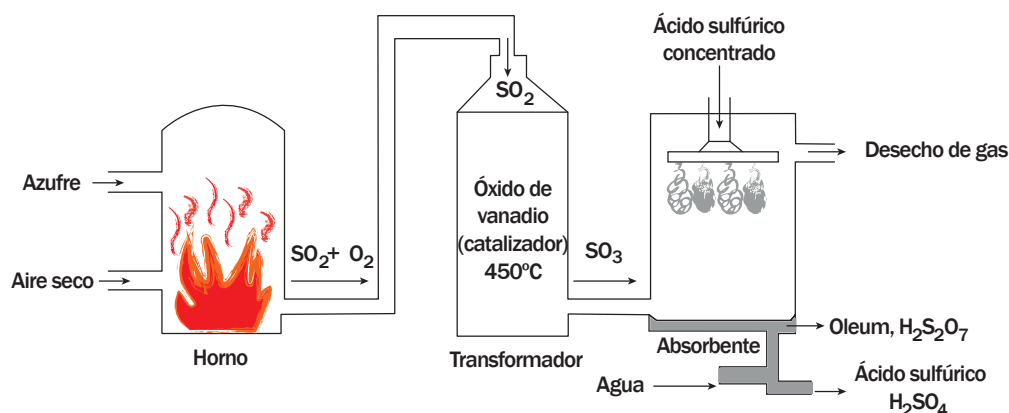


Figura 2.4. Diagrama sobre la producción de ácido sulfúrico.

Cuando los óxidos de azufre, emitidos por fábricas o centrales eléctricas que queman carbón que contiene azufre, se combinan con el agua de la atmósfera, se produce lo que es conocido como *lluvia ácida*, que no es otra cosa que ácido sulfuroso y sulfúrico cayendo del cielo.

<sup>6</sup> En términos actuales la reacción sería:  $2\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{SO}_2 + 13\text{H}_2\text{O}$

<sup>7</sup> El salitre, que principalmente es nitrato de potasio, actúa como catalizador en la oxidación del dióxido al trióxido de azufre.

## 2.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron de la protoquímica construyan una pregunta abierta y contéstena, empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

- Reconoce el contexto político-cultural del desarrollo de la protoquímica identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la protoquímica al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica los movimientos y/o corrientes artísticas y filosóficos a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.

### 2. Instrumentos

- E. Torricelli, pocos años antes que van Guericke, diseñó un dispositivo en el que se fabricaba vacío ¿en que consiste dicho dispositivo? ¿por qué no se utiliza actualmente?
- (A). ¿Cómo se mide el vacío producido por una bomba como la usada por Boyle?
- Consulta en la colección de videos *Cumbres de la ciencia y la técnica*, cada uno con duración de 15 minutos, el video número 88 habla sobre van Guericke, construye tres preguntas abiertas sobre el mismo ([https://www.youtube.com/watch?v=EkyzaJ6Bl1U&list=PLB2DA3D3isa\\_u2LRr8ZETws-jJr-6p26](https://www.youtube.com/watch?v=EkyzaJ6Bl1U&list=PLB2DA3D3isa_u2LRr8ZETws-jJr-6p26)).

### 3. Textos originales

- (D). El siguiente fragmento del texto de Boyle ejemplifica el pensamiento protoquímico ¿por qué?

Por tanto, hemos de recurrir a principios más primarios y generales, para explicar algunas de esas cualidades, puesto que dándose en los cuerpos que se suponen perfectamente similares u homogéneos, no se puede pretender que las que se hallan en uno de ellos se deriven de otro. Y aunque podría responder muchas cosas a la afirmación de que pertenece a la naturaleza de un principio poseer esta o aquella cualidad, como por ejemplo a la del azufre ser fusible, por lo que no hemos de pedir cuentas de por qué sea así, me limitaré ahora a señalar que este argumento sólo se basa en una suposición y no tendrá ninguna fuerza si de las afecciones primarias de los cuerpos se puede deducir una buena explicación mecánica de la fusibilidad en general, sin necesidad de suponer un azufre primigenio como el que imaginan los químicos, o sin derivarlo de él en otros cuerpos...

- (A). Los *prima naturalia* (o *minima naturalia*) y los átomos ¿son lo mismo? Construye una RAT para argumentarlo.
- (A). ¿La bomba de vacío se puede utilizar para demostrar la Ley de Boyle? ¿Cómo?

### 4. Experimentos

- (A) ¿Qué tipo de reacción se está llevando a cabo?
- ¿Cuál es la diferencia en apariencia entre los metales y su calx?
- ¿Cuál es el incremento (en porcentaje) del peso de la calx con respecto al metal original.

### 5. Reacción química. Ácidos y bases

- (D). Indica algunas de las objeciones que se le pueden hacer al modelo de Lemery.
- (A). Los avances más significativos de este periodo histórico tienen que ver con reacciones entonces llamadas de *combustión* o *calcinación* y que desde nuestro presente podemos interpretar como reacciones redox o ácido-base. Anacrónicamente, explica la calcinación como una reacción ácido-base.
- (A, D). A continuación se indican una serie de fenómenos que pueden ser explicados a partir del modelo del flogisto y también del modelo del oxígeno desarrollado durante la primera revolución química que bien conoces. Representalos con sus signos correspondientes:
  - a) la combustión.
  - b) la extracción de un metal del mineral que lo contiene.
  - c) Un metal (p. ejemplo Zn) se agrega a un ácido (p. ejemplo,  $H_2SO_4$ ).
  - d) las sustancias que arden intensamente dejan pocas cenizas.
  - e) cuando los metales se queman aumenta su peso.

# 3 Primera revolución (1754-1818)

140.  
TABLA DE LAS SUSTANCIAS SIMPLES.

	Nombres nuevos.	Nomb. antiguos á q corresponden.	
Substancias simples que pertenecen á los tres reynos, y que pueden mirarse como elementos de los cuerpos . .	Luz. . . . .	Luz. Calor. Principio del calor.	
	Calórico. . . . .	Fluido igneo. Fuego. Materia del fuego y del calor.	
	Oxígeno. . . . .	Ayre deflogisticado. Ayre empyreal. Ayre vital. Base del ayre vital.	
	Azoeto . . . . .	Gas flogisticado. Mofeta. Base de la mofeta.	
	Hidrógeno. . . . .	Gas inflamable. Base del gas inflamable.	
	Substancias simples no metálicas y oxidables y acidificables.	Azufre. . . . .	Azufre.
		Fósforo . . . . .	Fósforo.
		Carbon . . . . .	Carbon puro.
		Radical muriático.	Desconocido.
		Radical fluorico.	Desconocido.
Radical borácico .		Desconocido.	
Antimonio. . . . .		Antimonio.	
Plata . . . . .		Plata.	
Arsénico. . . . .		Arsénico.	
Bismuto. . . . .		Bismuto.	
Substancias simples metálicas oxidables y acidificables.	Cobalto. . . . .	Cobalto.	
	Cobre. . . . .	Cobre.	
	Estaño . . . . .	Estaño.	
	Hierro. . . . .	Hierro.	
	Alabandina . . . . .	Alabandina.	
	Mercurio . . . . .	Mercurio.	
	Molibdeno . . . . .	Molibdeno.	
	Níquel. . . . .	Níquel.	
	Oro . . . . .	Oro.	
	Platina . . . . .	Platina.	
Substancias simples terreas silificables.	Plomo. . . . .	Plomo.	
	Volfrán . . . . .	Volfrán.	
	Zink. . . . .	Zink.	
	Cal . . . . .	Tierra en cárea, cal.	
	Magnesia . . . . .	Magnesia, base del sal de Epson.	
	Barita . . . . .	Barita, tierra pesada.	
	Alumina . . . . .	Arcilla, tierra del alambre, base del alambre.	
	Siliza . . . . .	Tierra silicea, tierra vitrificable.	

Página del Tratado Elemental de Química de Lavoisier, mostrando sus 33 sustancias simples con sus respectivos nuevos nombres.



Reproducción de la pila de Volta donde pueden identificarse los discos de cobre y de zinc.

## 3.1 Acontecimientos

**D**urante la primera revolución química, se terminaron de escribir los 17 volúmenes de la Enciclopedia (*Diccionario razonado de las ciencias, las artes y de los oficios*) cuyo objetivo principal era difundir las ideas de la Ilustración Francesa. Denis Diderot, uno de sus editores, reconoce la imagen pública de los químicos:

Los químicos son todavía un pueblo distinto, no muy numeroso, que tiene una lengua propia, sus leyes particulares, sus misterios y que vive prácticamente aislado en medio de un pueblo más grande, que muestra poca curiosidad por sus asuntos y que no espera casi nada de su industria.

Ésta, como podrá comprobar el lector, no es muy diferente de la que se tiene hoy. Sin embargo, y en buena medida por la influencia de A. L. Lavoisier, la imagen del laboratorio químico que aparece en la Enciclopedia, a diferencia del de los alquimistas, es público, luminoso, limpio y ordenado.

Años antes ya se había avanzado de manera importante en ese camino. La Química como hoy la conocemos empezó cuando el escocés J. Black perfeccionó la balanza analítica y, en 1754, aisló el dióxido de carbono a partir del carbonato de magnesio, en la que puede reconocerse como la primera reacción química cuantitativa. Con ello el aire deja de considerarse elemental. En 1766, el inglés H. Cavendish perfeccionó la cuba hidroneumática y aísla el hidrógeno, un gas (palabra acuñada por el flamenco alumno de Paracelso, J.P. van Helmont para referirse al caos) no presente en el aire natural. Con las investigaciones de Lavoisier sobre el oxígeno, la ley de conservación de la materia, su empeño en establecer un nuevo lenguaje para la Química y su propuesta de poco más de una treintena de elementos, apareció en inglés la palabra *responsibility* y poco después la francesa *responsabilité*. Este dato filológico, como se verá más adelante, no es trivial. Desde entonces y poco a poco, a la par de muchas de las ideas y formas de ver el mundo, derivadas de la Revolución Francesa y la Revolución Industrial, fue adueñándose de las sociedades europeas la convicción de que debemos asumir, sin excusa ni remedio posible, nuestros propios horrores como algo de lo que debemos dar cuenta. Es en este periodo cuando N. LeBlanc patenta el método para la producción a gran escala de carbonato de calcio. La fabricación de esta sustancia marca de alguna manera el inicio de la Química industrial y su impacto en el medio ambiente.

La invención de A. Volta de la pila eléctrica fue seguida de una multitud de experimentos en los que diversos investigadores pasaban electricidad por diversidad de objetos y sustancias. Destacan los ingleses H. Davy y W. Nicholson y A. Carlisle; el primero por el aislamiento de diversos elementos (entre ellos Na, Mg, Ca, Sr) y los segundos por la electrólisis del agua. Importante como lo fue el nacimiento de la electroquímica, lo que marca de manera fundamental la primera revolución química es la propuesta de J. Dalton de la estructura atómica de las sustancias, asunto que fue respaldado, extendido y parcialmente consolidado por el químico sueco J. J. Berzelius, experimentador extraordinario que reunió la mayor cantidad de pesos atómicos (y moleculares aunque había una importante confusión entre átomos y moléculas en aquel momento) que se tenía en ese tiempo, descubridor de varios elementos, impulsor del modelo electroquímico del enlace y de la nomenclatura de los elementos que usamos en la actualidad. Así, al finalizar la primera revolución química, la Química es reconocida en Europa como una disciplina científica, cuantitativa e independiente, con los átomos como su entidad distintiva, aunque no aceptada por todos. La estequiometría y el modelo de equivalentes desarrollado por J. B. Richter permitió durante muchos años, particularmente en Francia, explicar las reacciones químicas (principalmente las de neutralización) sin necesidad de aceptar el modelo atómico.



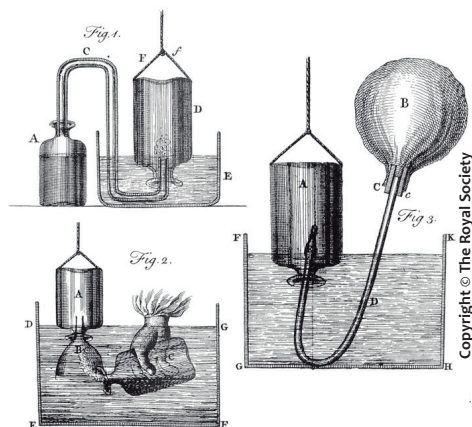
A principios del siglo XIX, la población humana es poco menor de **980 millones** de personas y la esperanza de vida se acerca a los 40 años.

AÑO	HECHOS TECNOQUÍMICOS	HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES
1754	El escocés J. Black aísla el dióxido de carbono (llamado por él aire fijo) a partir del carbonato de magnesio en la que puede reconocerse como la primera reacción cuantitativa. Con ello el aire deja de considerarse elemental. Mejoró la balanza analítica.	• La Revolución Industrial europea favoreció la concentración de personas y la producción a gran escala.
1766	H. Cavendish en Inglaterra aísla en la cuba hidroneumática lo que conocemos como hidrógeno, un gas no presente en el aire, es decir, no natural.	• Independencia de Estados Unidos (1766).
1772 1774	El inglés J. Priestley y el sueco C. Scheele aíslan lo que conocemos como oxígeno.	• A la Revolución Francesa le sigue el Imperio Napoleónico con su secuela de guerra en prácticamente toda Europa.
1784	El mineralólogo y cristalógrafo francés R. J. Haüy propone el concepto de celda unitaria.	• Muere B. Franklin, inventor e impulsor de la primera sociedad científica en América (1790).
1785	C. Coulomb utilizando una balanza de repulsión eléctrica enuncia su famosa ley, casi un siglo después de que I. Newton enunciara la ley de gravitación universal.	• Estados Unidos le compra a Napoleón la Luisiana, el 23% de su actual territorio.
1789	A. Lavoisier reconoce al oxígeno como un elemento y publica el <i>Tratado elemental de química</i> . Enuncia la Ley de Conservación de la materia.	• El germen de la independencia empieza a manifestarse en las colonias americanas españolas.
1791	En Francia N. LeBlanc patenta el método para la producción industrial de carbonato de calcio.	• Kant, Mozart, Goethe y Goya, entre otros artistas y filósofos, marcan con la Ilustración la transición del siglo XVIII al XIX.
1792	El alemán de origen polaco J.B. Richter define la estequiometría como la ciencia que mide las proporciones cuantitativas o relaciones de masa de los elementos químicos que están implicados (en una reacción química). Elabora su modelo de equivalentes.	
1799	El lombardo A. Volta hace pública su batería eléctrica.	
1800	Los ingleses W. Nicholson y A. Carlisle descomponen electrolíticamente el agua.	
1808	J. Dalton publica en Manchester <i>New System of Chemical Philosophy</i> , donde introduce el modelo atómico, el cual es aceptado por muchos químicos, pero no por todos.	
1818	El sueco J.J. Berzelius publica el artículo "Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité" con el, hasta entonces, mayor listado de pesos atómicos y su modelo de combinación electroquímica. Años antes había introducido la nomenclatura de los elementos tal y como la conocemos hoy en día.	



## 3.2 Instrumentos: Cuba hidroneumática

**H**ace casi tres mil años, se empezó a utilizar la palabra griega *pneuma* como un sustantivo que denota tanto “viento” como “aliento”. Vestigios de esa palabra se pueden encontrar, incluso en la actualidad, en la terminología especializada como “neumáticos” y “neumonía” y su traducción al latín *espíritus* como con sus numerosos derivados que impregnan nuestro lenguaje cotidiano. Como uno de los cuatro elementos, el aire fue tratado como una sustancia que expresa las cualidades de la humedad y el calor. Sólo había un aire único.



**Figura 3.1.** Ilustraciones de la cuba hidroneumática, tomadas de *Philosophical Transactions of the Royal Society*, de Cavendish.

En el siglo XVII, J.B. van Helmont acuñó la palabra “gas” (del griego “caos”) indicando: “Yo llamo a este espíritu, hasta ahora desconocido, por el nuevo nombre del gas, que no puede ser retenido en vasos de una forma visible”. A pesar de trabajar con dispositivos que preceden a la cuba neumática, ni van Helmont, ni R. Boyle, J. Mayow, S. Hales, o J. Black fueron claramente capaces de construir un instrumento para aislar los diferentes gases que los químicos de la época asumían que constituían el aire. Cavendish fue el primero en utilizar la cuba neumática para aislar un gas, hasta ahora desconocido. Él describió su uso de la siguiente manera:

Con el fin de llenar una botella con el aire descargado de metales o sustancias alcalinas por disolución en ácidos, o de sustancias animales o vegetales por fermentación, hago uso del artificio mostrado en la figura, donde **A** representa la botella, en la que se colocan los materiales para la producción de aire; de la que sale **C** un tubo de vidrio doblado, a la manera de un tapón. **E** representa un recipiente con agua. **D** la botella para recibir el aire, que primero se llena con agua, y luego se invierte en el recipiente con agua, sobre el extremo del tubo doblado. **F** representa la cadena, por el que se suspende la botella.

Cavendish mejoró su instrumento, sustituyendo el agua (donde los gases se disuelven) por otro líquido, el mercurio. El también británico J. Priestley explotó plenamente esta innovación y aisló varios gases solubles en agua tales como cloruro de hidrógeno o amoniaco.

# Balanza de precisión

La palabra balanza proviene del latín (*bi-lanx*, es decir, dos platos). Hay referencias a ejemplares de este instrumento de hace más de tres mil años. Una de sus primeras representaciones aparece en textos alquímicos del siglo XV. Los farmacéuticos, los joyeros y los metalúrgicos la utilizaron desde hace siglos con una precisión aceptable. Otros químicos, como J. Black, H. Cavendish y P. Lomonosov, precedieron a A. Lavoisier en la determinación del peso de los reactivos y productos en las reacciones químicas. Sin embargo, con su uso sistemático, el francés la colocó como el símbolo de la nueva Química. También indicó la importancia del acceso a la instrumentos de mucha mayor sensibilidad y precisión. A través de los años, la balanza, como los demás instrumentos utilizados por Lavoisier (particularmente el gasómetro y el calorímetro) pasaron de ser instrumentos comunes (es decir, accesibles para el resto de la comunidad) a instrumentos especializados, específicamente diseñados para resolver los problemas experimentales que estaba estudiando. Un asunto importante respecto a la balanza es que remite a un método (el balance) y a un principio (la ley de la conservación de la materia). Acerca de ello el historiador C.E. Perrin indica:

En sus primeros trabajos químicos, también, empleó métodos cuantitativos. Por ejemplo, al usar la balanza analítica para investigar la supuesta conversión de agua en tierra, ejemplifico lo que se ha llamado su “hoja de balance” [...] A pesar de que sus técnicas tenían precedentes, ningún químico antes que él había utilizado métodos cuantitativos de manera sistemática tan efectivamente.

# Calorímetro

El calórico y la luz fueron las únicas dos sustancias imponderables que Lavoisier incorporó en su lista de sustancias. Con ello indicaba, como con el resto de sus sustancias elementales, que ni se creaban ni se destruían, sólo se transformaban. Él lo hizo a partir de los experimentos previos de Black en los que este último observó que al fundirse hielo no cambiaba su temperatura. Es decir, se podía tener una mezcla de hielo y agua y esta mezcla no aumentaba su temperatura hasta que el hielo se derretía. Black llamó a este calor *calor latente*, ya que no calentaba a la sustancia, sólo la cambiaba de fase. Lavoisier, por su parte, llamó *calórico* al fluido que daba lugar a este cambio de fase y junto con el físico francés Laplace, construyó un instrumento para medir la cantidad de calórico involucrado en las reacciones químicas: el calorímetro. El instrumento fue presentado en la Real Academia de Ciencias en 1783 y, a pesar de sus poco precisos resultados, permitió estudiar cuantitativamente diversas reacciones químicas, inclusive las procedentes de la respiración de un conejillo de indias.

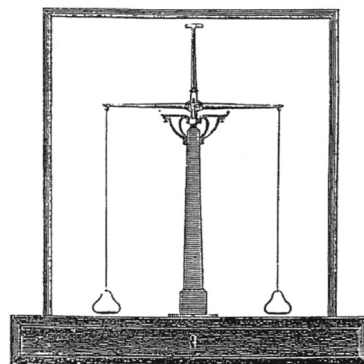


Figura 3.2. Balanza de precisión de Lavoisier. Construida específicamente para él por Magnié, tenía una capacidad de 600 g con una precisión de 5 mg. El mejor instrumento de su tiempo.

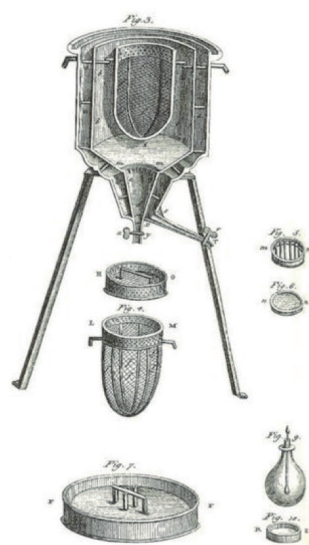


Figura 3.3. El calorímetro está compuesto por tres recipientes metálicos cilíndricos anidados. Los dos mayores terminan en embudos que se encuentran separados entre sí. Los dos cilindros exteriores se llenan de hielo. A pesar de que en el cilindro exterior se funda parte del hielo que contiene, su temperatura permanece constante, con lo que se logra que el recipiente intermedio permanezca aislado de cualquier cambio de temperatura exterior. Así, cuando se lleva a cabo una reacción química en el recipiente interior, todo el calórico desprendido fundirá el hielo del segundo recipiente que saldrá en forma de agua. Lavoisier y Laplace pesaron la cantidad de agua obtenida y la asociaron a la cantidad de calórico liberado en la reacción.

## 3.3 Textos originales

### *Tratado Elemental de Química* (Fragmento)<sup>1</sup>



**Figura 3.4.** Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) and His Wife (Marie Anne Pierrette Paulze, 1758-1836), Lavoisier y su esposa. Autor: Jacques Louis David (1748-1825). Fecha: 1788. Obra de la colección del Museo Metropolitano de Arte (MET) de la ciudad de Nueva York.

Cuando emprendí esta obra sólo me propuse ampliar la memoria de 1787 sobre la necesidad de reformar y perfeccionar la nomenclatura química. Pero trabajando en ello vi mejor que nunca la evidencia de los principios establecidos en la lógica y obras del abate Condillac: a saber, que pensamos con el auxilio de las palabras; que las lenguas son verdaderos métodos analíticos; que el álgebra, la más sencilla, exacta y más propia en el modo de expresar las cosas, es al mismo tiempo una lengua y un método analítico: y, en fin, que el arte de razonar no es otra cosa que una lengua bien formada. Así es que cuando creía ocuparme solamente de la nomenclatura, cuando mi único objeto era perfeccionar el lenguaje químico, hallé que mi obra se había transformado insensiblemente, y sin poderlo evitar, en un tratado elemental de Química.

La imposibilidad de separar la nomenclatura de la ciencia y la ciencia de la nomenclatura, depende de que toda ciencia física se forma precisamente de tres cosas: de la serie de hechos que constituyen la ciencia, de las ideas que los recuerdan y de las palabras que los expresan. La palabra debe hacer nacer la idea y ésta pintar el hecho, y como las palabras son las que conservan y transmiten las ideas, no puede perfeccionarse la lengua sin perfeccionar al mismo tiempo la ciencia, ni la ciencia sin la lengua; por más ciertos que sean los hechos y exactas las ideas que produzcan, siempre harán falsas impresiones si faltan expresiones exactas para manifestarlos.

Se hallarán comprobadas muchas veces estas verdades en la primera parte de este tratado; pero como me ha sido forzoso seguir en él un orden diametralmente opuesto al que hasta aquí se ha seguido en todas las obras de Química, me es preciso manifestar las razones que he tenido para ello.

Es principio general y constante en la matemática, y en todas las ciencias demostrativas, que para aprender debemos pasar de lo conocido a lo desconocido.

Cuando empezamos a estudiar una ciencia estamos respecto a ella en un estado muy semejante a aquel en el que se hallan los niños. Y así como en el niño la idea es un efecto de la sensación, y ésta produce la idea, así al comenzar a estudiar las ciencias físicas nuestras ideas deben ser consecuencias inmediatas de un experimento o de una observación.

Me atrevo a añadir que la situación del que entra en la carrera de las ciencias es peor que la del niño que adquiere sus primeras ideas, pues cuando éste se engaña en los efectos saludables o dañosos que lo rodean, le da la naturaleza infinitos medios para rectificarse. La experiencia le dirige en el juicio que debe formar de las cosas, porque la privación o el dolor son consecuencias de un juicio falso, y el goce y el

<sup>1</sup> Lavoisier, 1995.

placer siguen a un juicio exacto; y con tales maestros se llega bien pronto a ser consecuente, razonando bien.

Pero no sucede así en el estudio y en la práctica de las ciencias. Los juicios falsos que formamos no afectan nuestra existencia ni comodidad; ningún interés físico obliga a rectificarlos. Por el contrario, la imaginación, siempre inclinada a rebasar los límites de lo verdadero; el amor propio y la confianza que nos inspira de nuestras fuerzas, nos hacen sacar consecuencias que no se derivan inmediatamente de los hechos, de manera que en cierto modo parece que estamos interesados en engañarnos a nosotros mismos. Por lo tanto no debe extrañar que en las ciencias físicas suela haber más suposiciones que pruebas y que, transmitiéndose de edad en edad, hayan ido adquiriendo fuerza con el peso de la autoridad, hasta llegar a ser adoptadas como verdades fundamentales aun por hombres de gran discernimiento.

El único medio de evitar estos errores es suspender, o por lo menos simplificar todo lo posible, nuestro raciocinio que es el que puede conducirnos al error; sujetarlo a la experiencia; conservar solamente los hechos que son datos de la naturaleza y no pueden engañarnos; no buscar la verdad sino en el encadenamiento natural de los experimentos y observaciones, como lo hacen los matemáticos, que llegan a resolver un problema por medio de la disposición simple de los datos, y reduciendo el raciocinio a operaciones tan breves que jamás pierden de vista la evidencia que les sirve de guía.

Convencido de estas verdades, me he propuesto pasar siempre de lo conocido a lo desconocido: no sacar ninguna consecuencia que no se derive inmediatamente de los experimentos y observaciones, y encadenar los hechos y verdades químicas en el orden más perceptible para los principiantes. Sujetándome a este plan era imposible no separarme de los métodos ordinarios. El defecto de todos los cursos y tratados de química es suponer en las primeras lecciones unos conocimientos que no puede adquirir el discípulo o lector sino hasta las lecciones siguientes. Casi en todos ellos se empieza a tratar de los principios de los cuerpos, y a explicar la tabla de las afinidades, sin advertir que por este método es necesario recorrer desde el primer día los principales fenómenos de la química, servirse de términos que no están aún definidos, y suponer instruidos ya en la ciencia a los que se trata de enseñar. Así ocurre que se aprende muy poco en el primer curso de química; que apenas basta un año para que se familiaricen al oído con el lenguaje y la vista con los aparatos, y que es casi imposible formar un químico en menos de tres o cuatro años.

Consciente de que estos inconvenientes no dependen tanto de la naturaleza de las cosas como del modo de enseñarlas, me he propuesto abrir en la química un nuevo rumbo, según mi modo de pensar, más conforme al que sigue la naturaleza. No se me ha ocultado, sin embargo, que al querer evitar una dificultad me metía en otra, pero me atrevo a decir que las que quedan por resolver no dependen del sistema que me he propuesto, sino que son consecuencias del estado imperfecto en que se halla la ciencia. Tiene ésta muchas lagunas que interrumpen la serie de los hechos y exigen suplementos embarazosos y difíciles. Carece de la ventaja –que tiene la geometría elemental– de ser una ciencia completa y cuyas partes están íntimamente ligadas entre sí; pero por otra parte su marcha actual es tan rápida y el sistema que sigue la doctrina moderna de la colocación de los hechos tan bueno, que podremos verla muy cerca del punto de perfección de que es susceptible.

Como me propuse seguir con todo rigor la ley de no deducir más consecuencias que las que presenten los experimentos, ni añadir nada de lo que callen los hechos, no puedo abarcar en esta obra aquella parte de la química que quizá llegará a ser algún día más exacta, la que trata de las afinidades químicas o atracciones electivas. Carecemos aún de datos principales, o los que tenemos no son bastante exactos y rigurosos para servir de base fundamental a una parte tan esencial de la química.

[...] Todo cuanto puede decirse sobre el número y naturaleza de los elementos se reduce, en mi sentir, a disputas puramente metafísicas, que son unos problemas indeterminables que admiten muchas soluciones, y es probable que ninguna de ellas, tal vez, corresponda a la naturaleza. Me contentaré pues con decir que si con el nombre de elementos queremos especificar las moléculas simples e indivisibles que componen los cuerpos, es probable que nos equivoquemos; pero por el contrario, si solamente queremos expresar la idea del último término a que llega el análisis, todas las sustancias que hasta ahora no hemos podido descomponer por ningún medio son para nosotros otros tantos elementos. No porque podamos asegurar que estén compuestos de dos o más principios sino porque, no habiéndose llegado jamás a separarlos o, por mejor decir, faltándonos los medios para hacerlo, son para nosotros unos cuerpos simples, que debemos considerar como tales hasta que la experiencia y la observación nos manifiesten lo contrario.



# Un nuevo sistema de filosofía química

## (Fragmento)<sup>2</sup>

Hay tres distintas clases de cuerpos o tres estados que han reclamado en mayor grado la atención de los químicos científicos: los que se señalan con los términos fluidos elásticos, líquidos y sólidos. En el agua se nos presenta un ejemplo muy familiar de un cuerpo que, en ciertas circunstancias, es capaz de adoptar los tres estados. En el vapor reconocemos un fluido perfectamente elástico; en el agua, un líquido perfecto, y en el hielo, un sólido completo. Estas observaciones han conducido tácitamente a la conclusión, en apariencia universalmente aceptada, de que todos los cuerpos de magnitudes perceptibles, sean ellos líquidos o sólidos, están constituidos por un vasto número de partículas extremadamente pequeñas, o átomos de materia, que se mantienen unidas por una fuerza de atracción más o menos potente, según las circunstancias, la cual, puesto que procura impedir su separación, es llamada muy propiamente, desde ese punto de vista, atracción de cohesión, pero como las recoge desde un estado disperso (como del vapor de agua) es llamada atracción de agregación o, más simplemente, afinidad [...] Al preguntarse si las partículas últimas de un cuerpo, tal como el agua, son todas semejantes, esto es, de la misma forma, peso, etc. reviste alguna importancia. De lo conocido no tenemos ninguna razón para suponer alguna diversidad en estos aspectos: si ella existe en el agua, debe igualmente existir en los elementos que constituyen al agua, a saber hidrógeno y oxígeno. Ahora bien, es casi imposible concebir cómo los agregados de partículas diferentes puedan ser tan uniformemente iguales. Si alguna de las partículas de agua fuesen más pesadas que las otras, y si alguna porción del líquido estuviera, en alguna ocasión, constituida principalmente por estas partículas más pesadas, debe suponerse que esto afectaría el peso específico de la masa, circunstancia no conocida. Por tanto podemos concluir que las partículas últimas de todos los cuerpos homogéneos son perfectamente iguales en peso, forma, etc. En otras palabras, cada partícula de agua es igual a toda otra partícula de agua; cada partícula de hidrógeno es igual a toda otra partícula de hidrógeno, etc.

### Sobre la síntesis química

Cuando un cuerpo existe en estado elástico, sus partículas últimas están separadas una de otra por una distancia mucho mayor que en cualquier otro estado; cada partícula ocupa el centro de una esfera relativamente grande y sostiene su posición manteniendo a todas las demás, que por su peso o de alguna otra manera tienden a usurparla, a una distancia respetable. El intentar concebir el número de partículas en una atmósfera es algo así como si intentáramos concebir el número de estrellas en el universo; el pensamiento nos confunde. Pero si limitamos el asunto, tomando un volumen dado de cualquier gas, nos parece que si hacemos las divisiones muy pequeñas, el número de partículas debe de ser finito, lo mismo que en un espacio dado del universo, el número de estrellas y planetas no puede ser infinito.

<sup>2</sup> Dalton, 1992.

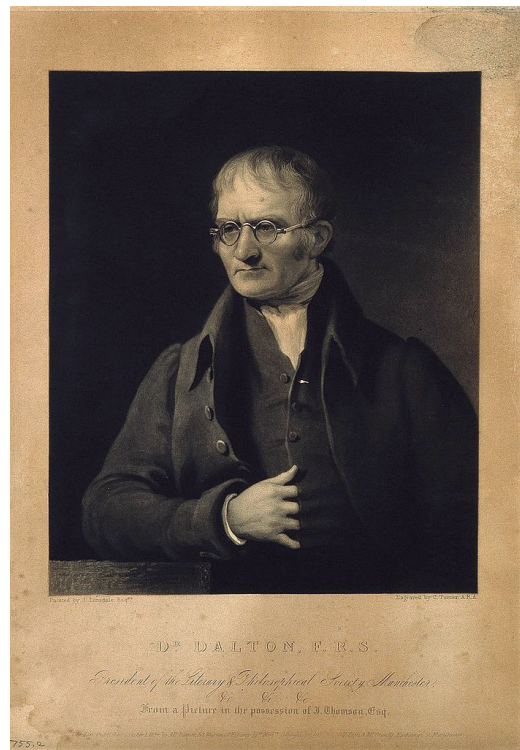


Figura 3-5. John Dalton (1766-1844).



El análisis y la síntesis química no van más allá de la separación de partículas unas de otras y de su reunión. Ninguna creación o destrucción de materia está dentro de la acción química. Tanto podríamos intentar introducir un nuevo planeta en el sistema solar como intentar crear o destruir una partícula de hidrógeno. Los cambios que podemos producir consisten tan sólo en separar las partículas que estaban en estado de cohesión o de combinación y unir aquellas que previamente estaban separadas.

En todas las investigaciones químicas se consideró que un objeto importante de ellas es asegurar los pesos relativos de los simples (elementos) que constituyen un compuesto. Pero, por desgracia, la investigación terminó aquí, mientras que de los pesos relativos en la masa se podría haber inferido el peso de las partículas últimas o átomos de los cuerpos y de estos pesos resultarían su número y su peso en varios otros compuestos para asistir y guiar investigaciones futuras y corregir sus resultados. Ahora bien, uno de los grandes objetivos de este trabajo es mostrar la importancia y la ventaja de asegurar los pesos relativos de las partículas últimas tanto de los cuerpos simples como de los compuestos, el número de partículas simples elementales que constituyen una partícula compuesta y el número de partículas menos compuestas que entran en la formación de una más compuesta.

Si hay dos cuerpos A y B, que tienden a combinarse, el orden según el cual los compuestos pueden formarse, comenzando por el más simple, es el siguiente:

- 1 átomo de A + 1 átomo de B = 1 átomo de C, binario
- 1 átomo de A + 2 átomos de B = 1 átomo de D, ternario
- 2 átomos de A + 1 átomo de B = 1 átomo de E, ternario
- 1 átomo de A + 3 átomos de B = 1 átomo de F, cuaternario
- 3 átomos de A + 1 átomo de B = 1 átomo de G, cuaternario

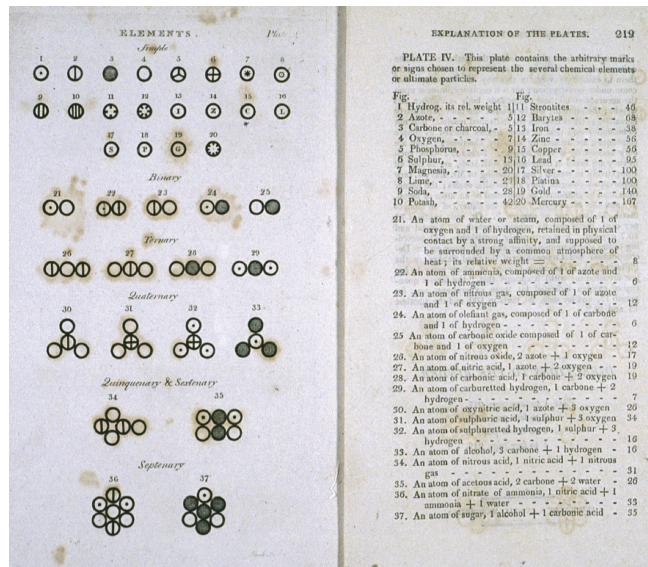


Figura 3.6. Símbolos utilizados por Dalton para diferentes tipos de átomos.

## 3.4 Experimentos

### La descomposición del agua por electrólisis

A principios del siglo XIX, el italiano Alessandro Volta construyó un aparato que podía producir, por primera vez, una corriente eléctrica: la pila voltaica. Cuando las noticias de los experimentos de Volta llegaron a Londres, el profesor de anatomía A. Carlisle, fabricó su propia pila voltaica con su amigo W. Nicholson. Impresionado por la pila, Nicholson comenzó sus propias investigaciones. En una de éstas unió alambres de platino a los extremos opuestos de la pila. Cuando los otros extremos de los alambres fueron sumergidos en un plato que contenía agua y algunas gotas del ácido sulfúrico, burbujas de gas eran producidas en los extremos de los alambres. Nicholson recogió estos gases y los examinó. El alambre conectado con el polo positivo de la pila produjo oxígeno; el alambre conectado con el polo negativo produjo hidrógeno. La cantidad del hidrógeno producido fue dos veces más que la del oxígeno, sugiriendo que el agua estaba compuesta de dos porciones de hidrógeno y una porción de oxígeno. Por primera vez la electricidad –en vez del calor– había sido utilizada para la descomposición de una sustancia.

#### Materiales y sustancias sugeridos

- Una pila de 6V
- Dos cables de aproximadamente 30 cm con los extremos pelados
- Un recipiente de agua (al menos de 20 cm de lado por 15 de alto)
- Dos tubos de ensayo
- Cerillos
- Astillas de madera
- Lentes de seguridad
- Guantes
- Agua de la llave
- Agua destilada
- Ácido sulfúrico 2M

#### Un procedimiento posible

1. Llenar hasta la mitad el recipiente con agua de la llave y agregar unas gotas de ácido sulfúrico.
2. Llenar completamente los dos tubos de ensayo con esta disolución, para ello acostarlos y sumergirlos completamente en el recipiente y, después, levantarlos con lentitud asegurándose de que la boca del tubo siempre esté sumergida.
3. Conectar cada uno de los cables a cada uno de los polos de la pila y cerciorarse de que el otro extremo esté dentro de cada uno de los tubos.
4. Identificar cada uno de los gases por su reacción con una astilla de madera recién apagada.
5. Repetir el experimento con agua destilada.

## 3.5 La reacción química. Ácidos y bases

A lo largo de esta revolución se inicia el entendimiento de las condiciones cuantitativas de la Química. Aquí se presentarán dos de las principales aportaciones relacionadas con los ácidos y las bases. Por un lado, el alemán B. Richter utiliza la palabra estequiometría (que tiene una etimología griega en las palabras *stoicheon*, que significa elemento, y *metron*, que significa medida), por lo que el significado del término estequiometría es medida de los elementos.

En la época de Richter, en la transición entre la protoquímica y la Química, se estudiaban intensamente las reacciones de neutralización, es decir, aquellas que se podían representar de la siguiente manera:



pero siempre de forma cualitativa. Este tipo de reacciones eran muy estudiadas, sobre todo para los procesos mineros, cuando se trataba de disolver minerales. La mayoría de los minerales conocidos en esa época eran básicos como la “tierra de magnesio”. Richter tenía la idea de que las proporciones con que las sustancias se combinaban formaban series aritméticas o series geométricas. Es decir, lo que él trataba de mostrar era que para  $x$  gramos de un mismo ácido reaccionaban  $a$  gramos de una base,  $a + b$  gramos de otra base y así sucesivamente. Los coeficientes  $a$  y  $b$  son diferentes para cada base.

En 1802, otro químico alemán, Ernst Fisher señalaba que los datos obtenidos por Richter (autor en 1794 del libro *Stoichiometry*) se pueden tabular referidos, tanto los ácidos como las bases, a mil partes del ácido Vitriolo.

Bases		Ácidos	
Alumina	525	Vitriolo	1000
Magnesia	615	Fluórico	427
Cal	793	Carbónico	577
Estronia	1329	Muriático	927
Barita	2222	Nítrico	1405

Fisher explicó el significado de ésta diciendo que “si se toma una sustancia de una de las dos columnas, digamos magnesia, que corresponde al número 615, los números de la otra columna indican la cantidad necesaria de cada uno de los ácidos para neutralizar esas 615 partes de magnesia”. Esta tabla de 10 números da, al unirlos por pares, la composición de 25 sales. Es la primera tabla de pesos equivalentes.

Por las mismas fechas, el francés Joseph Proust realizaba investigaciones con diversas sustancias tanto naturales como artificiales (obtenidas en el laboratorio). Lo que Proust quería demostrar era que no importaba de dónde provenían las sustancias, lo que él propuso fue que su composición era constante. Uno de los experimentos realizados por Proust se describe a continuación:

mil libras de cobre disueltas en los ácidos, nítrico o vitriolo, y precipitando con carbonato de soda o potasa, invariablemente se obtienen 180 libras del característico carbonato de cobre verde. Si a esta cantidad se le somete a un proceso de “destilación” obtendríamos 10 libras de agua, la cual parece ser tan esencial para el color verde y su composición como el carbonato es para el mismo ácido carbónico. Privado de estos dos componentes el carbonato, deja 125 libras de un óxido negro en el fondo de la retorta. Este óxido se disuelve en ácido nítrico en caliente sin descomponerse. De la misma forma, se disuelve en ácido muriático, el cual es un oxidante, de esta disolución se escapa oxígeno en forma de burbujas, como el cobre es imposible combinarlo con más de 25 partes de oxígeno por 100. Uno puede, entonces, en todos los análisis tomar 180 libras de carbonato o 125 libras y encontrar esta razón de oxidación. Si tomamos 100 gramos de carbonato de cobre “natural” y los disolvemos en ácido nítrico y lo separamos con carbonatos alcalinos, obtenemos 100 gramos del carbonato de cobre artificial.

La conclusión a la que Proust llegó fue la siguiente:

Debemos concluir que la naturaleza opera, tanto en sus profundidades como en la superficie o en las manos del hombre, de la misma manera. Estas proporciones invariables, estos atributos constantes, los cuales caracterizan a los verdaderos compuestos ya sean de arte o naturales, en el mundo, este **pondus naturae**... No es más que el poder de la química en la ley de la elección, la cual preside a todas las combinaciones.

Ésta es mejor conocida como la ley de las proporciones constantes.

La definición operativa de sustancia se debe al francés A. Lavoisier, quien consideró 33 sustancias como elementos, usando su definición de sustancia, es decir, aquella que no se podía “romper” en entidades más simples a través del análisis químico. Además de las entonces bien conocidas como el oro, el cobre, el mercurio, el azufre, la magnesia o el oxígeno, incluyó en su lista al calórico y a la luz (evidentemente y visto desde nuestro presente la separación entre materia y energía era un asunto de compleja resolución experimental). Como lo dice en su famoso *Tratado Elemental de Química* aparecido en 1789:

Todo lo que se puede decir sobre el número y la naturaleza de los elementos se limita –según pienso– a discusiones puramente metafísicas: son problemas indeterminados los que se trata de resolver, que son susceptibles de una infinidad de soluciones, pero que, muy probablemente, ninguna en particular está de acuerdo con la naturaleza. Me contentaré, por lo tanto, con decir que si por el nombre de elemento, entendemos designar las moléculas simples e indivisibles que componen los cuerpos, es probable que no los conozcamos; que si por el contrario, atribuimos el nombre de elementos o de principios de los cuerpos la idea del último término al que llega el análisis, todas las sustancias que no hemos podido descomponer todavía por ningún medio, son, para nosotros, elementos; no significa que podamos asegurar que estos cuerpos que consideramos como simples no sean ellos mismos compuestos de dos o incluso de un número más grande de principios, pero dado que estos principios no se separan jamás, o más bien, dado que no disponemos de ningún medio para separarlos, se comportan desde nuestro punto de vista como cuerpos simples, y no debemos suponerlos compuestos más que cuando la experiencia o la observación nos haya ofrecido la prueba.

La lista de 33 elementos de Lavoisier es radicalmente diferente de la de los cuatro aristotélicos. A pesar de que el fuego permanecía como “calórico”, el aire se había descompuesto en varios aires aislados en cubas neumáticas. La tierra a partir del uso de nuevas técnicas experimentales, particularmente derivadas de la incorporación de la electricidad en los laboratorios dio lugar a varias tierras, mientras que el agua se había demostrado que estaba compuesta por hidrógeno y oxígeno. La **forma de conocer de historia natural** se consolidaba.

Lavoisier incorporó la palabra oxígeno a la Química. Ésta proviene del griego y significa “productor de ácidos”. Para Lavoisier, el que una sustancia fuera reconocida como ácido, es decir, que tuviera sus propiedades, implicaba que contenía al elemento oxígeno. Lavoisier clasificó a los no metales (C, N, P, S, Cl, entre otros) como aquellas sustancias que al quemarse y disolver el producto de la combustión en agua eran ácidos (y producía un color rojo con el tornasol), mientras que al quemar los metales, el *calx* resultante disuelto en agua era alcalino (y producía un color azul con el tornasol). Hay una importante y extendida tradición en Química que asigna determinada propiedad a una específica composición y el caso de los ácidos es de las más significativas. Es decir, el modelo de Lavoisier para los ácidos es composicionista. Además de la presencia del oxígeno era importante la cantidad del mismo y que debería quedar reflejada en el nombre del ácido, como lo hacemos actualmente; por ejemplo, en el caso del cloro: ácido hipocloroso (HClO), ácido cloroso (HClO<sub>2</sub>); ácido clórico (HClO<sub>3</sub>) y finalmente ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>). En sus propias palabras:

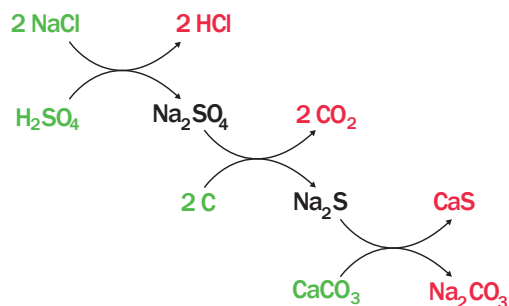
Muchos experimentos adicionales me permiten generalizar esta doctrina, y declarar que este aire puro y altamente respirable, es el principio constitutivo de la acidez; que este principio es común a todos los ácidos; y que la diferencia en la que se distinguen uno de otro se produce por la unión de uno o más principios además de este aire, a fin de constituir la forma particular en la cual aparece cada ácido... así he adoptado las siguientes posiciones:

2. que el principio acidificante combinado con el carbón forma el aire fijo.
3. que con azufre forma el ácido vitriólico
4. que con nitrógeno forma el ácido nítrico

# Industria y medio ambiente

## Carbonato de sodio

En 1775, la Academia Real de Ciencias de Francia ofreció un premio a quien desarrollara el más simple y económico proceso para producir carbonato de sodio (también conocido como ceniza de soda, barilla, natrón o sosa, que no sosa cáustica, que es otra sustancia) a partir de la sal común. El carbonato de sodio se utilizaba en la fabricación de jabón, vidrio, cerámicas, tintes y papel; la manera tradicional de obtenerlo, que databa de siglos, procedía del tratamiento de las cenizas vegetales. Como ya en ese momento la mayoría de los bosques europeos habían sido destruidos, quedaban pocas fuentes de abastecimiento, lo que encarecía el producto. Desde mediados del siglo XVII, la demanda de esta sustancia excedía con mucho la oferta de la misma. En 1791, en plena Revolución Francesa, el médico Nicolas LeBlanc patentó la solución que ya había anunciado años antes. No recibió el dinero del premio, pero construyó una fábrica con capacidad de producir 320 toneladas de carbonato de sodio al año. El proceso se representa a continuación y muestra de color verde los reactivos y de color rojo los productos:



Por cada 8 toneladas de carbonato de sodio producido se generaban 5.5 toneladas de cloruro de hidrógeno (que se arrojaba por las chimeneas, ya que en aquella época no tenía ninguna utilidad, y al combinarse con el agua de ríos y/o lagos cercanos producía ácido clorhídrico que alteraba drásticamente la producción de peces) y 7 toneladas de sulfuro de calcio en calidad de basura que se tiraba en los alrededores de las fábricas y que posteriormente en presencia de agua podía dar lugar a la generación del oloroso y tóxico sulfuro de hidrógeno.

Las zonas que rodeaban las fábricas se volvieron lugares insalubres en uno de los primeros ejemplos reportados de contaminación ambiental. Un documento contra ellas fechado en 1839 indica:

el gas de estas fábricas es de tal naturaleza nocivo, que deteriora todo lo que queda dentro de su influencia, y es por igual funesto para la salud y la propiedad. La hierba de los campos en sus alrededores se quemaron, los jardines no producen frutos, ni legumbres; [...] muchos árboles florecientes se han convertido últimamente en palos podridos y desnudos. El ganado y aves de corral decaen. Se empañan los muebles en nuestras casas, y cuando estamos expuestos a los gases, lo que ocurre frecuentemente, nos vemos afectados por tos y dolores en la cabeza... todo lo cual atribuimos a las fábricas de soda.



## 3.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron de la primera revolución química construyan una pregunta abierta y contéstela, empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

- Reconoce el contexto político-cultural de la primera revolución química identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la primera revolución química al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica las obras, los movimientos y/o corrientes artísticos y filosóficos a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.

### 2. Instrumentos

- (A). ¿Con qué precisión pesaba la balanza utilizada por Lavoisier? ¿Cómo se compara con las balanzas modernas?
- (A). Con la cuba hidroneumática se separaron gases, algunos de los cuales son solubles en agua. Averigua su solubilidad.
- (A). Explica la utilidad y el funcionamiento del eudiómetro, otro de los instrumentos diseñados en la primera revolución química.

### 3. Textos originales

- Que la composición de una sustancia sea reconocida a través de su nombre es una de las particularidades fundamentales de la Química. Lo anterior no sucede ni en Física ni en Biología. De hecho, podemos nombrar sustancias que no existen como por ejemplo el astaturo de francio o el  $N_4$ . Utilizando las reglas actuales de la Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), nombra al menos tres sustancias que no existan.
- ¿Cuántos átomos de Fe, colocados uno detrás de otro caben en 1 cm?
- ¿Qué conceptos de los utilizados por Lavoisier y Dalton ya no se aceptan actualmente por la comunidad química?

### 4. Experimentos

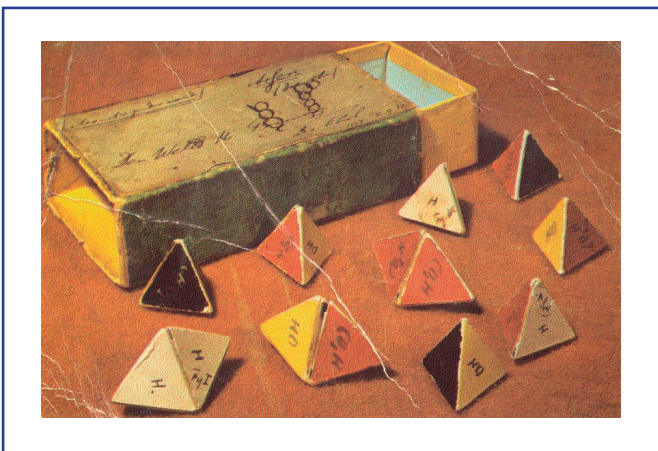
- ¿De qué estaba hecha la pila original de Volta?
- ¿Cómo funciona la pila voltaica?
- ¿La diferencia en el volumen de los gases recogidos permite identificar la fórmula mínima del agua? ¿Cómo?
- Las reacciones tradicionales para identificar hidrógeno y oxígeno con una astilla de madera, ¿podrían deberse a la reacción con otras sustancias? ¿Cuáles?
- ¿Qué sucede cuando la electrólisis se hace con agua destilada?
- ¿Por qué si se agrega sal al agua no se obtiene sodio y cloro?

### 5. Reacción química. Ácidos y bases

- Indica cuántas partes de cada una de las bases de la tabla de Fisher reaccionan con:
  - 1000 partes de ácido vitriolo.
  - 500 partes de ácido carbónico.
  - 100 partes de ácido nítrico.
- A partir del conocimiento actual, ¿cuáles son las limitaciones del modelo de Lavoisier?
- Identifica al menos otros dos casos donde la composición de una sustancia es suficiente para predecir sus propiedades.
- ¿Cuáles son los nombres que les dio Lavoisier a las calxs?



# 4 Segunda revolución (1828-1874)



Modelo de moléculas asimétricas conteniendo átomos de carbono tetraédrico de Vant' Hoff.

**ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ,**  
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti=50	Zr=90	?=180.	
		V=51	Nb=94	Ta=182.	
		Cr=52	Mo=96	W=186.	
		Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.	
		Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.	
		Ni=Co=59	Pd=106,6	Os=199.	
		Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.	
H=1					
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,3	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Д. Менделѣевъ

Tabla periódica de Mendeleiev de 1869.

## 4.1 Acontecimientos

La separación que hizo Berzelius de la Química en inorgánica y orgánica, como resultado de la síntesis de la urea realizada por F. Wholer, acompañada del modelo de los tipos de Gerhardt, la separación entre átomos y moléculas, consolidada por la aceptación de conceptos como isomería y valencia, y muchas otras novedades y dificultades químicas (como el uso del kaliapparat desarrollado por J. Liebig para la determinación de las fórmulas mínimas de las sustancias) se dieron cita en la fronteriza ciudad de Karlsruhe a principios de septiembre de 1860, en el Primer Congreso Internacional de Químicos. Convocado por tres reconocidas personalidades de la época –K. Weltzein, F. A. Kekulé y C. A. Wurtz– que ambicionaban, como Lavoisier, años atrás, reformar y perfeccionar el lenguaje de la Química. La carta a través de la cual convocaron a 127 personas, 56 provenientes de Alemania, 21 de Francia, 18 de Inglaterra, ocho de Rusia y Polonia, siete de Austria, seis de Suiza, dos de Italia y uno de España, Portugal y México es muy clara. En ella se puede leer que la razón de ser de esta reunión era lograr superar las profundas divergencias acerca de las palabras y los símbolos, que dañan la comunicación y la discusión, motores esenciales del progreso científico. Fracasaron en su intento original, pero salieron fortalecidos y compartiendo el paradigma que caracterizaría la segunda revolución.

La Química era una actividad pública europea que, posteriormente, perfeccionaría su lenguaje, a través de otros congresos y con la fundación de la IUPAC. Por otro lado y a partir de la participación de S. Cannizzaro en Karlsruhe, las moléculas quedaron claramente diferenciadas de los átomos y con D. I. Mendeleiev, otro asistente al evento, la valencia y los pesos atómicos ocuparon un lugar en su famosa tabla periódica.

En 1874, de manera independiente, el químico holandés J.H. Vant't Hoff y el francés J. Le Bel explicaron la isomería óptica a partir de la asimetría del átomo de carbono. Muchas de las dudas teóricas se disiparon, mientras que los avances industriales a partir del descubrimiento del colorante malva por W. H. Perkin se aceleraban, particularmente en Alemania. Por su parte, en Inglaterra, se publicó la *Alkali Act* para frenar las descargas del ácido clorhídrico en la atmósfera. Así la Química, originalmente Inorgánica, tenía una subdisciplina mayor que ella misma, la Química Orgánica, que también era y es industrial.

El modelo universitario alemán que relacionaba estrechamente la investigación “pura” con la “aplicada” fue copiado por otros países de Europa. Así, la segunda revolución es testigo del final del químico amateur, para dar paso al profesional. La Química fue la primera, entre todas las otras ciencias, en la que el trabajo experimental durante su enseñanza se volvió obligatorio. En ese momento, en muchos países de Europa se instala la educación obligatoria y las escuelas empiezan a ser construidas y gestionadas por los gobiernos locales. Probablemente, durante el siglo XIX la Química fue la ciencia más enseñada. Todo lo que se podía sintetizar y comercializar se hacía.

La respetable farmacéutica Bayer lo hacía, además de con la Aspirina, con la cocaína y la heroína. En Suecia, A. Nobel inventó la dinamita, cuyas controladas explosiones cambian la faz de la Tierra mientras que la espectroscopia desarrollada por R. Bunsen y G. Kirchoff permiten, años después, descubrir el elemento He en el Sol. Así, al finalizar la segunda revolución química, el paradigma resultante establece que las moléculas, como un conglomerado espacial atómico específico con propiedades particulares, son la entidad química por excelencia. La Química Orgánica surge como una subdisciplina.





La población humana alcanzó, en 1850, poco más de **mil 200 millones** de personas.

AÑO	HECHOS TECNOQUÍMICOS	HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES
1828	F. Wöhler, nacido en Eschersheim, hoy Alemania, sintetiza accidentalmente la urea, ello contribuye a que años después Berzelius acuñe el término isómero.	• Estalla la Guerra del opio entre Gran Bretaña y China (1840).
1837	J. Liebig nacido en Darmstadt, hoy Alemania, publica <i>Instructions for the analysis of organic bodies</i> donde explica el uso y funcionamiento del kaliapparat. Posteriormente, desarrolla la agroquímica.	• La Chemical Society of London, la primera de su tipo se estableció en 1841.
1846	En Boston, W. Morton inicia el uso del éter etílico como anestésico.	• Henry: motor eléctrico.
1848	El francés L. Pasteur separa isómeros ópticos y los caracteriza utilizando el polarímetro.	• Colt: revólver.
1851	El norteamericano Ch. Goodyear vulcaniza el hule.	• Morse: telégrafo.
1852	El inglés E. Frankland, resultado de sus investigaciones con compuestos organometálicos, acuña el término "poder de combinación" lo que más tarde sería la valencia.	• Heine describe por primera vez la poliomielitis.
1853	C. F. Gerhardt introduce el modelo de los tipos, desarrollado por él y A. Laurent, esto facilita entender las reacciones de sustitución, propias de la Química Orgánica.	• Joule enuncia la primera ley de la termodinámica donde se establece la conservación de la energía (1843).
1856	El inglés W. Perkin, a los 18 años, sintetiza accidentalmente el malva, un derivado de la anilina y con lo que se inicia la industria de los colorantes.	• Aparece el Manifiesto del Partido Comunista de Marx y Engels (1848).
1857	El sueco A. Nobel inventa, a partir de la nitroglicerina, la dinamita que, patentada diez años después, se utilizó en todo el mundo en la construcción de caminos y túneles, además de su empleo en la guerra.	• Nueva York: primer tranvía Barsanti-Matteucci: motor a explosión.
1859	R. Bunsen, nacido en Göttingen, y G. Kirchoff, nacido en Königsberg, ambos en la hoy Alemania, inventan el espectroscopio. Con este instrumento, años después, se descubriría el He en el Sol.	• Clausius establece el concepto de entropía.
1860	Se lleva a cabo la primera reunión de científicos de la historia en el Congreso de Karlsruhe, donde el profesor siciliano S. Cannizaro distribuye <i>Sketch of a Course of Chemical Philosophy</i> , en donde establece con precisión la diferencia entre átomos y moléculas.	• Darwin publica <i>El origen de las especies</i> y Rankine el primer texto de termodinámica (1859).
1863	En Londres, se publica la Alkali Act para frenar las descargas del ácido clorhídrico en la atmósfera y un año después, en Basilea, la Ley de fabricación de anilina que ante la contaminación de las fuentes de agua de la ciudad reglamenta su producción.	• Brun-Bourgeois: submarino.
1868	El profesor ruso D. Mendeleiev, asistente al Congreso de Karlsruhe, publica el libro de texto <i>Principles of Chemistry</i> en donde aparece y utiliza la tabla periódica.	• Mendel: leyes de la herencia.
1874	De manera independiente, el químico holandés J.H. Vant't Hoff y el francés J. Le Bel explicaron la isomería óptica considerando la asimetría del átomo de carbono en esos compuestos.	• Edison: fonógrafo y micrófono.
		• Maxwell y Boltzmann desarrollan la mecánica estadística.
		• Se inventa la bicicleta.
		• Guerra civil en Estados Unidos (1861).
		• Francia invade México.
		• Cézanne, Gauguin, Renoir y van Gogh, en la pintura; Verdi y Wagner, en la música, y Flaubert con Tolstoi, en la Literatura, marcan desde las artes la mitad del siglo XIX.

## 4.2 Instrumentos: Kaliapparat

Justus Liebig desarrolló la enseñanza experimental de la Química. En su laboratorio de Giessen, Alemania, Liebig estructuró el siguiente patrón de trabajo que finalmente es el que se utiliza hoy en, prácticamente, todo el mundo: sugería al estudiante un problema menor de una cuestión importante sobre la que él mismo trabajaba y que debería resolverse utilizando métodos y procedimientos experimentales que Liebig ya había desarrollado. Siguiendo un procedimiento original de Berzelius, inventó el kaliapparat un nuevo instrumento para el análisis químico. En vez de medir el volumen de gas, midió los cambios de peso de compuestos específicos.

La palabra alemana kaliapparat se refiere al instrumento que contiene:

- Una solución alcalina de potasa cáustica (hidróxido de potasio) colocada en un tubo triangular de vidrio con cinco bulbos para absorber dióxido de carbono, generado por la combustión de una muestra orgánica.
- Un tubo de vidrio que contiene cloruro de calcio fundido para absorber el agua, también generada por la combustión de la muestra orgánica.

Una vez absorbidos los gases, se cortaba el instrumento de vidrio en un lugar predeterminado y se pesaba su contenido. El incremento en la masa correspondía al  $\text{CO}_2$  y al  $\text{H}_2\text{O}$  generados en la combustión de la muestra orgánica.

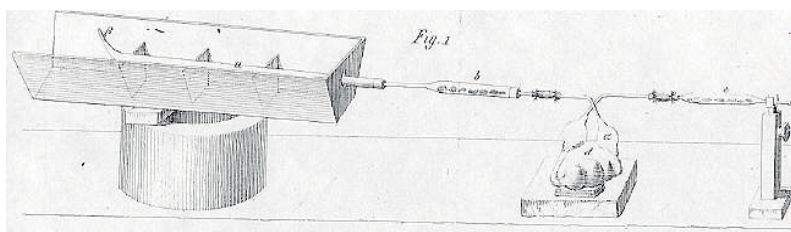


Figura 4.1. Ilustración del tren de combustión de Liebig, aparato que determinaba la composición del carbono e hidrógeno, la cual aparece en la publicación *Annalen der Physik und Chemie* (1831). Para ver un modelo en 360°, visitar la página [http://digital.libraries.uc.edu/oesper/museum/case10/shelf\\_o2/CA0010/index.php](http://digital.libraries.uc.edu/oesper/museum/case10/shelf_o2/CA0010/index.php)

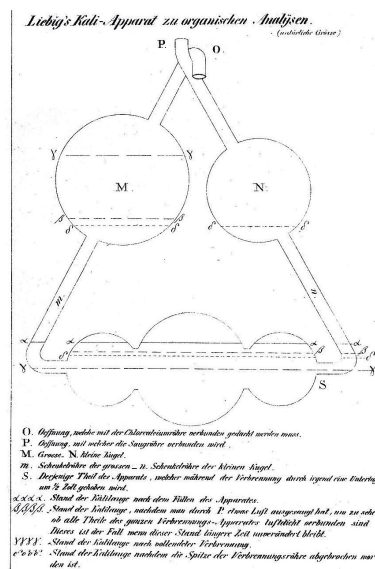


Figura 4.2. Esquema del Kaliapparat de Liebig.

Hay un acuerdo entre los historiadores de la Química del siglo XIX, que el uso rutinario de este instrumento hizo “posible en pocas horas análisis que hasta entonces habían tomado días y semanas”, permitió “a un gran número de jóvenes de talento moderado” hacer investigaciones significativas “y reducir los análisis a un trabajo casi rutinario de línea de montaje”. El propio Liebig argumentó la superioridad de su nuevo instrumento, en parte demostrando el gran número de análisis precisos que habían sido realizados por las manos poco expertas de sus estudiantes. En este momento el objetivo principal del análisis orgánico era establecer el número de átomos de cada elemento contenido en el compuesto analizado. Los estudiantes de Liebig podían publicar sus propios resultados en diferentes artículos de revistas, con resultados de análisis usando el kaliapparat.

En 1837, Liebig escribió el pequeño libro titulado *Instrucciones para el análisis de los cuerpos orgánicos*, en el que describió el uso de su instrumento ya utilizado entonces por casi toda la comunidad de químicos orgánicos:

Después de la publicación de esta monografía, cualquier persona con la mínima experiencia química podía construir los dispositivos y realizar las operaciones de las instrucciones detalladas fácilmente disponibles en las librerías. La superioridad esencial del método y sus detalles, ahora abiertamente accesibles, aseguraban que se podía emplear en cualquier lugar en que se hiciera la química.

Y así fue, desde entonces y durante muchos años el kaliapparat y las instrucciones de su uso aparecieron en multitud de libros de texto en diferentes idiomas. La American Chemical Society (ACS) reconoció su importancia incorporando una imagen de este instrumento en su logotipo, junto con la alquímica ave fénix.



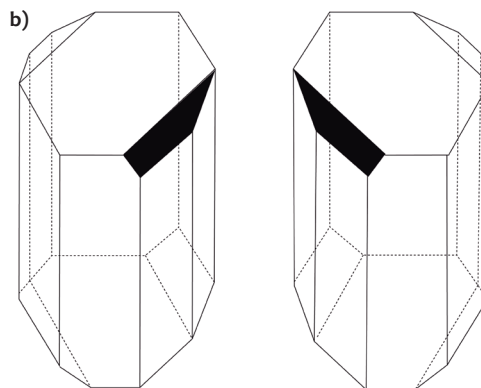
**Figura 4.3.** Fundada en 1876 y certificada por el congreso de Estados Unidos, la American Chemical Society cuenta con más de 150 mil miembros en más de 140 países.

# Polarímetro

La definición de isomerismo de Berzelius, en 1831, resolvió una larga serie de resultados experimentales inexplicables: los obtenidos de su propia investigación en dos óxidos de estaño diferentes y que tenían la misma composición, el aislamiento de Faraday del benceno y del acetileno, ambos con la misma fórmula mínima o la síntesis de urea a partir de cianato de amonio realizada por Whöler. La primera explicación de la isomería reconoció el diferente ordenamiento de los átomos en las moléculas, lo que significa distinta constitución, y se convirtió en un principio fundamental de la Química Orgánica. Más o menos durante el mismo periodo, Jean-Baptiste Biot formuló prácticamente todas las leyes básicas de la polarimetría.

Los polarímetros fueron uno de los primeros instrumentos utilizados para investigar las sustancias sin destruirlas. Consiste en una fuente de luz monocromática, un polarizador, una celda en la que se coloca la muestra, un segundo polarizador (analizador) y un detector de luz. El analizador está orientado a  $90^\circ$  con respecto al polarizador, de modo que no llega luz al detector. Con una larga historia de pequeñas mejoras que comenzaron en 1678, con la identificación de lo que Huygens llamó luz polarizada, pasando por el reconocimiento que hizo Biot, en 1815, que la polarización de la luz no sólo era producida por algunos cristales sino también por sustancias disueltas, fue hasta 1842 cuando se informó de polarímetros utilizando luz blanca y la combinación de dos prismas Nicol para proporcionar el polarizador y el analizador. El viejo Biot se mostró escéptico acerca de los resultados de quiralidad molecular del joven Pasteur y requirió ver los experimentos realizados por él mismo. Pasteur escribió lo siguiente:

Él (J.B. Biot) me mandó a repetir ante sus ojos los diversos experimentos. Me dio ácido racémico, que él mismo había examinado previamente y encontró que era bastante inactivo a la luz polarizada. En su presencia, preparé y separé (según su carácter cristalográfico) los cristales dextro y levo-rotatorios ante sus ojos, pidiéndome que precisara que los cristales que colocaría en su mano derecha causarían la desviación de la luz polarizada a la derecha, y los otros a la izquierda. Hecho esto, dijo que él mismo haría el resto. Preparó las soluciones cuidadosamente pesadas y, en el momento en que estaba a punto de examinarlas en el polarímetro, volvió a llamarme al laboratorio. En primer lugar puso la solución que debía de causar la rotación a la izquierda, en el instrumento. Sin hacer una lectura, pero ya a la primera vista de los tonos de color presentados por las dos mitades del campo en el sacarímetro Soleil, reconoció que había una fuerte levo-rotación. Entonces el ilustre anciano, visiblemente conmovido, me agarró de la mano y me dijo: "Mon cher enfant, j'ai tant aimé les sciences dans ma vie que cela me fait battre le coeur!" (Mi querido hijo, he amado tanto la ciencia a lo largo de mi vida que esto hace palpitar mi corazón).



**Figura 4.4.** a) Polarímetro de Biot en el que reconoció el descubrimiento de Pasteur de la isomería óptica en las sales del ácido racémico; b) ilustración de los cristales de ácido racémico que representa sus dos facetas asimétricas.

## 4.3 Textos originales

### *Bosquejo de un Curso de Filosofía Química (Fragmento)<sup>1</sup>*



Figura 4.5. Estanislao Cannizzaro (1826-1910).

Yo creo que el progreso de lo que ha creado la ciencia en los años recientes confirma la hipótesis de Avogadro, Ampère y Dumas acerca de la constitución similar de sustancias en estado gaseoso; esto es, volúmenes iguales de estas sustancias, ya sean simples o compuestas, contienen el mismo número de moléculas: no así el mismo número de átomos, ya que las moléculas de diferentes sustancias o de la misma sustancia en diferentes estados contienen un número distinto de átomos de la misma o diversa naturaleza.

Para convencer a mis estudiantes de lo que investigué, deseo colocarlos en el mismo campo al que yo llegué, el cual es la exploración histórica de las teorías químicas.

Yo comenzaré entonces en la primera lectura mostrándoles a partir de la evaluación de las propiedades físicas de los cuerpos gaseosos, de la ley de Gay-Lussac y la relación volumétrica entre componentes y compuestos; de ahí surge espontáneamente la hipótesis que mencioné anteriormente enunciada por Avogadro, y poco tiempo después por Ampère. Analizando la concepción de estos dos físicos, mostraré que lo que contiene no es contradictorio a los hechos conocidos. Probablemente, distinguirán moléculas de átomos sin confundir los términos de número y peso que antiguamente se comparaban con el criterio que sirve para deducir el peso después, para que finalmente haya reparado el prejuicio en sus mentes de que las moléculas consisten en números diferentes de átomos, cuando varias moléculas tienen un solo átomo o el mismo tipo de átomos.

En la segunda lectura me dedicaré a la tarea de investigar por qué las hipótesis de Avogadro y Ampère no fueron inmediatamente aceptadas por la mayoría de los químicos. Por consiguiente expondré el trabajo y las ideas de aquellos que examinaron las relaciones entre la cantidad de las sustancias que reaccionan sin considerar su volumen en el estado gaseoso. Después explicaré las ideas de Berzelius, bajo cuya influencia, la hipótesis arriba citada le pareció a los químicos fuera de armonía con los hechos.

Examiné el orden de las ideas de Berzelius y mostraré como desarrolló y completó la teoría dualística de Lavoisier con su propia hipótesis electroquímica que además fue influenciada por la teoría atómica de Dalton (la cual fue confirmada por los experimentos de Wollaston), él aplicó su teoría y la relacionó con la teoría electroquímica, al mismo tiempo extendió las leyes de Richter y las trató de armonizar con los resultados de Proust. Me queda claro que la razón de por qué asumió que los átomos eran cuerpos simples es

<sup>1</sup> Cannizzaro, 1910.



porque utilizó átomos de un compuesto de primer orden uniéndolos en proporciones simples y por qué no aceptó la hipótesis de Avogadro y Ampère, que en ambos casos hubiera sido la indicada.

Después mostraré cómo Berzelius, sin poder escapar de sus ideas dualísticas, y todavía deseando explicar las relaciones simples descubiertas por Gay-Lussac entre los volúmenes de compuestos gaseosos, formuló una hipótesis muy diferente a la de Avogadro y Ampère, nombrando que volúmenes iguales de sustancias simples en estado gaseoso contienen el mismo número de átomos, que en combinación permanecen intactos; después la densidad de vapor de varias sustancias simples fue determinada, él restringió que sólo las sustancias simples en estado gaseoso eran las que obedecían esta ley. No creía que los átomos compuestos mantenían el mismo orden en estado gaseoso a las mismas condiciones, él suponía que las moléculas de ácido hidrocórico, hidroiódico e hidrobromico, agua e hidrógeno sulfurado contenían la misma cantidad de hidrógeno, las diferencias entre estos compuestos confirma las deducciones de la hipótesis de Avogadro y Ampère.

Concluyo que esta lectura mostrará que hay que distinguir átomos de moléculas para reconciliar todos los resultados experimentales conocidos de Berzelius sin necesidad de asumir ninguna diferencia en la constitución entre permanente y coercible o entre gases simples y compuestos, en contradicción a las propiedades físicas de los fluidos elásticos.

En la tercera lectura hice una revisión de varias investigaciones de físicos en los cuerpos gaseosos y muestro las nuevas investigaciones desde Gay-Lussac hasta Clausius confirmando la hipótesis de Avogadro y Ampère que la distancia entre las moléculas es la mayor en el estado gaseoso, no depende de su naturaleza, ni de la masa, ni del número de átomos que contiene, sólo de la temperatura y la presión a la que están sujetas.

En la cuarta lectura realicé una revisión de las teorías de Berzelius, examinando cómo Dumas se inclinó a la idea de Ampère, químicos que se ocuparon en determinar los pesos moleculares de los compuestos. Entonces exponiendo en continuación de estos dos métodos distintos el de Berzelius y el de Ampère con Dumas, que utilizaron para determinar las fórmulas de compuestos en química inorgánica y orgánica (respectivamente) hasta Laurent y Gerhardt que reconciliaron ambas partes de la ciencia, explicando claramente cómo los descubrimientos de Gerhardt, Williamson, Hofmann, Wurtz, Berthelot, Frankland y otros en la constitución de los compuestos orgánicos confirman las hipótesis de Avogadro y Ampère, y cómo parte de la teoría de Gerhardt corresponde en varios hechos la conexión, pero no la extensión de la teoría de Ampère, cuya completa aplicación fue realizada por Dumas. Apuntaré al hecho, sin embargo, que Gerhardt no siempre siguió consistentemente la teoría que tan fértiles resultados le dio; ya que asumió que volúmenes iguales de gases contenían el mismo número de moléculas en la mayoría de los casos y no siempre.

Demostraré cómo limitado por un prejuicio, Berzelius frecuentemente distorsionaba los hechos. Ya que él no admitía que las moléculas de una sustancia simple se dividieran en un acto de combinación. Gerhardt supuso que todas las moléculas de las sustancias simples eran divisibles en reacciones químicas. Este prejuicio lo forzó a suponer que la molécula de mercurio y de todos los metales consistían en dos átomos como la de hidrógeno. Este error persistió en la mente de los químicos evitando que descubrieran la existencia de radicales diatómicos perfectamente análogos a los últimos que descubrió Wurtz en la química orgánica.

Con una exploración histórica de las teorías químicas y las investigaciones físicas concluyo que puede haber armonía en todas las ramas de la química aplicando las teorías de Avogadro y Ampère comparando los pesos y el número de moléculas. Y propongo mostrar las conclusiones derivadas de una invariable concordancia entre las leyes físicas y químicas descubiertas.

Presento en la quinta lectura los resultados obtenidos de aplicar las teorías de Avogadro y Ampère [...] para la determinación y diferenciación de átomos y moléculas además de utilizar los símbolos adecuados para representarlos.

	Símbolos de las moléculas de los elementos y fórmulas de los compuestos. Los símbolos y fórmulas representan los pesos de volúmenes iguales en estado gaseoso	Símbolos de los átomos de los elementos y su fórmula a partir de los compuestos creados con estos símbolos	Números que expresan sus pesos respectivos
Átomo de hidrógeno	$H\frac{1}{2} =$	H =	1
Molécula de hidrógeno	H =	$H^2 =$	2
Átomo de cloro	$Cl\frac{1}{2} =$	Cl =	35.5
Molécula de cloro	Cl =	$Cl^2 =$	71
Átomo de bromo	$Br\frac{1}{2} =$	Br =	80
Molécula de bromo	Br =	$Br^2 =$	160
Átomo de yodo	$I\frac{1}{2} =$	I =	127
Molécula de yodo	I =	$I_2 =$	254
Átomo de mercurio	Hg =	Hg =	200
Molécula de mercurio	Hg =	Hg =	200
" Ácido hidroclicóricu	$H\frac{1}{2} Cl\frac{1}{2} =$	HCl =	36.5
" Ácido hidrobromicóricu	$H\frac{1}{2} Br\frac{1}{2} =$	HBr =	81
" Ácido hidroyódicóricu	$H\frac{1}{2} I\frac{1}{2} =$	HI =	128
Mol. de protocloruro de mercurio	$HgCl\frac{1}{2} =$	HgCl =	235.5
" protobromuro de mercurio	$HgBr\frac{1}{2} =$	HgBr =	280
" protoyoduro de mercurio	$HgI\frac{1}{2} =$	HgI =	327
" bicloruro de mercurio	HgCl =	$HgCl^2 =$	271
" bibromuro de mercurio	HgBr =	$HgBr^2 =$	360
" binoyoduro de mercurio	HgI =	$HgI^2 =$	454

# Principios de química

## (Fragmento)<sup>2</sup>

Hace tiempo que se conocen numerosos pequeños grupos de elementos parecidos. Existen los análogos del oxígeno o del nitrógeno, o del carbono, y en lo que vamos a exponer a continuación encontraremos más ejemplos de estos grupos. Su conocimiento conduce irremediablemente a dos preguntas: ¿Cuál es la causa de esta semejanza? ¿Cómo se relacionan entre sí estos grupos? Mientras no podamos contestar estas preguntas, será fácil caer en error al tratar de caracterizar los diferentes grupos, porque el grado de semejanza es relativo y al compararlos no se aprecian ni exactitudes ni cambios abruptos. Por ejemplo, el litio es semejante en unos aspectos al potasio, pero en otros lo es al magnesio; el berilio es semejante al magnesio y también al aluminio. En el talio, como veremos posteriormente y como observaron sus descubridores, hay mucha semejanza con el mercurio y con el plomo, pero algunas de sus propiedades podrían pertenecer al litio y al potasio.

Por supuesto, ahí donde se puede realizar una medición exacta, por fuerza deben ponerse límites a la comparación, fundada como está en indicios seleccionados con arbitrariedad.

Sin embargo, los elementos presentan una propiedad que sí puede medirse con exactitudes: el peso atómico.

Esta magnitud nos sirve para medir la masa relativa de los átomos o, si se quiere evitar el uso del concepto “átomo”, es una magnitud que representa la relación entre las masas de los elementos constituyentes de una sustancia.

De acuerdo con los conocimientos que tenemos de los fenómenos naturales, la masa de una sustancia es la propiedad fundamental de la que deben depender las demás propiedades, porque todas las que conocemos son determinadas por las fuerzas que actúan definiendo el peso de un cuerpo, directamente proporcional a la masa de una sustancia.

Es urgente e inmediata la necesidad de buscar las causas de esa dependencia entre las propiedades semejantes de los elementos, por un lado, y su peso atómico por otro.

Esta idea fundamental obliga a colocar todos los elementos en orden creciente de su peso atómico; al hacerlo se advierte inmediatamente la repetición periódica de sus propiedades relacionadas con la magnitud del peso atómico. Ya conocemos ejemplos de este fenómeno:

F = 19	Cl = 35.5	I = 127
Na = 23	K = 39	Cs = 133
Mg = 24	Ca = 40	Ba = 137

En los grupos anteriores podemos observar claramente lo que decimos.

---

<sup>2</sup> Mendeleiev, 1990.



Figura 4.6. Dimitri I. Mendeleiev (1834-1907).

Los halógenos tienen pesos atómicos más bajos que los metales alcalinos y éstos, a su vez, menores que los metales alcalino-térreos.

Si extendemos la observación, llegaremos a la siguiente conclusión: si todos los elementos se ordenan en orden creciente de peso atómico, se manifiesta una repetición periódica de propiedades.

Sigue así la ley periódica o de la periodicidad: **las propiedades de los elementos, al igual que las formas y propiedades de los compuestos que originan, se hallan en dependencia periódica (son una función periódica) de la magnitud de sus pesos atómicos.**

A partir de esta ley se propone el sistema periódico de los elementos, que aparece en la página 63, en el que se aprecia la elevación del peso atómico desde el más ligero, 1, para el hidrógeno, hasta el más pesado, 240, que corresponde al uranio.

[...] En el sistema periódico cada elemento tiene un lugar en un grupo determinado, que se designa con un número romano, y en un renglón que se identifica con un número arábigo.

El lugar o casilla en el que se acomoda cada elemento se relaciona con su peso atómico y sus propiedades, semejantes a las del resto de los elementos del grupo, por ejemplo, la misma fórmula general de sus óxidos o de sus compuestos hidrogenados, e intermedias entre las de los dos elementos que tiene al lado en el mismo renglón.

Por ejemplo, si un elemento  $R_2$  forma parte del grupo R, integrado por los elementos

$R_1$
$R_2$
$R_3$

pero a la izquierda de  $R_2$  se encuentra  $Q_2$  y a su derecha  $T_2$ , de la siguiente manera

	$R_1$	
$Q_2$	$R_2$	$T_2$
	$R_3$	

las propiedades de  $R_2$  se deducen de las de  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $Q_2$  y  $T_2$ .

Por ejemplo, el peso atómico de  $R_2$  corresponderá al promedio de los valores de  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $Q_2$  y  $T_2$  y se determinará así:

$$R_2 = (R_1 + R_3 + Q_2 + T_2) / 4$$

Veamos el caso del selenio, Se, rodeado en la tabla de la siguiente manera:

	V	VI	VII
		S	
As		Se	Br
		Te	

Los pesos atómicos de los elementos que rodean al selenio son:

$$S = 32.1; Te = 127; As = 75.0; Br = 80$$

El peso atómico del selenio se encontrará haciendo la operación:

$$\text{Peso atómico Se} = (32.1 + 127 + 75 + 80) / 4$$

Lo que nos da un peso atómico de 78.5, muy cercano al calculado realmente que es de 79. Otras propiedades se pueden determinar de manera parecida. Supongamos que desconocemos las propiedades del Se, pero sabemos que el As a su izquierda forma el compuesto hidrogenado  $H_3As$ , y que el Br, a su derecha, forma  $HBr$ . ¿Qué fórmula intermedia nos queda para el compuesto hidrogenado que origine el Se? Evidentemente  $H_2Se$ .

De tal manera que surge la posibilidad de **pronosticar las propiedades de elementos aún desconocidos, cuando están rodeados de conocidos.**

периодическая система элементов по группамъ и рядамъ.

Ряды.	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ:											
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
0	х	—	—	—	—	—	—	—	—			
1	у	Водо- родъ. H 1,008	—	—	—	—	—	—	—			
2	Гелий. He 4,0	Литий. Li 7,03	Берил- лий. Be 9,1	Боръ. B 11,0	Угле- родъ. C 12,0	Азотъ. N 14,01	Кисло- родъ. O 16,00	Фторъ. F 19,0	—			
3	Неонъ. Ne 19,9	Натрий. Na 23,05	Магний. Mg 24,36	Алю- миний. Al 27,1	Крем- ний. Si 28,2	Фос- форъ. P 31,0	Сѣра. S 32,06	Хлоръ. Cl 35,45	—			
4	Аргонъ. Ar 38	Кальций. Ca 40,1	Кальций. Ca 40,1	Скандий. Sc 44,1	Титанъ. Ti 48,1	Ванадий. V 51,2	Хромъ. Cr 52,1	Марганецъ. Mn 55,0	Железо. Fe 55,9	Кобальтъ. Co 59	Никель. Ni 59	(Cu)
5	—	Мѣдь. Cu 63,6	Цинкъ. Zn 65,4	Галлий. Ga 70,0	Германий. Ge 72,5	Мышь- ьякъ. As 75	Селенъ. Se 79,2	Бромъ. Br 79,95	—	—	—	—
6	Криптонъ. Kr 81,8	Рубидий. Rb 85,5	Стронций. Sr 87,6	Иттрий. Y 89,0	Цирконий. Zr 90,6	Нобий. Nb 94,0	Молибденъ. Mo 96,0	—	Рутений. Ru 101,7	Родий. Rh 102,0	Палладий. Pd 106,5	(Ag)
7	—	Серебро. Ag 107,93	Кадмий. Cd 112,4	Индий. In 115,0	Олово. Sn 119,0	Сурьма. Sb 120,2	Теллуръ. Te 127	Йодъ. I 127	—	—	—	—
8	Ксенонъ. Xe 128	Цезий. Cs 132,9	Барий. Ba 137,4	Лантанъ. La 138,9	Церий. Ce 140,2	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	Иттрий. Yb 173	—	Танталъ. Ta 183	Вольфрамъ. W 184	—	Осмий. Os 191	Иридий. Ir 193	Платина. Pt 194,8	(Au)
11	—	Золото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,0	Талий. Tl 204,1	Свинецъ. Pb 206,9	Висмутъ. Bi 208,5	—	—	—	—	—	—
12	—	—	Радий. Ra 225	—	Торий. Th 232,5	—	Уранъ. U 238,5	—	—	—	—	—

Figura 4.7. Representación de la Tabla periódica original de Mendeleiev.



## 4.4 Experimentos

### Los colorantes sintéticos

Los colores tienen, entre las diversas sociedades humanas, una gran importancia simbólica. Por ejemplo, para los mayas, cada uno de los cuatro puntos cardinales se asociaba a un color: el norte era negro; el sur, amarillo; el rojo se vinculaba con el oriente y el blanco con el poniente. Los colores de las ropas reflejaban también parte de esta cosmovisión.



#### Materiales y sustancias sugeridos

- Un vaso de precipitados de 500 mL
- Un embudo
- Un tubo de ensayo con capacidad superior a 25 ml
- Una varilla de vidrio
- Papel filtro
- Sulfato de anilina (sulfato de fenilamonio)
- Dos matraces Erlenmeyer de 250 mL
- Un pequeño trozo de seda o tela
- Toallas de papel o papel absorbente
- Dicromato del potasio
- 25 mL de etanol

#### Un procedimiento posible

1. Disolver aproximadamente una pequeña cucharada del sulfato de anilina en 100 mL de agua, después agregar unos cuantos cristales de dicromato de potasio.
2. Calentar la disolución hasta que aparezca un precipitado color negro.
3. Filtrar el precipitado negro y lavarlo con agua caliente.
4. Pasar el precipitado al tubo de ensayo que contiene los 25 mL de etanol.
5. Introducir el tubo de ensayo al vaso de precipitados y calentar a baño María con agua y raspar las paredes del tubo con ayuda de la varilla de vidrio, agitando muy bien.

#### No calentar con una flama ya que se van a producir vapores de etanol

6. Filtrar en un matraz Erlenmeyer de nuevo, pero en este momento, la solución filtrada debe tener un color morado oscuro.
7. Agregar piezas de tela, incluyendo la seda, a la solución del colorante. Calentar la solución en el baño María durante varios minutos, retirar la tela, lavarla y dejar secar.

## El nacimiento de la espectroscopia

Desde los antiguos estudios realizados por los alquimistas se sabía que si una pequeña muestra de alguna sustancia, regularmente sales minerales, se sometían al calor de una flama, se podía observar un color distintivo para cada sustancia; sin embargo, existía cierta incertidumbre para clasificar las sustancias por los colores que emitían, pues las flamas que utilizaban para la ignición de las sales tenían color propio, y muchas veces no se podían hacer las debidas distinciones.

Fue hasta que Robert Bunsen inventó un mechero de gas con el que fue capaz de controlar las proporciones de oxígeno y su combustión, que se logró obtener una flama casi incolora donde se pudieran realizar las pruebas con mayor precisión.

Durante este periodo de tiempo ya se habían realizado algunos experimentos de difracción de la luz: William Hyde Wollaston, en 1802, y Josef Fraunhofer, en 1812, con ayuda de unos lentes especiales que magnificaban la luz del sol, observaron más allá del espectro visible que había descrito Isaac Newton en 1666, observaron unas líneas negras a las cuales no podían darles ninguna explicación.

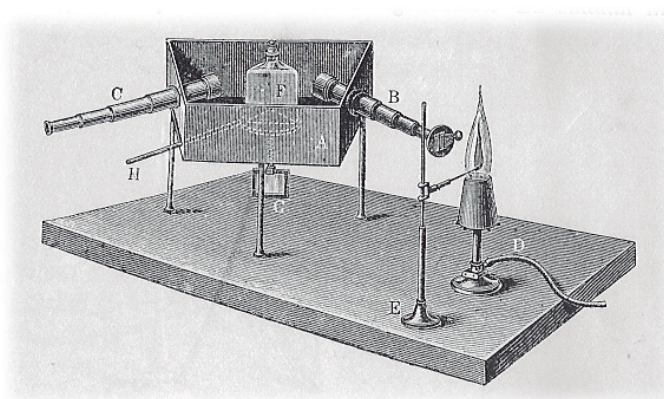


Figura 4.9. El espectrómetro de Bunsen-Kirchhoff.

Esta incertidumbre fue resuelta cuando Robert Bunsen y Gustav Kirchhoff, al trabajar con un espectrómetro fabricado por ellos, y repetir los experimentos de coloración a la llama de Bunsen, se dieron cuenta que algunas de estas líneas eran idénticas a las observadas en los rayos de luz, y dedujeron que las líneas negras eran las huellas digitales de los elementos químicos, encontrando por este método, dos nuevos elementos: el cesio y el rubidio.

### Materiales y sustancias sugeridos

- Mechero de Bunsen
- Alambre de platino o nicromio
- Vidrios de reloj
- Vidrio de cobalto
- Sales de metales (nitratos o cloruros): sodio, potasio, calcio, bario, litio, cobre, estroncio
- Ácido clorhídrico concentrado

### Un procedimiento posible

1. Mezclar un poco de una de las sales de metales con HCl en el vidrio de reloj.
2. Humedecer un extremo del alambre de platino en la disolución y colocarla en la llama del mechero Bunsen.
3. Observar el color a simple vista y filtrado con un vidrio de cobalto.
4. Repetir con otra sal después de limpiar el alambre de platino introduciéndolo en HCl.

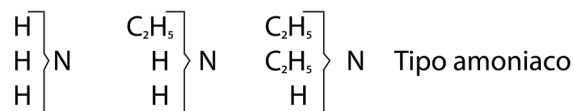
## 4.5 La reacción química. Ácidos y bases

El químico J. B. A. Dumas preparó el ácido tricloroacético ( $\text{CCl}_3\text{CO}_2\text{H}$ ) a partir del ácido acético (el principal constituyente del vinagre, de fórmula  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ ). Esta sustancia, como había indicado Lavoisier, contenía oxígeno aunque, como también se había demostrado poco después de su muerte en la guillotina, el ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) era una sustancia ácida que no contenía oxígeno, empezándose a cuestionar ya desde entonces el origen composicionista de la acidez. El ácido tricloroacético era una sustancia ácida prácticamente igual en sus propiedades que el ácido acético y lo que muchos químicos de la época no podían aceptar era que tres átomos positivos de hidrógeno del ácido acético se pudieran sustituir por tres negativos de cloro sin que las propiedades de la sustancia cambiaran de manera significativa. Dumas no se enfrentó a Berzelius ni cuestionó su modelo electroquímico del enlace, simplemente indicó:

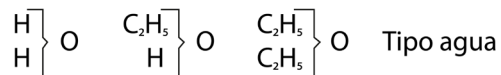
Por el momento y por la transformación del ácido acético en ácido cloroacético, o del acetaldehído ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) en cloral ( $\text{Cl}_3\text{CHO}$ ); por el hecho de que el hidrógeno de estos cuerpos es reemplazado por el cloro, volumen por volumen, sin alterar su naturaleza original, nosotros debemos concluir que existen en la química orgánica ciertos TIPOS que permanecen como tales, inclusive después de reemplazar su hidrógeno por volúmenes iguales de cloro, bromo o yodo; es decir, la teoría (modelo) de sustitución se basa en hechos, en los más sorprendentes hechos de la química orgánica.

A partir de las reacciones y del comportamiento encontrado en las sustancias orgánicas, Dumas insistió en que cada sustancia era un todo y que no podía concebirse constituida por dos partes, como lo indicaba Berzelius. Defendió que el carácter químico dependía principalmente del arreglo espacial y número de átomos en lugar de su naturaleza. Paradójicamente fue Berzelius el que acuñó el término isomería y que resultaría fundamental en el entendimiento de la Química orgánica.

De acuerdo con el modelo de los tipos, basado en la idea de la sustitución, las sustancias orgánicas podían sistematizarse de acuerdo con sus reacciones características. Por ejemplo, todas las aminas obtenidas al tratar con amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) varios derivados halogenados fueron incluidas en el tipo “amoníaco”, pues uno o más hidrógenos del amoníaco son sustituidos por radicales (es decir, grupos de átomos que se mantienen unidos a lo largo de diferentes reacciones; por ejemplo, el metilo  $\text{CH}_3$ , etilo  $\text{C}_2\text{H}_5$ , fenilo  $\text{C}_6\text{H}_5$ , etc.):



De la misma manera sucede con el tipo “agua”, en el que la sustitución de un hidrógeno da lugar a un alcohol y la sustitución del segundo a un éter:



Además de estos dos tipos, se identificaron dos más: el tipo “hidrógeno” y el tipo “ácido clorhídrico”. Al sustituir el hidrógeno del tipo “ácido clorhídrico” con un metal o una base se obtenía una sal. El modelo de los tipos distinguía así diferentes partes de una molécula, y proponía que la sustitución del hidrógeno en el tipo ácido era la que daba lugar a las sales.

## Industria y medio ambiente

# Los colorantes

Los colorantes, particularmente los utilizados en los tejidos, tienen una larga tradición. Se usaban en China hace más de 4mil años, para teñir lana en Roma, algodón en la India, o el lino que cubría a las momias en Egipto. Los colorantes se extraían de plantas y animales: de las flores de azafrán (amarillo); de las hojas del índigo (azul); del insecto femenino conocido como cochinilla (grana-rojo); del caracol *Murex* (rojo-púrpura); de la corteza de los árboles de Brasil o de Campeche (rojo). En el siglo XVIII con la Revolución Industrial y la incorporación de telares mecánicos la producción de telas creció notablemente y el teñido de los tejidos se volvió una importante industria adquiriendo un lugar central en 1856, con la síntesis del primer colorante sintético, el malva realizada por el joven inglés W. Perkin. Discípulo en el Royal College of Science del profesor alemán A.W. Hofmann, (experto entonces en los productos derivados del alquitrán) en su fallido intento de sintetizar quinina, Perkin a sus 17 años empezó a cambiar los colores con los que se reconocían las sociedades humanas.

Obtenida en el laboratorio de su casa a partir de la anilina, envió el malva a un tintorero para que lo probara con diversos tejidos y, ante los buenos resultados obtenidos, dejó el colegio, patentó la reacción de síntesis y con la ayuda de su padre empezó su producción industrial.

El éxito fue tan grande que casi inmediatamente la técnica fue copiada en Inglaterra y en Francia y poco más tarde en Alemania. En todos estos países se empezó a experimentar en síntesis similares a partir de la destilación del alquitrán de hulla, obteniéndose diferentes colorantes (fucsina o magenta, negro de anilina, alizarina, azoicos, etc.) que patentados dieron lugar a importantes industrias químicas como La Fuchsine en Francia, la Badische Anilin & Soda Fabrik (BASF) en Alemania y la Imperial Chemical Industries (ICI) en Inglaterra. Muy pronto, los colorantes sintéticos resultaron más baratos que los naturales, desplazándolos prácticamente en todo el mundo. La industria del alquitrán, es decir, la Química Orgánica industrial, se desarrolló tanto que 50 años después una de las varias industrias químicas, la Bayer en Alemania, tenía 8 mil empleados, 300 de los cuales eran químicos con estudios universitarios. A partir de la segunda revolución, estudiar Química se volvió una profesión rentable y respetable.

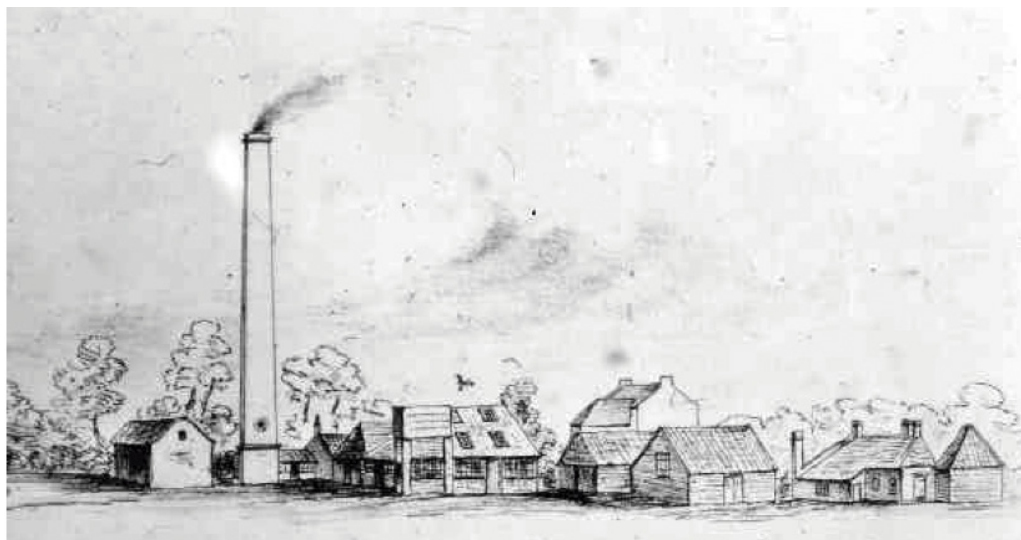


Figura 4.10. Primera fábrica de Perkin en Londres (1858).

## 4.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron de la segunda revolución química construyan una pregunta abierta y contéstenla, empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

- Reconoce el contexto político-cultural del desarrollo de la segunda revolución, identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la segunda revolución química al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica las obras, los movimientos y/o corrientes artísticas y filosóficas a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.
- Consulta en la colección de videos *Cumbres de la ciencia y la técnica*, cada uno con duración de 15 minutos, el video número 86 sobre A. Nobel, cuyo descubrimiento de la dinamita cambió la faz de la Tierra (<https://www.youtube.com/watch?v=k3rwljrrTpo>) y construye tres preguntas abiertas sobre el mismo.

### 2. Instrumentos

- (A). Una muestra de 10.40 mg de ácido ascórbico (vitamina C) que contiene C, H y O se coloca en un kaliapparat. Después de hacer las manipulaciones necesarias se recupera 4.2 mg de agua y 7.9 ml de CO<sub>2</sub> (a condiciones normales de presión y temperatura). Se supone que el carbono del ácido se convirtió en CO<sub>2</sub> y todo el hidrógeno en agua. ¿Cuál es la fórmula mínima del ácido ascórbico?
- (D). ¿Cuál es el cloroalcano de masa molecular más baja que puede ser ópticamente activo?
- (D). ¿Cómo se puede distinguir entre una disolución de una sustancia ópticamente inactiva y una cuya rotación del plano de la luz polarizada sea de 360°?



### 3. Textos originales

- (A). En 1808, J. Gay Lussac estableció el hecho de que el hidrógeno y el oxígeno formaban agua en la relación volumétrica 2 a 1. Es decir, a las mismas condiciones de presión y temperatura se obtenían dos volúmenes de agua a partir de dos volúmenes de hidrógeno y uno de oxígeno. ¿De qué manera este hecho se opone al modelo atómico de Dalton?
- (A-D). Compara los valores de los pesos reportados por Cannizzaro, para átomos y moléculas en su *Sketch of a Course of Chemical Philosophy* y los que usamos hoy en día.
- (D). Utilizando el procedimiento descrito por Mendeleiev calcula las siguientes propiedades del entonces aún desconocido ekasilicio y compáralas con las del hoy conocido germanio:
  - o el peso atómico
  - o el punto de ebullición de su cloruro
  - o volumen atómico

### 4. Experimentos

- ¿A qué se llama serendipia?
- ¿Por qué el color de un colorante puede cambiar en diferentes tejidos?
- Identifica y explica si el experimento ejemplifica a la Historia Natural, al Análisis o a la Síntesis.
- Con la información obtenida podrás completar la siguiente tabla.

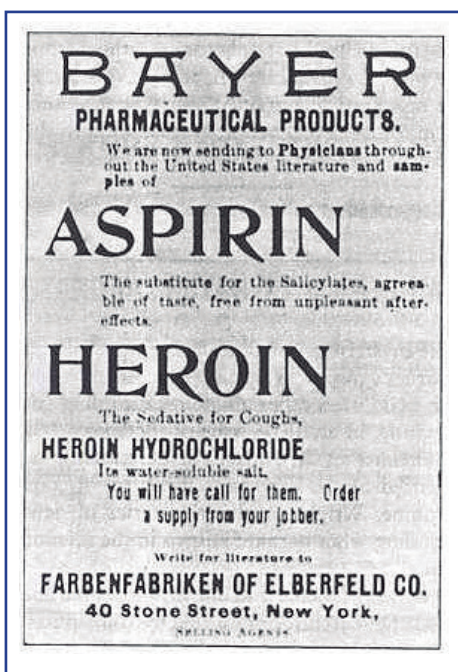
Nombre de la sustancia	Fórmula	Color de la llama	Metal que produce el color	Longitud de onda del color

- ¿Por qué algunas sustancias al calentarse emiten luz y otras se queman o se funden?
- ¿Por qué la luz que emiten las sales metálicas al calentarse es específica de los elementos?

### 5. Ácidos y bases

1. (D). Clasifica las siguientes sustancias de acuerdo con el modelo de los tipos:
  - a. Trietilamina
  - b. Ácido acético
  - c. Butano
  - d. Anhídrido acético
2. (A). Investiga las semejanzas y diferencias que hay entre el ácido acético y el tricloro acético.
3. (D). A. Kekulé es reconocido en la historia, además de por lo que se ha discutido aquí, por proponer una estructura satisfactoria, en aquellos momentos, para el benceno cuya fórmula mínima es  $C_6H_6$ . Dibuja al menos ocho isómeros de esta sustancia, es decir, otras tantas sustancias.

# 5 Tercera revolución (1887-1923)



Anuncio de la compañía farmacéutica alemana Bayer ofertando dos de sus productos emblemáticos: la aspirina y la heroína (tomada del sitio web de The Herb Museum, Vancouver, Canadá).



El uso masivo de fertilizantes de origen sintético son el origen de los alimentos que desde entonces consumimos la mitad de la población humana.



Logotipo de la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) institución que junto con las norteamericanas Food and Drug Administration (FDA) y la Chemical Abstract (CA) "ordenaron" las actividades químicas en todo el mundo.

## 5.1 Acontecimientos

El periodo entre la segunda y tercera revolución química, es decir, de “ciencia normal” ha sido considerado como la “época de oro de la Química”. La materia estaba compuesta de átomos (con valencia) y moléculas, que clasificados periódicamente como elementos, permitían predecir su comportamiento, lo que facilitaba copiar moléculas que se encontraban en plantas y animales, para luego sintetizar moléculas completamente nuevas. Las sociedades europeas, primero, y a continuación las del resto del mundo, fueron inundadas con nuevos colorantes materiales y medicamentos provenientes de las poderosas industrias químicas alemanas. En este país, el número de universidades con institutos y departamentos de Química, con sus respectivos profesores, investigadores y alumnos creció de manera considerable, quienes poco a poco empezaron a cambiar sus actividades, siendo una de las más importantes el dejar (fundamentalmente) de pesar, por medir. La Físicoquímica estaba en camino y sus principales protagonistas serían ganadores de los recién instituidos Premios Nobel: J. van't Hoff, W. Ostwald y S. Arrhenius.

El reconocimiento de que los átomos podían dividirse, derivado del descubrimiento de los electrones y la radiactividad, caracterizó en buena medida la tercera revolución química. Con la espectroscopia y los rayos X, la radiación electromagnética ocupó un lugar importante en el pensamiento químico, cada vez más influenciado por los avances que se estaban dando en la Física. Era claro que debajo de la omnipresente materialidad de las sustancias, hasta entonces terreno prácticamente privado de los químicos, había una realidad a la que sólo bajo las técnicas que iban desarrollando los físicos podía accederse.

Por otro lado, contrastando con la facilidad para comercializar cualquier sustancia como se hacía durante la segunda revolución química y que en la tercera revolución química ejemplifica muy bien la venta de jarabe para la tos de heroína comercializado por Bayer (un año después de lanzar al mercado farmacéutico la Aspirina), en Estados Unidos se establece la *Food and Drug Administration* con la preocupación de controlar el mercado de alimentos y medicamentos locales y que, posteriormente, se volverá mundial.

Una figura central en esta revolución es el norteamericano G.N. Lewis. Sus aportaciones a la Físicoquímica y su propuesta de un modelo atómico basado en la Química marcan el desplazamiento del desarrollo profesional e industrial de la vieja *chimica* alejandrina y africana, con su paso por Europa, al nuevo continente americano.

La Primera Guerra Mundial, en la que ya participa de manera decidida Estados Unidos, refrenda que la geopolítica mundial estaba cambiando. Aunque el oficial alemán F. Haber (quien desarrolló el proceso científico más importante en la historia de la humanidad) perdió la guerra, ganó el más controvertido Premio Nobel al final de la contienda, en 1918. El modelo atómico de Lewis, generalizado posteriormente por I. Langmuir, se enfrentaba al físicocuántico europeo. Ambos productos de su época, con el primero se explicaba la Química, con el segundo, la espectroscopia. El mismo Langmuir lo indica claramente:

El problema de la estructura de los átomos ha sido estudiado principalmente por los físicos, quienes consideran de manera muy pobre las propiedades químicas, las que en última instancia deben ser explicadas por una teoría de la estructura atómica. La gran cantidad de conocimientos que sobre las propiedades químicas se tiene y las relaciones como las que resume la tabla periódica deben emplearse como un mayor fundamento para la estructura atómica que los relativamente escasos datos experimentales obtenidos únicamente con ideas físicas.

Separando, en el quehacer científico, los contextos de descubrimiento de los de justificación y avalando sólo este último, la ciencia pasó a ser, en el imaginario colectivo de muchos de sus practicantes, una parte de la Física. A pesar de sus enormes éxitos en la construcción de nuevas sustancias, la Química se percibía como una disciplina desordenada, poco rigurosa, impura y la frase del Premio Nobel de Química E. Rutherford, resumiendo el espíritu de su tiempo, resultó contundente: “la ciencia se divide en dos categorías, física y filatelia”. Finalmente, F.W. Aston, ayudante de Thomson, inventó el espectrómetro de masas, instrumento a través del cual descubre multitud de isótopos. Así, la tercera revolución química proclama que los átomos y las moléculas están conformados por electrones y núcleos. Estas dos nuevas entidades se consideran fundamentales en la explicación del enlace químico. La Físicoquímica se ha convertido en una nueva subdisciplina.



La población mundial alcanzó, en el año **1900**, los **mil 650 millones** de personas, con una esperanza de vida aproximada de 55 años.

AÑO	HECHOS TECNOQUÍMICOS	HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES
1887	W. Ostwald y J. van't Hoff fundan, la aún hoy existente, <i>Zeitschrift für Physikalische Chemie</i> la primera revista de Físicoquímica. Entre sus colaboradores se encuentra además S. Arrhenius. Los tres se hicieron merecedores de distintos premios <i>Nobel</i> de Química.	• El viaje, en tren, entre Manchester y Londres tarda cuatro horas.
1891	El suizo A. Werner desarrolla su modelo de "compuestos moleculares" lo que hoy conocemos como Química de coordinación, un nuevo campo de la Química Inorgánica en el que también está presente la isomería óptica.	• El siglo XX inicia con el postulado de la discontinuidad de la energía y el nacimiento de la mecánica cuántica y la relatividad, resultado de las investigaciones realizadas principalmente por M. Planck y A. Einstein. Por su parte, S. Freud publica <i>La interpretación de los sueños</i> en donde introduce el concepto del inconsciente y C.S. Pierce y W. James desarrollan la corriente filosófica americana más influyente, el pragmatismo. La primera olimpiada de la era moderna se celebra en Atenas en 1896.
1897	En Cambridge, J. J. Thomson descubre los electrones.	
1898	P. y M. Curie descubren, a través de la cristalización fraccionada del mineral pechblenda, dos nuevos elementos radiactivos: el radio y el polonio.	
1899	La compañía farmacéutica alemana Bayer empieza a comercializar la Aspirina y produce una tonelada de heroína anualmente que comercializa en 23 países.	
1900	El químico norteamericano M. Gomberg anuncia el aislamiento del primer radical libre conocido, el trifenilmetilo.	• H. Becquerel, P. y M. Curie reciben el Premio <i>Nobel</i> de Física por su descubrimiento de la radiactividad en 1903, mismo año en que los hermanos Wright realizan el primer vuelo en avión, en Estados Unidos, a una velocidad de 11 km/h.
1903	El sueco S. Arrhenius recibe el Premio <i>Nobel</i> de Química por sus investigaciones en la disociación electrolítica.	• Inicia la Revolución Mexicana.
1904	Se le otorga el Premio <i>Nobel</i> de Química al inglés W. Ramsay por su descubrimiento de los gases inertes, hoy llamados nobles.	• En 1913, M. Planck enuncia la tercera ley de la termodinámica.
1906	Se establece en Estados Unidos la Food and Drug Administration encargada originalmente de verificar la pureza de los alimentos y medicamentos consumidos en ese país. También allí se funda el <i>Chemical Abstract</i> , que en su primer año resume poco menos de 12 mil textos y cuyo primer número aparece en enero de 1907.	• En 1914, se inaugura el Canal de Panamá, el mismo año que inicia la Primera Guerra Mundial.
1908	El neozelandés E. Rutherford obtiene el Premio <i>Nobel</i> de Química por sus investigaciones en la Química de las sustancias radiactivas, entre ellas la transmutación del nitrógeno en oxígeno.	• Se entregan dos premios <i>Nobel</i> de Física sucesivos al estudio de los cristales por difracción de rayos X. El primero a M. v Laue y el segundo a W.H. Bragg y W.L. Bragg, padre e hijo (1914-1915).
1909	El letón-alemán W. Ostwald recibe el Premio <i>Nobel</i> de Química por sus investigaciones sobre la velocidad y el equilibrio de las reacciones químicas.	
1916	El francés J. Perrin publica el libro <i>Atoms</i> , donde demuestra de manera experimental e inequívoca la existencia de estas partículas.	

**AÑO** **HECHOS TECNOQUÍMICOS**

**1918** El más controvertido Premio Nobel se le entrega al alemán F. Haber por la síntesis de amoníaco a partir de sus elementos.

**1919** Se funda la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), organismo integrado por académicos e industriales, encargado de establecer normas generales y comunes para el lenguaje químico.

**1920** El alemán W. H. Nernst recibe el Premio Nobel por su trabajo en Termoquímica. Con ello la Físicoquímica moderna queda establecida.

**1922** El inglés F. W. Aston recibe el Premio Nobel de Química por su descubrimiento utilizando el espectrómetro de masas de una gran cantidad de isótopos.

**1923** El norteamericano G. N. Lewis publica Valence and the Structure of Atoms and Molecules y con M. Randall, Thermodynamics and the Free Energies of Chemical Substances, mientras que J. J. Thomson, The electron in chemistry.

**HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES**

• Con V. Lenin a la cabeza inicia la Revolución Rusa.

• B. Mussolini y, posteriormente, A. Hitler inician los movimientos fascista y nazi.

• El norteamericano R.A. Millikan recibe, en 1923, el premio Nobel de Física por su determinación de la carga eléctrica del electrón.

• Kafka, Proust, Mann y Pirandello

• Gershwin y Stravinsky

• Kandinsky, Picasso, Modigliani

• Escuela del Bauhaus



## 5.2 Instrumentos: Tubo de rayos catódicos

Aunque los estudios electrolíticos y de ionización durante el siglo XIX habían proporcionado pruebas suficientes de la existencia de átomos, moléculas o iones cargados eléctricamente, no se demostró que la carga pudiera ser independiente de esas entidades. A fines del siglo, las investigaciones del químico y físico W. Crookes sobre la conducción eléctrica de los gases rarificados, seguidos de la investigación de E. Goldstein y J.J. Thomson, dan la respuesta.

El tubo de Crookes consiste en un recipiente de vidrio parcialmente evacuado, con dos electrodos metálicos, el ánodo y el cátodo, uno en cada extremo. Cuando se aplica un alto voltaje entre los electrodos, una radiación con masa (rayos catódicos) se desplaza en línea recta desde el cátodo hasta el ánodo, lo que sugiere su carácter de carga negativa.

En 1886, Goldstein identificó otro tipo de radiación, que llamó “rayos canal”, compuesto por partículas cargadas positivamente. Los “rayos canal” produjeron una descarga lumínica y su color cambió de acuerdo con la naturaleza del gas que permanece en el tubo. En ese momento había una controversia sobre la naturaleza de los rayos catódicos (los físicos alemanes apoyaban la teoría del éter para su origen, mientras que los británicos defendían su naturaleza de partículas); pero fue el descubrimiento de los rayos X, en 1895, lo que provocó el interés de Thomson en los rayos catódicos. Dirigió una serie de experimentos, publicados extensamente en 1897, que le ganaron el reconocimiento como el descubridor del electrón. Sin embargo, otros científicos proclamaron ese honor (P. Lenard, P. Zeeman y W. Crookes). Los historiadores coinciden en que para identificar a alguien como el autor de un descubrimiento se requiere:

- Que lo que se descubre exista.
- Un cierto conocimiento del descubridor de lo que está descubriendo.
- El reconocimiento social del descubrimiento.

El criterio anterior indica a Thomson como el descubridor del electrón utilizando un tubo de rayos catódicos como instrumento. Él escogió originalmente la palabra corpúsculo para referirse al portador material de la carga eléctrica negativa que constituye los rayos catódicos, pero años después utilizó el nombre electrón (introducido por G.J. Stoney dos décadas antes). Thomson señaló un aspecto fundamental de sus experimentos; es decir, que los rayos catódicos son los mismos cualquiera que sea el gas a través del cual pasa la descarga, concluyendo que los rayos catódicos son cargas de electricidad negativas portadas por partículas materiales.

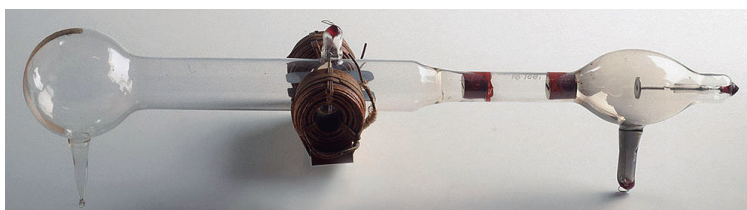


Figura 5.1. Uno de los tubos con los que J. J. Thomson midió la relación masa/carga del corpúsculo, más tarde, llamado electrón.

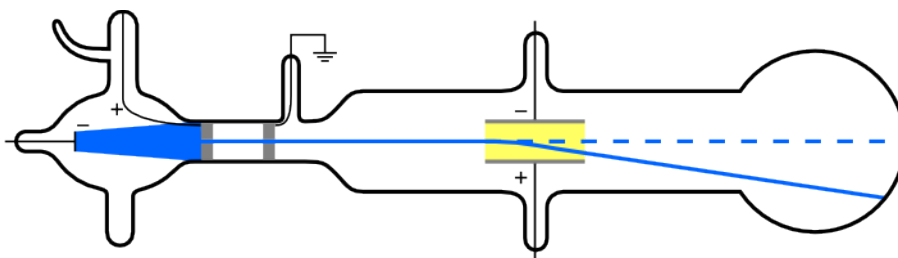


Figura 5.2. Una vista esquemática del instrumento. Los rayos catódicos se emiten en el cátodo. Viajan en línea recta, golpeando la pared de cristal y produciendo un punto de luz. Sin embargo, a través de un campo eléctrico se desvían, entonces se puede medir la relación masa/carga del electrón.

# Espectrógrafo de masas

Después de la Primera Guerra Mundial, el asistente de Thomson, F. Aston, siguiendo la investigación inicial hecha por Goldstein y Thomson en “rayos canal” construyó el instrumento conocido como espectrógrafo de masas. Como ya se indicó, los “rayos canal” positivos producen una descarga luminosa cuyo color cambia de acuerdo con la naturaleza del gas que permanece en el tubo. Las investigaciones de Aston con neón le permitieron identificar que este elemento estaba compuesto por dos isótopos, uno de masa 20 con una abundancia de casi el 90% y otro de masa 22 con una abundancia del 10%. Con esta investigación, realizada en su nuevo instrumento, amplió el concepto de isótopos de Soddy a elementos estables. Aston mejoró notablemente el tubo de rayos catódicos y, seguramente, lo más importante fue que descubrió un método de “enfoco” del haz de iones pasándolo a través de campos eléctricos y magnéticos sucesivos. Con sus mejoras se pueden separar iones con relaciones  $e/m$  que difieren en una sola parte en 130 partes.

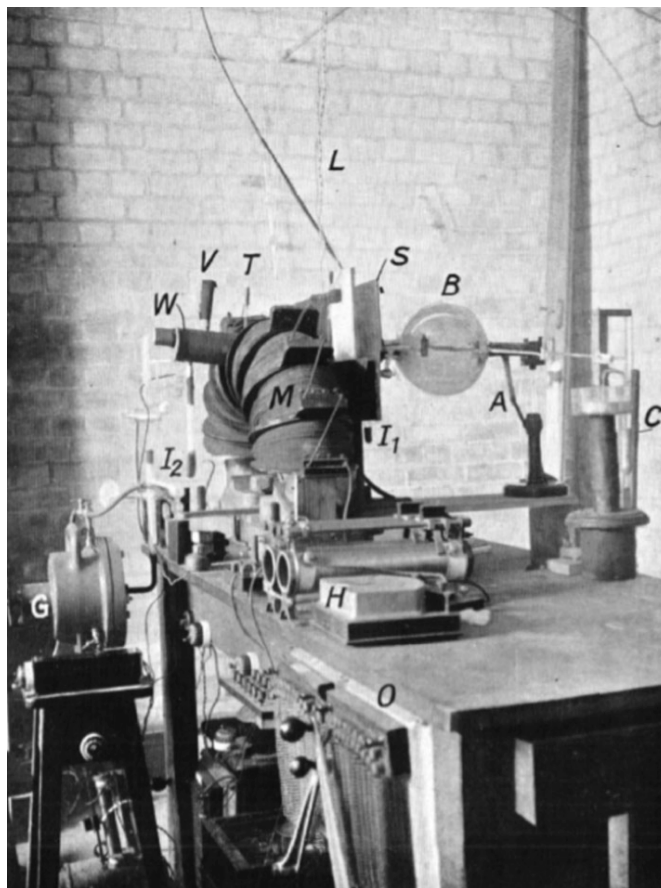


Figura 5.3. El espectrógrafo de masas original (1919): A) ánodo, B) tubo de descarga, C) contenedor que contiene el gas a analizar, M) electroimán, W) cámara, G) bomba de vacío.

## 5.3 Textos originales

### *La síntesis de amoniaco a partir de sus elementos (Fragmento)<sup>1</sup>*



Figura 5.4. Fritz Haber (1868-1934).

Estamos interesados en un fenómeno químico muy sencillo. El nitrógeno gaseoso se combina con hidrógeno gaseoso en proporciones simples y cuantitativas para producir amoniaco gaseoso. Las tres sustancias han sido bien estudiadas por los químicos durante más de cien años. Durante la segunda mitad del siglo pasado, el comportamiento de cada una de ellas, en diversas condiciones, se ha estudiado cientos de veces. Si no ha sido hasta el presente siglo que la producción de amoniaco a partir de sus elementos y en cantidades importantes haya tenido éxito experimental, se debe al hecho de que se requiere de un equipamiento muy especial y al uso de estrictas condiciones termodinámicas.

Es significativo que los intentos anteriores no tuvieran éxito, incluso fugazmente, en el logro certero de una unión espontánea de nitrógeno e hidrógeno para formar amoniaco. Esto dio lugar al perjuicio de que la producción de amoniaco era imposible, y en el curso del tiempo, ésta disfrutó de un apoyo considerable entre los químicos. Tal perjuicio generó trampas, que, mucho más que las conocidas dificultades técnicas, desalentó la investigación profunda en el tema.

Un interés meramente profesional en la preparación de amoniaco se basa en la consecución de un resultado fácil por medio de equipamientos especiales. Un interés más amplio apelaba al hecho de que la síntesis de amoniaco a partir de sus elementos, si se llevara a cabo a gran escala, sería de gran utilidad para satisfacer necesidades económicas de importancia nacional. Tales usos prácticos no eran el objetivo principal de mis investigaciones. Nunca tuve dudas de que mi trabajo de laboratorio produciría más que una confirmación científica de los principios básicos y criterios que ayudarían en los experimentos, y que mucho trabajo tendría que ser añadido para asegurar el éxito económico a escala industrial. Por otro lado, no me habría concentrado tanto en este problema si no hubiera estado convencido de la necesidad económica del progreso químico en este campo, compartiendo la convicción plena de Fichte que, si bien el objeto inmediato de la ciencia reside en su propio desarrollo, su objetivo último debe estar ligado a la influencia que ejerce, en la vida en general y en toda la disposición humana de las cosas que nos rodean.

Desde mediados del siglo pasado se conocía que el nitrógeno era necesario para el desarrollo del cultivo de alimentos; era también reconocido, sin embargo, que las plantas no pueden absorber el nitrógeno elemental que es el principal constituyente de la atmósfera, pero necesitan el nitrógeno que al combinarse con el oxígeno forma nitratos capaces de ser asimilados por las mismas plantas. Esta combinación del nitrógeno con el oxígeno puede comenzar con la combinación del nitrógeno con el hidrógeno para formar amoniaco que posteriormente puede cambiar al salitre, es decir, nitrógeno en el suelo, nitrógeno fijado.

<sup>1</sup> Haber, 1966.

En condiciones naturales el suelo no pierde su nitrógeno fijado. Las plantas verdes lo utilizan para sintetizar sustancias complicadas sin modificarlo en nitrógeno elemental. Animales y seres humanos lo ingieren con las plantas y lo devuelven al suelo en sus excreciones y finalmente con sus restos fallecidos. La putrefacción y la combustión destruyen una cierta cantidad de nitrógeno fijado, pero la naturaleza repara la pérdida cuando, durante una tormenta, los rayos combinan nitrógeno y oxígeno en las capas superiores de la atmósfera, que luego es regado por la lluvia. A esta acción fijadora de nitrógeno por las descargas eléctricas como fuente de nitrógeno combinado se añade la actividad de las bacterias del suelo, algunas de las cuales viven libres, mientras que otras se encuentran instaladas en los nódulos de las raíces de muchas plantas, donde se lleva a cabo la conversión de nitrógeno libre en nitrógeno fijado.

La agricultura mantiene esencialmente el equilibrio de nitrógeno fijado. Sin embargo, con el advenimiento de la era industrial, los productos de la tierra se llevan fuera de donde los cultivos se realizan a lugares lejanos donde éstos se consumen, con el resultado de que ya no se devuelve el nitrógeno fijado a la tierra de la que fue tomada.

Esto ha provocado la necesidad económica mundial del suministro de nitrógeno fijado a la tierra. Esta necesidad se incrementa por consideraciones económicas nacionales, que, con poblaciones más densas en los países industrializados, exigen un incremento de su productividad agrícola, y que además se incrementa aún más por el hecho de que la industria en expansión requiere de nitrógeno fijo para muchos de sus propios fines químicos.

[...]En ese momento (1905) me parecía inútil continuar con la investigación. Sin duda ya había sido un logro la combinación de los elementos, y además se habían esbozado los requisitos para la síntesis a gran escala; pero estos requisitos aparecieron tan desfavorables que disuadían un estudio más profundo del tema. El descubrimiento de catalizadores que proporcionarían un ajuste rápido del punto de equilibrio en el entorno de 300°C y en condiciones normales de presión me parecía bastante improbable, ya que no se habían encontrado en los últimos 15 años en ningún lugar.

La síntesis de amoníaco que se había demostrado a presión normal podría llevarse a cabo a alta presión a escala de laboratorio sin grandes dificultades. Se necesitaba sólo una ligera modificación de la presión del horno, como la utilizada por Hempel, 15 años antes de llevar a cabo la absorción de nitrógeno en el caso de la síntesis de amoníaco indirecto bajo presiones de hasta 66 atmósferas. Pero yo no creía que valía la pena; en aquella época yo apoyé la opinión, ampliamente compartida, que una reacción en estado gaseoso cercana a una intensa fuente de calor a alta presión era imposible. Así el asunto quedó suspendido durante los siguientes tres años.

Ya en 1906, por otra parte, una nueva determinación del equilibrio del amoníaco era necesaria. En el curso de sus investigaciones sobre el teorema de calor que ha sido nombrado después de él con su nombre, Nernst tuvo éxito en la búsqueda de una fórmula aproximada que permitió la predicción de los equilibrios basados en los valores del calor y las llamadas constantes químicas. En el caso del amoníaco esto dio una desviación de los valores obtenidos en mis primeras mediciones que, como más tarde se hizo evidente, fue causado por el valor original de la constante química de hidrógeno utilizada. Esta desviación llevó a determinaciones nuevas del equilibrio que Nernst realizó en su Instituto en un horno de presión, mientras que yo, repetí las mediciones a presión normal con mayor cuidado que antes.

Dedicamos más trabajo a la determinación del equilibrio a presión normal y a 30 atmósferas en una amplia gama de temperaturas, para calcular el calor de formación del amoníaco a partir de sus elementos a temperatura normal y hasta el umbral del rojo, para finalmente conocer su calor específico a altas temperaturas.

Durante el curso de estas investigaciones, junto con mi joven amigo y compañero de trabajo Robert Le Rossignol, cuyo trabajo me gustaría mencionar aquí con especial sinceridad y agradecimiento, regresé una vez más, en 1908, al problema de la síntesis de amoníaco abandonado tres años antes.

Antes de esto me había familiarizado con los procesos técnicos de la licuefacción de aire, y al mismo tiempo había aprendido de los correspondientes del ácido fórmico, realizado con monóxido de carbono fluyendo sobre álcalis muy calientes a alta presión, lo que me llevó a considerar que no era imposible producir amoníaco a escala industrial en condiciones de alta presión y temperatura. Pero la opinión desfavorable de mis colegas me indicó que sería necesario un avance impresionante para despertar el interés técnico en el tema.

Para empezar, era evidente que un cambio en el uso de la presión máxima sería ventajoso. Podría mejorar el punto de equilibrio y, probablemente también, la velocidad de la reacción. El compresor que teníamos permitía comprimir los gases hasta 200 atmósferas, y por lo tanto determinaba nuestra presión de trabajo experimental. En los alrededores de esta presión, los catalizadores, con los que habíamos trabajado en el curso de nuestras determinaciones de equilibrio, y que producían una rápida combinación de nitrógeno e hidrógeno por encima de 700°C eran de manganeso y hierro.

Sin embargo, para lograr resultados impresionantes teníamos que descubrir catalizadores que logran la conversión rápida entre 500 y 600°C. Buscamos en la tabla periódica metales de los grupos seis, siete y ocho, de los cuales cromo, manganeso, hierro y níquel poseían propiedades catalíticas muy favorables. Al mismo tiempo descubrimos en el osmio un excelente catalizador, ya que su rendimiento depende de su composición.

# Valencia y la estructura de los átomos y las moléculas (Fragmento)<sup>2</sup>



Figura 5.5. Gilbert N. Lewis (1875-1946).

Considero que hay un enlace químico cuando dos electrones acoplados entre sí se encuentran ubicados entre dos centros atómicos. Tenemos así una imagen concreta de esa entidad física del “gancho y el agujero” que ha sido el credo de la Química Orgánica. Cuando dos átomos de hidrógeno se unen para formar una molécula diatómica, cada uno aporta un electrón del par que constituirá el enlace. Representando cada electrón de valencia por un punto se puede escribir de manera gráfica la fórmula del hidrógeno así:



Entonces cuando el átomo de hidrógeno con su electrón se enlaza con el átomo de cloro con sus siete electrones producen una molécula que se representa por:



Dos átomos de cloro forman la molécula:



Para representar la estructura completa de la molécula de cloro con sus dos núcleos y sus treinta y cuatro electrones tenemos que dibujar una imagen como la que se muestra en la **Figura 22**. Sin embargo, esa imagen bidimensional no representa adecuadamente la configuración espacial de la molécula, ni tampoco los electrones que componen los kernel atómicos, porque no tiene interés localizarlos.

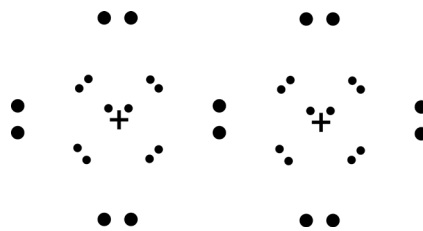
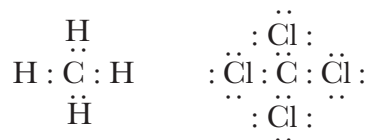


Figura 22. Arreglo de los electrones en la molécula de cloro (los círculos más grandes representan los electrones de valencia).

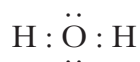
Estamos seguros, sin embargo, que cada uno de los que se encuentran en la capa exterior deberían ser representados por un par de electrones en los vértices de un tetraedro. Este tetraedro será regular únicamente en el caso de átomos simétricos como es el caso del carbón en el metano o el tetracloruro de carbono.

<sup>2</sup> Lewis, 1923.





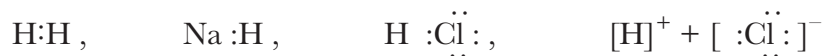
Sólo en raras ocasiones estas representaciones indican distorsiones al octeto, las cuales deberán ser indicadas. Más aún debemos tener siempre en cuenta, como en el caso de las fórmulas comunes en Química Orgánica, que nuestra representación bidimensional falla en representar la verdadera estereoquímica de la molécula. Así, a primera vista, la fórmula del agua parece simétrica, aunque sabemos que los dos átomos de hidrógeno no se encuentran colocados simétricamente alrededor del oxígeno, sino más bien en los vértices de un tetraedro distorsionado. A esta misma conclusión ha llegado Vorländer (1922), con su estudio de las propiedades de los cristales líquidos.



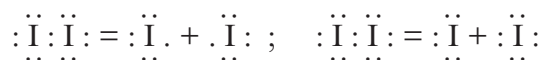
A partir de esta simple suposición, que el enlace químico consiste en un par de electrones que se mantienen juntos por dos átomos, he demostrado cómo los diferentes tipos de moléculas que van de las “extremadamente polares a las no polares” pueden ser interpretadas. Citando de mi anterior artículo: “Grande como es la diferencia entre las típicas polares y no polares, podemos mostrar cómo una sola molécula puede, de acuerdo a su entorno, pasar desde el extremo polar al no polar, no por saltos abruptos, sino por gradaciones imperceptibles, tan pronto como admitimos que un electrón puede ser la propiedad común de dos capas atómicas”. Que la frase “gradaciones imperceptibles” sea estrictamente exacta lo veremos más adelante.

El par de electrones es el vínculo y puede estar entre dos centros atómicos en una posición tal que no existe una polarización eléctrica, o puede estar desplazado hacia uno u otro átomo con el fin de dar a un átomo una carga negativa y, en consecuencia, al otro átomo una carga positiva. Pero no se puede decir de cualquier átomo que tiene un número entero de unidades de carga, excepto en el caso en el que uno de los átomos tome posesión exclusiva de la pareja del enlace y forme un ion.

Por ejemplo, podemos suponer que el estado normal de la molécula de hidrógeno es aquel en el que el par de electrones se coloca simétricamente entre los dos átomos. En el hidruro de sodio, por otro lado, podemos considerar la pareja de enlace más cerca del hidrógeno que del sodio, lo que hace negativo al hidrógeno; mientras que en el ácido clorhídrico el enlace se desplaza hacia el cloro, dejando el hidrógeno con una carga positiva. En presencia de un disolvente polar, el cloro asume la plena posesión de la pareja de enlace, y tenemos una ionización completa. He intentado representar los desplazamientos de electrones en las fórmulas de la siguiente manera:



Incluso una molécula simétrica como la de  $\text{H}_2$  o  $\text{I}_2$  que de tiempo en cuando se polarizan en una dirección o la otra como consecuencia de la perturbación debido al movimiento térmico. Cuando el vapor de yodo se calienta a una temperatura alta, se rompe el enlace de la molécula a la mitad de tal manera que forma dos átomos de yodo no cargados. Por otra parte, en yodo líquido, algunas de las moléculas se rompen de otra manera. El par de enlace permanece intacto, pero queda como propiedad exclusiva de un átomo, formando  $\text{I}^+$  y  $\text{I}^-$ . Estos dos tipos de disociación pueden representarse como sigue:



En otras moléculas el desplazamiento de electrones puede ocurrir sin la ionización completa, por lo tanto, la molécula puede ser más o menos polar.

Bromo, cloro, flúor e hidrógeno, en el orden mencionado, muestran una menor tendencia hacia los tipos anteriores de disociación. Decimos que el enlace en la molécula de yodo es más débil que el enlace en la molécula de cloro. También decimos que el yodo es una sustancia más polar que el bromo.

Las dos ideas no son sinónimos, pero por regla general la molécula es menos polar si su enlace es más fuerte. El profesor Branch me ha indicado una cierta ambigüedad en este sentido. Cuando hablamos de una sustancia polar o una molécula polar queremos decir que, o bien las moléculas están en gran parte polarizadas, o que son fácilmente capaces de polarización. En otras palabras, damos a entender que el par de electrones del enlace se desplaza, ya sea en una dirección o la otra, o que es fácilmente desplazable, en cuyo caso podemos decir que el par es móvil. Las dos cosas ordinariamente van juntas, pero esto no siempre es así. La molécula de cloruro de sodio es altamente polarizada, pero el par de electrones se desplazó con tanta fuerza hacia el átomo de cloro como para poseer poca movilidad.

[...] Estas características de la nueva teoría se discutirán con más detalle en capítulos posteriores. En mi artículo original me conformé con una breve descripción de los principales resultados de la nueva teoría, con la intención en un momento posterior para presentar de una manera más detallada, a partir de los diversos hechos de la química, las razones que hacían necesarios estos cambios radicales en la vieja teoría de valencia. Este plan, sin embargo, fue interrumpido por las exigencias de la guerra, y mientras tanto la tarea se llevó a cabo, con un éxito mucho mayor de lo que yo podría haber logrado, por el Dr. Irving Langmuir en una brillante serie de unos doce artículos, y en un gran número de conferencias pronunciadas en este país y en el extranjero. Es en gran parte a través de estos artículos donde se aborda la nueva teoría que ha recibido una gran atención de los científicos.

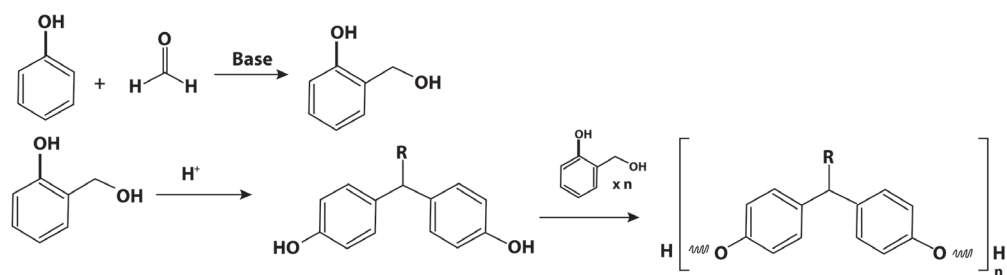
## 5.4 Experimentos

### La baquelita, el primer plástico sintético

*La historia está moldeada con base en los materiales que se han desarrollado para su uso. Por cientos de años, los humanos usaron las piedras para hacer herramientas. Hace 5 000 años, aprendimos como hacer aleaciones con el cobre y así comenzó la era del bronce. Siglos después la era del hierro introdujo al hierro como el material por elección. La Introducción de la baquelita –el primer plástico sintético– en 1907 marcó el inicio de la era de los polímeros.*  
**American Chemical Society**

**A** las moléculas con masas superiores a 10 000 una se les conoce como *macromoléculas*. Si en las macromoléculas se repite un determinado patrón estructural se le llama *polímero*. Cuando el polímero fluye y puede ser moldeado, extruido o laminado se le denomina *plástico*.

A finales del siglo XIX, la compañía norteamericana DuPont inició las investigaciones sobre el nitrato de celulosa que la llevaron a la producción del rayón, polímero que aún se utiliza en las cuerdas de las llantas. Pero no sólo eso, con su producción se redujo de manera importante la cacería de elefantes ya que con nitrato de celulosa se podían fabricar botones, peines, teclas para piano y pelotas de billar, objetos que antes de su uso eran hechos con marfil de los colmillos de los elefantes. Pero no fue hasta 1907 cuando el químico belga Leo H. Bakeland preparó el primer polímero sintético: la baquelita, resultado de la reacción de copolimerización entre el fenol y el metanal (formaldehído). The General Bakelite Company, fundada poco después, extendió el uso del polímero. La baquelita es ligera y razonablemente dura y sus propiedades como aislante hacen que se siga utilizando en muchos equipos eléctricos.



Al finalizar la Primera Guerra Mundial, el interés en los polímeros creció, lo que dio lugar a importantes descubrimientos. En la década de 1930, se inició la comercialización del policloruro de vinilo (PVC por sus iniciales en inglés) que tiene un amplio uso en la industria de la construcción. En esos años, también en DuPont, se preparó el neopreno un hule sintético y que a diferencia del natural no se hincha en contacto con disolventes orgánicos, por lo que se emplea para fabricar las mangueras con las que se surte la gasolina. En 1938, DuPont otra vez anunció que W.H. Carothers, uno de sus investigadores, había sintetizado un material con estructura y propiedades similares a las de la seda, al que llamaron nylon.

### **Materiales y sustancias sugeridos**

- Un vaso de precipitados de 250 mL
- Agitador magnético
- Parrilla de calentamiento
- Probeta de 20 mL
- Agitador de vidrio
- Espátula
- Pipeta Pasteur
- Fenol
- Formaldehído
- Ácido acético glacial
- HCl concentrado

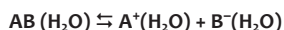
### **Un procedimiento posible**

1. En un vaso de precipitados de 250 mL y con agitación constante agregar 15 g de formaldehído y 10 g de fenol.
2. Una vez que la mezcla sea homogénea se adicionan 25 mL del ácido acético glacial y se calienta a 70-80°C
3. Lentamente con una pipeta Pasteur se adicionan 10-12 mL de ácido clorhídrico concentrado, la mezcla rápidamente se pondrá de color rosado.
4. Raspar con la espátula las paredes del vaso de precipitados y recuperar toda la baquelita formada.

## 5.5 La reacción química. Ácidos y bases

**D**urante la tercera revolución se volvió a presentar el asunto de modelar el comportamiento de los ácidos y las bases. Siguiendo el pensamiento Lavoisieriano, las principales respuestas apelan a la presencia de dos de las entidades encumbradas en este periodo, los iones y los electrones.

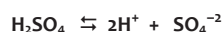
En 1883, el químico sueco S. Arrhenius presentó, en su tesis de doctorado, el modelo de la disociación electrolítica, con el cual podía explicar cómo las disoluciones de ciertas sustancias pueden conducir la electricidad. En el caso de una sustancia hipotética AB al disolverse en agua lo que ocurre es que se ioniza:



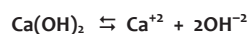
El uso de la doble flecha  $\rightleftharpoons$  indica que hay reacciones en ambas direcciones en lo que se denomina *equilibrio químico*. Así, aunque al parecer el agua es una sola sustancia, en realidad una parte de ella se está disociando en sus iones. Es importante hacer notar que en el equilibrio, las reacciones en ambas direcciones ocurren a la misma velocidad, con lo que la concentración, tanto de las moléculas de agua, como de sus dos iones, se mantiene constante en el tiempo.

De acuerdo con el modelo de Arrhenius de ácidos y bases que es un caso particular del de disociación electrolítica, un ácido es cualquier sustancia capaz de ionizarse en agua cediendo un protón  $H^+$ , y una base es aquella que se ioniza cediendo un oxhidrilo  $OH^-$ .

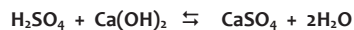
Ejemplos de disociaciones de ácidos son:



Ejemplos de disociaciones de bases son:



Finalmente, la reacción de neutralización entre un ácido y una base da lugar a una sal y agua (el  $H^+$  que libera el ácido se une al  $OH^-$  de la base para formar el agua). Son ejemplos de reacciones de neutralización:



Los productos de estas reacciones no generan los iones característicos de los ácidos y las bases, por lo tanto han desaparecido sus propiedades. En la mejor tradición compositivista, Arrhenius afirmó que son los iones  $H^+$  los responsables de las propiedades ácidas de las sustancias y los iones  $OH^-$  los que producen las propiedades básicas.

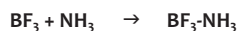
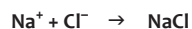
Un modelo más general de los ácidos y las bases fue enunciado por G.N. Lewis en 1923. Aquí no se apela a la presencia de un átomo, sino a la disposición o carencia de un par de electrones. Así en el modelo ácido-base de Lewis:

Una sustancia básica es aquella que tiene un par solitario de electrones que puede usarse para completar el grupo estable (configuración electrónica del gas noble más cercano) de otro átomo, y [...] una sustancia ácida es aquella que puede emplear un par aislado de electrones de otra molécula para completar el grupo estable de uno de sus propios átomos.

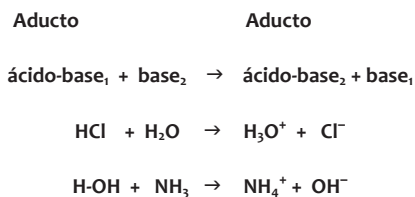


Así, el  $H^+$  es un ácido de Lewis, ya que puede aceptar un par de electrones para completar su grupo estable, es decir, obtener la configuración del He, el gas noble más cercano a él. Pero también son ácidos el  $BF_3$  y la mayoría de los cationes y bases el  $H_2O$  o el  $NH_3$  y la mayoría de los aniones.

Las reacciones que tienen lugar entre un ácido y una base de Lewis originan un aducto, término que agrupa a todas las sales, pero también a otro tipo de agregados en los que como resultado de la donación de un par de electrones por la base y la aceptación por el ácido se forma un nuevo enlace. Ejemplos de la formación de aductos son:



El modelo de ácidos y bases de Lewis incorpora al de Arrhenius y es independiente del disolvente y del estado de agregación en el que se encuentren las sustancias reaccionantes. Para Lewis, las reacciones ácido-base son reacciones de competencia o sustitución entre ácidos o entre bases, en el mejor sentido de lo representado en las tablas de afinidad de Geoffrey siglos atrás en el periodo protoquímico. Por ejemplo, en los siguientes casos la base<sub>2</sub> arrebató un protón al aducto ácido-base<sub>1</sub>



Es decir, el agua es una base en la primera reacción (cede un par de electrones al  $H^+$  para formar lo que se llama *ion hidronio*) y un aducto, en la segunda. La naturaleza química de las sustancias depende de contra quién reaccione, es decir, de su contexto.

## Industria y medio ambiente

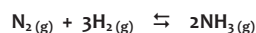
# La síntesis artificial del amoníaco

La población mundial alcanzó en el año 1900 los mil 650 millones de personas. Al final de la quinta revolución química, que lo es también del siglo XX, la población mundial sumó 6 mil millones de personas. Si la vida humana es importante, el proceso Haber-Bosch para la síntesis artificial de amoníaco, desarrollado a principios del siglo XX, es seguramente el descubrimiento más importante en la historia de la humanidad. Cerca de la mitad de la población humana estamos vivos porque comemos alimentos obtenidos de una u otra manera gracias al uso de fertilizantes derivados del amoníaco.

Las sociedades humanas conocen el amoníaco desde hace miles de años. Un posible origen de la palabra amoníaco está vinculado al Templo de Amón en la ciudad egipcia de Karnak hace poco más o menos 5 mil años. Se dice que los sacerdotes de Amón, al quemar estiércol de camello (usado como combustible), encontraron en el hollín resultante cristales blancos que corresponderían a lo que hoy conocemos como sal amoniacal ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ).

Mucho tiempo después, la agroquímica apareció con el trabajo de J. Liebig durante la segunda revolución química. Con su kaliapparat, él y sus estudiantes se dedicaron a analizar químicamente las plantas y poco a poco identificaron que no sólo contenían carbono, hidrógeno y oxígeno, sino que también nitrógeno. Así, aparecieron los primeros fertilizantes, que utilizaban salitre (mezcla de nitratos de sodio y potasio) procedentes de las grandes reservas que de este mineral se encontraban en los desiertos chilenos. Iquique, el puerto desde donde se embarcaba el salitre se volvió rico (de hecho fue la primera ciudad chilena que tuvo tranvías, algunos de dos pisos, tirados por caballos). A pesar de su origen chileno, el imperio británico controlaba el comercio mundial de salitre y con ello la producción de fertilizantes. Todo eso cambió a principios del siglo XX con las investigaciones tecnocientíficas desarrolladas en la compañía química alemana BASF, entonces la mayor de Europa.

La reacción química de síntesis de amoníaco es:



a altas temperaturas y presiones y que identifica el grado de dominio que sobre los gases habían adquirido los químicos desde los remotos tiempos de la cuba hidroneumática.

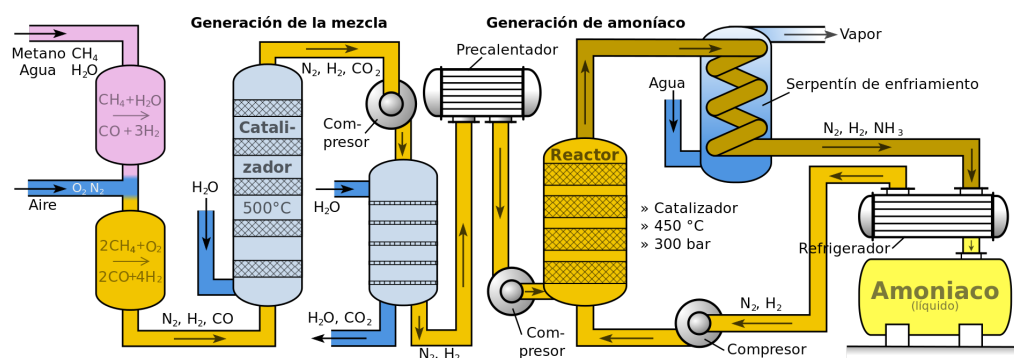


Figura 5.6. Diagrama del proceso de Haber-Bosch. Elaborado por Sven, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3616531>

Del amoníaco no sólo se pueden obtener fertilizantes, sino también explosivos. Para Alemania, durante la Primera Guerra Mundial, la síntesis de amoníaco se volvió fundamental.

## 5.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron de la tercera revolución química construyan una pregunta abierta y contéstela, empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

- Reconoce el contexto político-cultural del desarrollo de la tercera revolución química identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la tercera revolución química al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica los movimientos y/o corrientes artísticos y filosóficos a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.
- Consulta en la colección de videos *Cumbres de la ciencia y la técnica*, cada uno con duración de 15 minutos, el video número 16 sobre O. Hann cuyo descubrimiento, con L. Meitner, de la fisión nuclear (<https://www.youtube.com/watch?v=jMgensjbwk8>) fue fundamental para el entendimiento de las reacciones nucleares y construye tres preguntas abiertas sobre el mismo.

### 2. Instrumentos

- Uno de los instrumentos desarrollados durante la tercera revolución química fue el de la difracción de rayos X. En 1915, W. Bragg y L. Bragg, padre e hijo obtuvieron el Premio Nobel de Física por el análisis de la estructura cristalina empleando este instrumento. En la sal de mesa (NaCl) la distancia promedio, medida por difracción de rayos X, entre el núcleo del sodio y el del cloro es de  $2.82 \times 10^{-8}$  cm. La densidad del cristal es de  $2.17 \text{ g/cm}^3$  y la masa molar del NaCl es de 58.44. Calcula el valor del número de Avogadro (información que, entre otros datos utilizó en el mismo periodo J. Perrin para demostrar la existencia de los átomos).

- Francis Aston, el inventor de la espectrometría de masas, descubrió que para varios elementos, la masa atómica no era la masa de todos los átomos del elemento. En cambio, la masa atómica es un promedio ponderado de la masa de dos o más isótopos diferentes. El concepto de isótopo se conocía en relación con los elementos radiactivos, pero fue Aston el que lo extendió a elementos estables.

Aston obtuvo los primeros resultados de este tipo con el neón, resultados que mantuvo al reportarlos, aunque tuvo cuidado de hacer notar que los datos iniciales eran equívocos:

...se obtuvieron resultados que indicaban pesos atómicos aproximadamente de 20 y 22 respectivamente, siendo el peso atómico aceptado de 20.2. Esto condujo naturalmente a la expectativa de que el neón podría ser una mezcla de isótopos, pero el peso 22 podría ser debido a otras causas, y el método de análisis no dio suficiente precisión para distinguir entre 20 y 20.2 con certeza.

Si el neón es una mezcla de dos isótopos de masa 20 y 22, ¿cuáles deben ser las proporciones de estos dos isótopos para producir una masa atómica de 20.2?

- Thomson determinó en su experimento con el tubo de rayos catódicos la relación entre la carga ( $e$ ) y la masa del electrón ( $m$ ) y ésta es con los datos más recientes  $1.7588 \times 10^{-11}$  C/kg. En el periodo que va de 1909 a 1913, el estadounidense Robert A. Millikan realizó una serie de experimentos con gotas de aceite para determinar la carga del electrón obteniendo como resultado  $e = 1.6022 \times 10^{-19}$  C. ¿Cuál es la masa del electrón? Investiga el experimento de Millikan para determinar  $e$ .

### 3. Textos originales

- (D). Escribe la  $K_p$  (constante de equilibrio en fase gaseosa) de la reacción exotérmica de síntesis de amoníaco e identifica por qué :
  - o Debe llevarse a cabo a alta presión.
  - o Si a 200°C el rendimiento es del 80% y a 400°C es del 20%, se lleva a cabo a 500°C.
- (D). ¿Por qué el catalizador que se usa en la reacción de Haber es de Fe en lugar del de Os?
- (A). ¿Cómo podría explicar Lewis que dos electrones con carga negativa no se repelían entre sí?

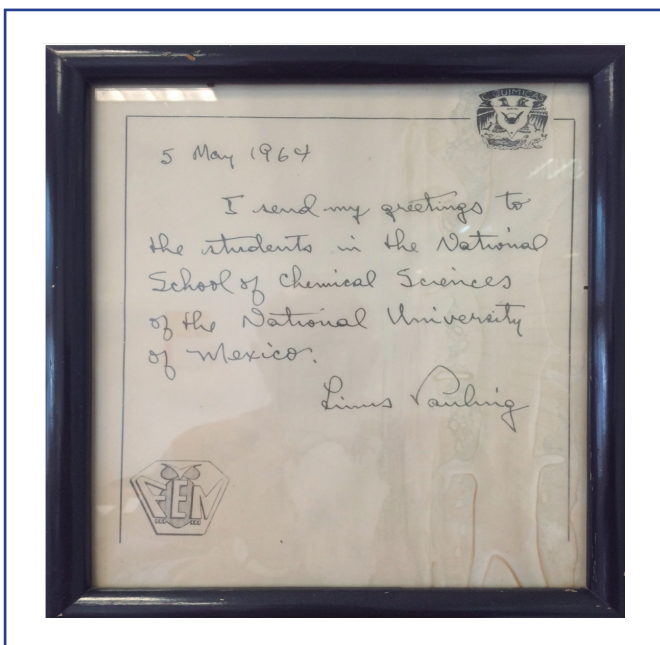
### 4. Experimentos

1. ¿Por qué se le agrega ácido a la mezcla de reacción?
2. El producto obtenido no es lo suficientemente duro como la baquelita comercial, ¿qué se le tiene que agregar para tener un plástico más duro?
3. Consulta en la colección de videos *Cumbres de la ciencia y la técnica*, cada uno con duración de 15 minutos, el video número 97 sobre L. Bakeland <https://www.youtube.com/watch?v=H3jTg8pMEyU> y construye tres preguntas abiertas sobre el mismo.

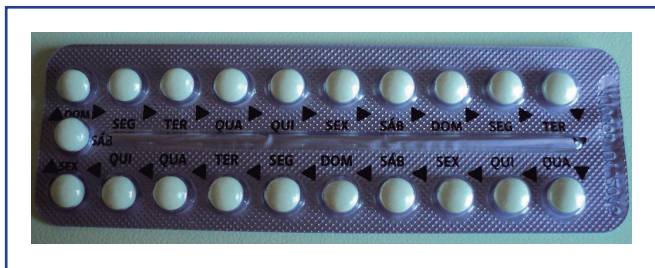
### 5. Reacción química. Ácidos y bases.

- Otro modelo de ácidos y bases desarrollado durante la tercera revolución química es el de Bronsted-Lowry. Investiga en qué consiste, lo que te permitirá identificar la razón, a pesar de su muy extendido uso, por la que no se discute en el presente texto.
- Clasifica las siguientes moléculas como ácidos y bases de Lewis;  $\text{NH}_3$ ;  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ;  $\text{AlCl}_3$ ;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{CH}_2\text{CH}_2$ ;  $\text{BeF}_2$ . ¿Cuáles reaccionarían con agua?
- (D). ¿Por qué una disolución 0.1 M de ácido bórico tiene un pH de 5.2, mientras que una de la misma concentración de ácido nítrico tiene un pH de 1?

# 6 Cuarta revolución (1945-1966)



Autógrafo de Linus Pauling dedicado a los estudiantes de la Facultad de Química de la UNAM durante su visita en 1964.



Pastillas anticonceptivas, para muchos, uno de los inventos más importantes del siglo XX.

## 6.1 Acontecimientos

La cuarta revolución química se caracteriza fundamentalmente por la incorporación de nuevos instrumentos en las prácticas químicas. En 1945, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, el presidente de la National Science Foundation de Estados Unidos, V. Bush, publicó un informe conocido como *Ciencia. La frontera infinita*, en el que solicitaba de manera abierta que el gobierno federal financiara la investigación de las ciencias en las universidades norteamericanas, apoyando además a las empresas que habían provisto de materiales y equipamiento al ejército. Con ello los laboratorios químicos cambiaron más que en los anteriores 300 años, al integrarse inicialmente en los mismos nuevos equipos, como los espectrómetros de ultravioleta visible e infrarrojo y al poco tiempo, los más importantes de todos, los de resonancia magnética nuclear (RMN). Por otra parte, los cromatógrafos e inclusive el rotavapor ocuparon un lugar en las mesas de los laboratorios.

Se crearon nuevas industrias de equipamiento siguiendo la lógica militar de la estandarización de las partes, lo que facilitó su consumo. Apareció una nueva subdisciplina, la Química Instrumental. También lo hicieron las computadoras y con ellas los programas que permitieron hacer “cálculos químicos”, desde la incorporación del Extended-Hückel, en 1963, por R. Hoffmann. En ese mismo año empezó a trabajar el Quantum Chemistry Program Exchange (QCPE) y, un par de años más tarde, J. Pople introdujo el CNDO y W. Kohn, los funcionales de la densidad. Todo lo anterior hizo que los químicos empezaran a pensar en la estructura de la materia en términos de la mecánica cuántica, que por entonces abanderaba de manera admirable el norteamericano, ganador de dos premios Nobel y candidato a un tercero, L. Pauling.

La Química sintética aprovechó la llegada de los nuevos instrumentos y se empeñó en la preparación de nuevas sustancias más complicadas, muchas de gran importancia biológica y medicinal. La síntesis de la morfina, el colesterol, la cortisona, la estricnina, la penicilina y la clorofila compartieron la aparición en el mercado de los tranquilizantes (como el Librium y el Valium), así como de los (originalmente mexicanos) anticonceptivos. El estadounidense R.B. Woodward se proclamó el campeón de la síntesis química. A lo anterior hay que añadir la manera en la que las macromoléculas comerciales cambiaron la forma literalmente de “constituir” el mundo.

La posguerra marcó el inicio de la era de los plásticos. La aplicación de la termodinámica y la cinética química al estudio sistemático de estos materiales fue tarea abordada por diferentes grupos de investigación, entre los cuales se destacó el dirigido en Alemania por H. Staudinger. Las palabras plástico y flexible se volvieron comunes e identificaron socialmente una actitud valiosa, aunque también caracterizaron, la primera de ellas, a la naciente sociedad de consumo mundial. Los plásticos eran baratos, fáciles de producir en todas partes y desechables.

Al final de la cuarta revolución química, con los nuevos tejidos de plástico producidos por las cada vez más poderosas industrias químicas, lo artificial parece dominar a lo natural. Con la creciente presencia de materiales sintéticos, los químicos y su industria fracasaron en integrar en el imaginario colectivo lo que para ellos es evidente y bien sabido: una sustancia química es lo que es, independientemente de su origen. Esta veneración popular, con resabios de nobleza, de identificar las genealogías materiales impide superar la absurda dicotomía de natural vs. sintético. Y peor aún la de asociar moralmente: “natural-bueno” vs. “sintético-malo”.

La cuarta revolución química está dominada en buena medida por la sumisión teórica a la Física. Lo anterior a pesar de que los primeros modelos exitosos para explicar las reacciones químicas se diseñaron sin considerar la mecánica cuántica, a partir de iones moleculares. Sin embargo, la espectroscopia, con su multitud de instrumentos se hizo presente en los laboratorios de Química y sus practicantes tuvieron que aprender su idioma, la mecánica cuántica. Los libros de texto en todo el mundo, bajo la concepción lógico-positivista de la ciencia, cada vez se hicieron más fisicoquímicos, buscando los “principios” de la Química en la Física y abandonando la enorme cantidad de conocimiento empírico que se había acumulado durante siglos. Las explicaciones derivadas de la naciente Química cuántica llenaron miles de hojas provenientes de las también entonces juveniles, enormes y asépticas computadoras, con lo que se establece como una subdisciplina. A pesar de que el espín era conocido antes, es en este periodo que encuentra un lugar importante en la Química, entre otras razones, por su capacidad para explicar el enlace químico y través de los instrumentos de RMN.

La cuarta revolución química no se caracterizó por la resolución de una controversia, como fue el caso de las tres anteriores, sino por cambios significativos en el énfasis de la investigación y la práctica científica, así como en la estructura de las organizaciones académicas y profesionales. A partir de este momento, la Física y la Biología ocupan un lugar preponderante en los intereses (bioquímicos) y en la forma de pensar (Física cuántica) de los químicos.





## La población humana alcanzó, en 1950, poco más de 2 500 millones de habitantes.

AÑO

HECHOS TECNOQUÍMICOS

HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES

1945

El presidente de la National Science Foundation de Estados Unidos, V. Bush, publica el informe *Ciencia. La frontera infinita*, en el que solicita de manera abierta que el gobierno federal financie la investigación de las ciencias en las universidades norteamericanas. Desde ese momento la adquisición de nuevos instrumentos creció considerablemente. Ese mismo año, el ruso E. K. Zavoisky publica el primer artículo donde se explica la resonancia paramagnética electrónica.

1947

L. Leloir funda en Buenos Aires el Instituto de Investigaciones Bioquímicas Fundación Campomar, donde llevó a cabo la investigación sobre azúcares, por la cual le otorgaron el Premio *Nobel* de Química años después.

1948

El sueco A. W. K. Tiselius obtiene el Premio *Nobel* de Química por sus investigaciones en electroforesis y análisis por adsorción, especialmente en el descubrimiento de la complejidad de las proteínas del suero sanguíneo.

1951

Se publica en la revista *LIFE* el artículo "Cortisone from giant yam" en donde se da a conocer mundialmente la investigación realizada en la compañía mexicana Syntex sobre la cortisona. Pocos años después, junto con la UNAM, esta compañía desarrolla la pastilla anticonceptiva.

1952

Los ingleses A.J. Martin y R.L.M. Synge obtienen el Premio *Nobel* de Química por la invención de la cromatografía de partición, mientras que el suizo F. Bloch y el norteamericano E.M. Purcell recibieron el Premio *Nobel* de Física por su desarrollo de la resonancia magnética nuclear. Ese mismo año, el británico Ch. Coulson publica el muy influyente libro *Valence*, donde indica que la Química cuántica no es una aplicación de la mecánica cuántica a la Química, sino una nueva subdisciplina de ésta. Ese año la contaminación atmosférica en Londres provocó la muerte de por lo menos 8 mil personas.

1953

El alemán H. Staudinger recibe el Premio *Nobel* de Química por sus investigaciones en Química macromolecular.

1954

El norteamericano L. Pauling recibe el Premio *Nobel* de Química por sus investigaciones sobre el enlace químico y su aplicación en la elucidación de la estructura de sustancias complejas. Es considerado como uno de los fundadores de la Biología molecular y ha sido reconocido entre los 20 científicos más importantes en toda la historia de las ciencias.

• Termina la Segunda Guerra Mundial con la ocupación de Berlín por el ejército soviético y la rendición incondicional de Japón después de sufrir, en Hiroshima y Nagasaki, ataques norteamericanos con bombas atómicas.

• Inicia la Guerra Fría.

• India declara su independencia e inicia la Guerra de Corea (1950-1953).

AÑO	HECHOS TECNOQUÍMICOS	HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES
1956	En el Reino Unido se promulga la Clean Air Act que establece el control de combustibles utilizados para calentar los hogares en las ciudades para reducir la contaminación atmosférica.	• La Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas lanza el Sputnik, el primer satélite artificial en 1957 y, cuatro años después, al primer astronauta.
1962	El norteamericano N. Bartlett sintetiza los primeros compuestos con gases nobles. El suizo M.F. Perutz y el inglés J.C. Kendrew obtienen el Premio <i>Nobel</i> de Química por sus estudios en la estructura de las proteínas globulares y el húngaro G.A. Olah observó directamente el carbocatión tert-butilo por resonancia magnética nuclear como una especie estable al disolver fluoruro de tert-butilo en un superácido.	• En 1962, Rachel Carson publica <i>La primavera silenciosa</i> , considerado por muchos como uno de los libros más importante de no ficción del siglo XX. Ese mismo año L. Pauling obtiene el Premio <i>Nobel</i> de la Paz y F.H.C. Crick, J.D. Watson y M. Wilkins el de Medicina, por la elucidación de la estructura del ADN.
1963	Se otorga el Premio <i>Nobel</i> de Química al suizo K. Ziegler y al italiano G. Natta por sus investigaciones en polímeros. El estadounidense R.G. Pearson introduce su modelo de ácidos y bases duros y blandos en uno de los artículos más citados del <i>Journal of the American Chemical Society</i> . Este mismo año se inicia el Quantum Chemistry Program Exchange (QCPE) donde se comparten los primeros programas para calcular teóricamente algunas propiedades de las sustancias. Durante los siguientes dos años, W. Kohn construye la teoría de funcionales de la densidad con la que es posible calcular sustancias complejas.	• Crisis de los misiles soviéticos en Cuba.
1964	El Premio <i>Nobel</i> de Química se le otorga a la británica D.C. Hodgkin por la determinación estructural de diversas sustancias bioquímicas utilizando la difracción de rayos X. El químico británico J.W. Linnett publica el libro <i>The Electronic Structure of Molecules: A New Approach</i> , en el cual incorpora el espín en el modelo del octeto de Lewis, mientras el suizo R.R. Ernst mejora notablemente la resolución de la Resonancia Magnética Nuclear, investigación con la que también será galardonado años después.	• En 1964, el Premio <i>Nobel</i> de la Paz es otorgado a M.L. King. China hace explotar su primera bomba atómica e inicia la Guerra de Vietnam.
1965	El norteamericano R. Woodward recibe el Premio <i>Nobel</i> por sus extraordinarios méritos en el arte de la síntesis orgánica. El Chemical Abstracts Service introduce el CASRegistry Number (CASRN) un sistema computarizado para identificar cualquier sustancia sin requerir de su nombre y desde entonces la mayor base de datos sobre la identidad de las mismas.	• En 1965, F. Jacob, A. Lwoff y J. Monod obtienen el Premio <i>Nobel</i> de Fisiología por sus estudios en el control genético de la síntesis de enzimas.
1966	El norteamericano R. Mulliken recibe el Premio <i>Nobel</i> de Química por su trabajo fundamental sobre el enlace químico y la estructura electrónica de las moléculas, empleando el método de orbitales moleculares.	• Los filósofos Heidegger, Sartre, Foucault y Kuhn marcan nuevas preocupaciones filosóficas mientras que los escritores latinoamericanos García Márquez, Cortázar, Fuentes, Borges, Carpentier y Asturias irrumpen en la Literatura Universal, acompañados por los directores Fellini, Bergman, Buñuel, Kubrick, Kurosawa y Herzog, quienes caracterizan lo que se conoce como <i>cine de autor</i> . El mundo ya es una aldea global.

## 6.2 Instrumentos: Cromatografía de gases

En 1906, el botánico ruso M. Tswett realizó un experimento que condujo al descubrimiento de la cromatografía como técnica de separación. Colocó un extracto de colorantes vegetales en la parte superior de una columna de vidrio rellena de yeso pulverizado y le agregó éter etílico. Al poco tiempo, observó que de la mezcla original se separaba, en el interior de la columna, diversas bandas coloridas que descendían a diferentes velocidades.

Una de las características de la cromatografía es la presencia de dos fases físicas dispuestas, de manera que una permanece estacionada dentro del sistema, mientras que la otra (fase móvil) se desplaza a lo largo de él. La separación de las sustancias que componen la mezcla se debe a su diferente afinidad por ambas fases en lo que se conoce como *equilibrio de distribución*. En el experimento de Tswett, la separación de los colorantes vegetales se logró porque cada uno de ellos tenía una afinidad diferente por cada una de las dos fases: los más afines a la fase estacionaria (es decir, los más retenidos) avanzan más lentamente que los más afines a la fase móvil (los menos retenidos) que se mueven con más rapidez. Así, lo más importante a medir es el tiempo de retención.

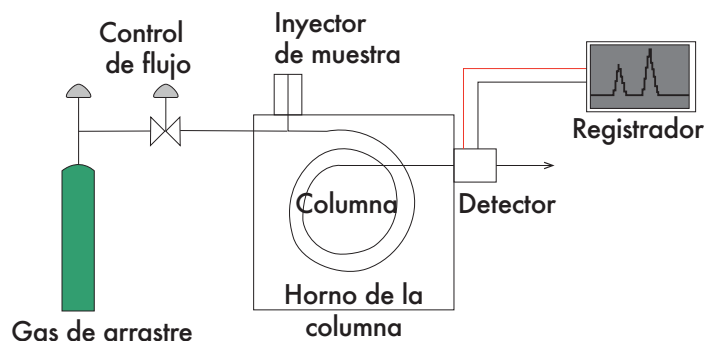


Figura 6.1. Diagrama de un cromatógrafo de gases.

Aunque los principios fundamentales son los mismos, se acostumbra clasificar a los métodos cromatográficos según el estado físico de la fase móvil:

- Cromatografía líquida. Es la forma original en la que Tswett desarrolló la técnica. La fase móvil es un disolvente o mezcla de disolventes y la fase estacionaria un sólido o un líquido inmisible con la fase móvil depositada en la superficie de un sólido. Esta forma de cromatografía puede realizarse con diferentes arreglos experimentales: en columna, en capa delgada o en papel.
- Cromatografía de gases. En este caso, la fase móvil es un gas inerte (también conocido como gas de arrastre y que puede ser helio o nitrógeno, aunque el primero se usa en la mayoría de estos instrumentos) y la fase estacionaria es un sólido o un líquido sostenido en un sólido inerte. Las mezclas a separar e identificar deben de poderse evaporar sin que se descompongan. Este tipo de cromatografía siempre es en columna, ya que es la única manera de que la fase móvil gaseosa se mantenga fluyendo, confinada dentro del sistema.

La fase estacionaria consiste de una capa microscópica de un líquido o un polímero sostenida en un sólido inerte, depositada sobre las paredes de un tubo (generalmente metálico) muy delgado (por ejemplo, 0.25 mm de diámetro) y largo (hasta 100 m). Al final de la columna se coloca un detector capaz de indicar la cantidad de los componentes de la mezcla y que en forma gráfica se conoce como cromatograma. En éste aparecen diversos picos de diferente tamaño (proporcional a la respuesta del detector, es decir, a la cantidad de sustancia) a diferentes tiempos de retención. La identidad de los componentes de la mezcla se establece inyectando en el cromatógrafo de gases sustancias conocidas en las mismas condiciones experimentales (por lo que el tiempo de retención será igual).

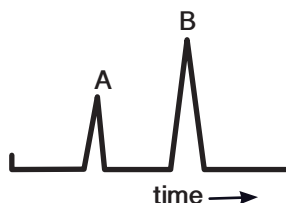


Figura 6.2. Cromatograma simplificado de una mezcla de dos sustancias A y B, en la proporción de 1 a 2.5, obtenida por las áreas respectivas bajo su correspondiente pico.

Hay una multitud de detectores que se han diseñado y construido para identificar diferentes tipos de sustancias y uno de los más interesantes, incorporado años después del desarrollo de este instrumento por el galardonado con el premio *Nobel* de Química en 1952, Archer J. Martin, es el espectrómetro de masas (en el instrumento mixto conocido como GC-MS) que es extremadamente efectivo para identificar las sustancias que conforman una mezcla, aun contando con cantidades muy pequeñas de la misma, del orden de picogramos ( $1 \times 10^{-12}$  g).

## Resonancia Magnética Nuclear

El espectrómetro de resonancia magnética nuclear consiste de tres partes: un imán, una fuente de radiación electromagnética y un detector de la misma radiación. La muestra a investigar se coloca entre los polos del imán y se irradia con la radiación electromagnética, que al interactuar con la muestra se modifica, lo que es detectado por el receptor de las mismas ondas dando lugar a un espectro.

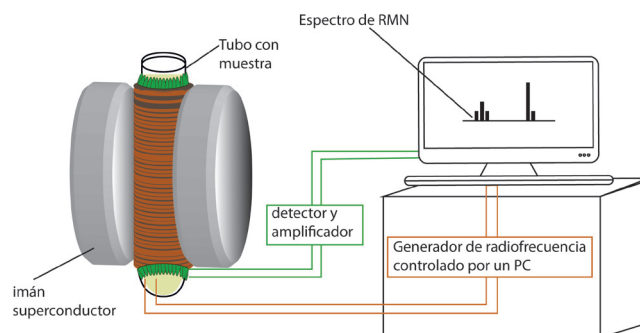
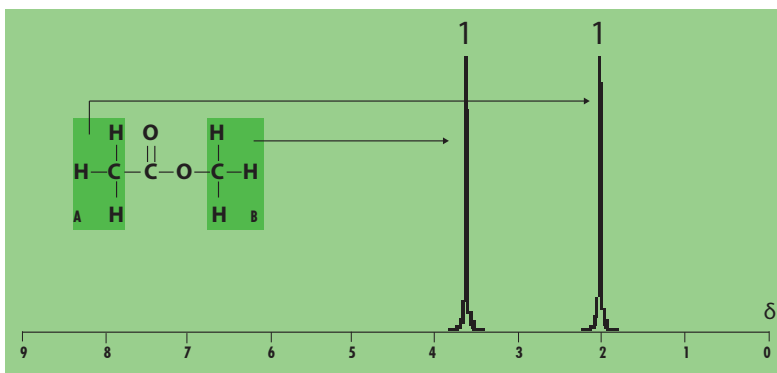


Figura 6.3. Diagrama de un instrumento de resonancia magnética nuclear.

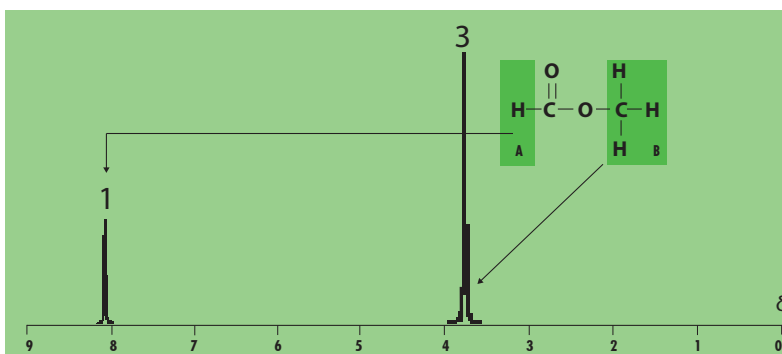
Las partículas subatómicas tienen propiedades únicas que no se reconocen en estructuras de tamaño ordinario. Una de estas propiedades es el espín, formalmente identificado como el momento angular intrínseco de valor cuantizado. Los valores del espín son múltiplos de  $\frac{1}{2}$ . En presencia de un campo magnético, los núcleos con espín  $\frac{1}{2}$  se orientan a favor o en contra de ese campo, asunto que no sucede en ausencia del campo magnético. Los núcleos atómicos con número par de protones y neutrones no tienen espín con valor  $\frac{1}{2}$ , mientras que si la suma del número de protones o el número de neutrones es impar, tienen espín nuclear. Así, los isótopos del 100% de abundancia de  $^{19}\text{F}$  y  $^{31}\text{P}$  ambos tienen espín. Por otro lado, cuando de un determinado elemento hay más de un isótopo, alguno de ellos puede tener espín nuclear activo y otro(s) no. Es decir, el protio  $^1\text{H}$  tiene espín nuclear activo, pero el deuterio  $^2\text{H}$  no. El abundantísimo isótopo de  $^{12}\text{C}$  no, pero el escaso de  $^{13}\text{C}$  sí. El valor del espín nuclear del  $^1\text{H}$ , del  $^{13}\text{C}$ , del  $^{19}\text{F}$  o del  $^{31}\text{P}$  es  $\frac{1}{2}$ , pero no es el caso con otros isótopos que tienen otros valores de espín. Las diferentes orientaciones tienen asociadas distintos niveles de energía. Cuando la orientación con menor energía recibe radiación electromagnética se excita y pasa al nivel de energía superior. La energía necesaria para dicha transición es detectada por el receptor.

La diferencia de energía entre las dos orientaciones del espín nuclear dependen del entorno en el que se encuentra el núcleo. Esto es de particular importancia en Química ya que permite identificar el número de átomos (originalmente de  $^1\text{H}$ , pero posteriormente de cualquier otro que tenga espín) no equivalentes en una molécula. La investigación de un gran número de sustancias permitió establecer una escala arbitraria contra una sustancia de referencia ( $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$ ) llamada *desplazamiento químico*,  $\delta$ , con valores de 0 a 10. Lo anterior puede observarse en la siguiente figura del espectro de  $^1\text{H}$  del etanoato de metilo, en la que cada uno de los dos grupos de núcleos de hidrógeno aparecen en lugares diferentes.



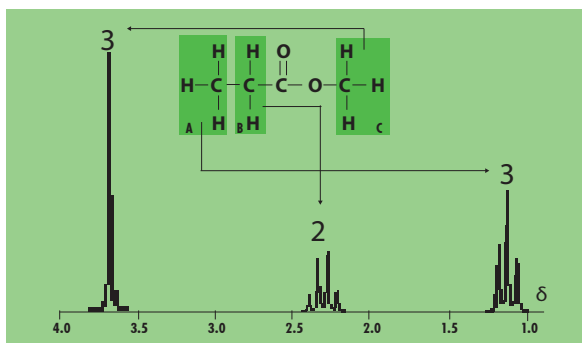
**Figura 6.4.** Espectro de  $^1\text{H}$  del acetato de metilo. Hay que hacer notar que para este experimento la sustancia se disuelve en cloroformo deuterado ( $\text{CDCl}_3$ ), lo que se volvió usual, ya que el deuterio tiene espín 1.

Otra característica de este instrumento es que permite reconocer la cantidad de núcleos que aparecen en cada lugar.



**Figura 6.5.** Espectro de  $^1\text{H}$  del metanoato de metilo en el que la relación del área bajo los picos es de 3 a 1. Notar que el desplazamiento químico del grupo  $\text{OCH}_3$  es el mismo en ambas sustancias.

Finalmente, los espines de un determinado núcleo se pueden acoplar con los de otro, dependiendo de la distancia que los separe. En los primeros instrumentos de  $^1\text{H}$  RMN lo que se detectó fue un desdoblamiento de la señal correspondiente al número de núcleos de  $^1\text{H}$  vecinos más uno.



**Figura 6.6.** Espectro de  $^1\text{H}$  del propionato de metilo, en el que la relación del área bajo los picos es de 3 a 2 a 3. El grupo  $\text{CH}_3$  del propionato tiene dos núcleos de  $^1\text{H}$  vecinos, por lo que se desdobra en un triplete, mientras que el grupo  $\text{CH}_2$  tiene tres núcleos de  $^1\text{H}$  vecinos, por lo que se desdobra en un cuarteto. Notar que el desplazamiento químico del grupo  $\text{OCH}_3$  es prácticamente el mismo en las tres sustancias.

Así, con este instrumento capaz de identificar, originalmente sólo para el  $^1\text{H}$ , posición, intensidad y multiplicidad diferente para cada núcleo de hidrógeno, se pudo identificar la estructura de una enorme cantidad de sustancias orgánicas.

## 6.3 Textos originales

### *Ciencia y paz (Fragmento)<sup>1</sup>*



Figura 6.7. Linus Pauling (1901-1994).

Creo que nunca más habrá otra guerra mundial, una guerra en la que las terribles armas basadas en la fusión y la fisión nuclear sean usadas. Creo que es el descubrimiento de los científicos, que hicieron posible dichas armas, el que nos obliga a todos a dirigirnos a un nuevo periodo de la historia del mundo, un periodo de paz y razón, donde los problemas mundiales no se resuelvan a través de la guerra o por la fuerza, sino de acuerdo con las leyes internacionales, donde se busque la justicia para todas las naciones y beneficios para toda la población.

Permítanme recordarles, como lo dije ayer al aceptar el Premio Nobel de la Paz 1962, que Alfred Nobel quería inventar “una sustancia o máquina con tan terrible poder de destrucción que la guerra se volviera imposible para siempre”. Más de medio siglo después, los científicos descubrieron las sustancias explosivas que Nobel había querido inventar –el uranio fisionable y el plutonio– con una energía explosiva diez millones de veces mayor que el explosivo favorito de Nobel, la nitroglicerina, y la sustancia fusionable, el deuterio de litio, con una energía explosiva cincuenta millones de veces mayor que la nitroglicerina. Las primeras máquinas terribles que incorporaron estas sustancias, el uranio 235 y el plutonio 239, fueron las bombas de fisión de Hiroshima y Nagasaki. Luego, en 1954, nueve años después, la primera superbomba de fisión-fusión se hizo explotar en el atolón de Bikini con una energía explosiva mil veces mayor que la bomba de fisión de 1945.

Esta bomba, la superbomba de 1954, tiene menos de una tonelada de material explosivo. La energía liberada en su explosión fue mayor que la de todos los explosivos empleados en todas las guerras a lo largo de la historia de la humanidad, incluyendo la Primera y Segunda guerras mundiales.

Miles de estas superbombas han sido fabricadas y hoy, dieciocho años después de la construcción de la primera bomba atómica, las potencias nucleares tienen un arsenal de estas armas tan grande que si lo emplearan en una guerra, cientos de millones de personas morirían y nuestra civilización no podría sobrevivir a la catástrofe.

Así, las máquinas que Nobel buscaba han llegado y la guerra debe hacerse imposible para siempre.

El mundo ha empezado una metamorfosis desde su primer primitivo periodo de historia, cuando las disputas entre las naciones se arreglaban a través de la guerra, a un periodo de madurez en el que la guerra se ha abolido y la ley del mundo toma su lugar. El primer paso de esta metamorfosis se realizó pocos meses atrás cuando los gobiernos de Estados Unidos, Gran Bretaña y la Unión Soviética, después de años de discusión y negociación, firmaron un tratado que prohíbe las pruebas nucleares en la

---

<sup>1</sup> Pauling, 1963.



superficie de la tierra, los océanos y el espacio. Este tratado ha sido ratificado prácticamente por todos los países del planeta.

Creo que los historiadores del futuro podrán describir este tratado como una de las más importantes acciones tomadas por los gobiernos de estas naciones: el inicio de otra serie de tratados que den lugar a un nuevo mundo del cual la guerra sea abolida por siempre.

La guerra y la paz están relacionadas. El mundo ha cambiado de manera importante, particularmente durante el último siglo, por los descubrimientos científicos. Nuestro mayor conocimiento permite considerar la posibilidad de eliminar la pobreza y el hambre, así como de disminuir los sufrimientos causados por las enfermedades y emplear los recursos naturales del mundo en beneficio de la humanidad.

[...] Trabajando para abolir la guerra estamos trabajando también por los derechos de los seres humanos. La guerra y el nacionalismo, unidos a la explotación económica, han sido los grandes enemigos de los seres humanos. Creo que con la guerra eliminada del planeta tendremos mejoras en los sistemas sociales, económicos y políticos en todas las naciones, para el beneficio de la humanidad.

[...] Ahora que logramos eliminar del mundo este vestigio de barbarismo prehistórico, es el tiempo de la humanidad. Nosotros, usted y yo, tenemos el privilegio de estar vivos en esta época extraordinaria de la historia del mundo, la época en la que se establece la frontera entre el pasado milenario de guerra y sufrimiento y el futuro de paz, justicia, moralidad y bienestar. Tenemos el privilegio de contar con la oportunidad de contribuir a lograr la abolición de la guerra y reemplazarla por leyes mundiales. Confío en que logremos triunfar en esta empresa, en la que la comunidad mundial se verá libre no sólo del sufrimiento causado por la guerra, sino también, a través del mejor uso de los recursos naturales, de los descubrimientos científicos, y de los esfuerzos de la humanidad, del hambre, la enfermedad, el analfabetismo y el miedo. En el futuro estaremos en posibilidad de construir un mundo caracterizado por la justicia económica, política y social para todos los seres humanos, una cultura que refleje la inteligencia del hombre.

# Avances recientes en la química de los productos naturales (Fragmento)<sup>2</sup>

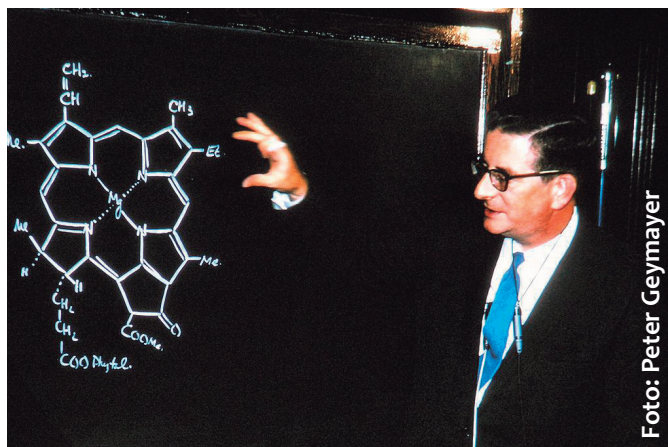
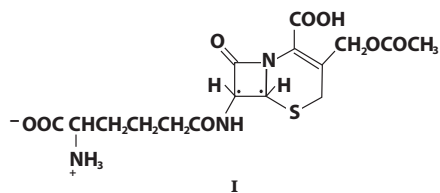


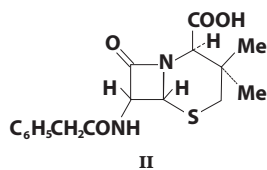
Foto: Peter Geymayer

Figura 6.8. Robert Woodward (1917-1979).

Se ha otorgado el Premio *Nobel* de Química para el año 1965 “por las contribuciones al arte de la síntesis química”. Es para mí un gran placer manifestar aquí mi satisfacción con la cita, que indica correctamente un aspecto interesante y significativo de la actividad sintética. Pero ese aspecto es sólo uno –y me atrevo a decir el que con mayor eficacia– que ejemplifica y muestra de lo que se articula y resume. Al tener esta mañana la responsabilidad de dar una conferencia sobre un tema relacionado con el trabajo –para el que fui galardonado con el Premio–, he optado por presentar los resultados de una investigación completamente nueva y hasta ahora no publicada que, espero, iluminará muchas facetas del espíritu de trabajo contemporáneo en la síntesis química.



La cefalosporina C es un producto del metabolismo del monium *Cephalosporium acre* y fue aislado en 1955 por Newton y Abraham en una investigación notable por su perspicacia, así como su esmerada atención al detalle. La investigación de la estructura del metabolito se concluyó con éxito en 1961, a través de estudios en los que se emplearon técnicas químicas y de cristalografía de rayos X. La estructura molecular (I) mostró su semejanza con una clase hasta ahora conocida de sustancias que han constituido uno de los objetivos sintéticos más desafiantes y recalcitrantes de nuestra generación. Me refiero por supuesto a las penicilinas, de las cuales la penicilina G (II) –una de las primeras conocidas y que ha sido ampliamente utilizada en Medicina– puede servir de ejemplo.

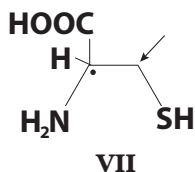


Pocos deben de ser los químicos orgánicos que no conozcan la fascinante historia de las penicilinas. Cómo el seguimiento de una observación temprana de Fleming, Florey y Chain permitió aislar la primera penicilina poco después del estallido de la Segunda Guerra Mundial. Cómo los poderosos

<sup>2</sup> Woodward, 1965.

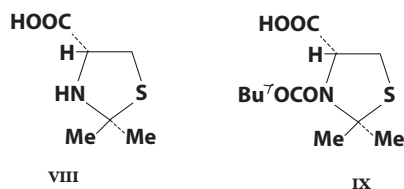
deseos prácticos, en esos tiempos de prueba, condujeron a la creación de un enorme programa americano / británico, que tenía como objetivos la determinación de la estructura y la síntesis de las penicilinas. Cómo las investigaciones químicas y los estudios, sobre todo de cristalografía de rayos X de Dorothy Hodgkin, resolvieron el problema estructural, y cómo a pesar de los mejores esfuerzos de, probablemente, el mayor número de químicos cada vez concentrados en un solo objetivo, el problema sintético no se había resuelto cuando el programa terminó al final de la Guerra. Muchos químicos continuaron siendo fascinados por el problema y algunos todavía estaban dispuestos a apostar su habilidad contra su obstinación. En 1959, después de más de una década de investigación intensiva, John Sheehan tuvo éxito en el desarrollo de métodos por los cuales las penicilinas pueden ser preparadas por síntesis total. Que estos métodos no hayan tenido aún uso práctico no desvirtúa este logro importante y hace hincapié en que el reto presentado para el químico sintético por las penicilinas no se ha agotado.

[...] En ambas clases –las penicilinas y las cefalosporinas– algunas de las sustancias derivadas poseen propiedades que les confieren especial utilidad en la Medicina. Por lo tanto, si la cefalosporina C posee actividad antimicrobiana de un orden de magnitud relativamente bajo, ha atraído especial interés debido a que funciona contra los organismos que se habían vuelto resistentes a las penicilinas. En algunas de las cefalosporinas derivadas, este aspecto es especialmente interesante, ya que la actividad antimicrobiana no sólo se mantiene, sino que puede ser incrementada.



[...] A menudo, en el curso del trabajo de síntesis una o dos ideas clave definen el estilo, el desarrollo y el resultado de la investigación, al tiempo que proporcionan la flexibilidad esencial para cualquier largo viaje a través de un territorio desconocido, plagado de peligros que en el mejor de los casos pueden preverse sólo vagamente. En la planificación de nuestra síntesis de cefalosporina, la primera de estas ideas fue la elección de la L (+) - cisteína (VII) como nuestro material de partida. Esta sustancia fácilmente disponible tiene un esqueleto de dos átomos de carbono al que están unidos un grupo carboxilo, un átomo de nitrógeno y un átomo β de azufre, en una palabra, tiene ya una gran parte de la estructura y de los sustituyentes de las cefalosporinas. Además, es ópticamente activa y los grupos dispuestos sobre su átomo de carbono asimétrico (con asterisco en VII) están orientadas en un sentido estereoquímico absoluta y precisamente como los grupos similares en el objetivo; es decir, tan pronto como se había tomado la decisión de utilizar la cisteína, nuestro problema estereoquímico estaba medio resuelto, ya que el anillo de la cefalosporina contiene sólo otro centro asimétrico (cf. estrellas en I). Ya que esta elección es ventajosa, también estaba claro que traía un problema especial, que de ningún modo podía verse a la ligera. La molécula de cisteína es un paquete hermético de grupos altamente reactivos. El grupo amino, el grupo sulfhidrilo, el grupo carboxilo y el grupo α-metino poseen rasgos característicos de reactividad química, en los que podrían esperarse modificaciones específicas. Pero la característica única restante de la molécula, el grupo saturado, β-metileno, representa un punto en el que había poco o ningún precedente de ataque químico. Y, sin embargo, a la luz de nuestro plan, debemos de alguna manera introducir un átomo de nitrógeno en ese punto, preferiblemente de una manera estereoespecífica (véase flecha en VII). Por otra parte, aún suponiendo que un método debe ser descubierto para superar las defensas de la molécula en ese punto fuerte, estaba claro que deberíamos estar tratando con productos intermedios que contienen dos átomos electronegativos unidos al mismo átomo de carbono, una situación bien conocida por sus potencialidades al conferir sensibilidad e inestabilidad en las moléculas que lo contienen. En resumen, nuestra decisión inicial nos coloca en la posición estimulante de tener que hacer un descubrimiento, y de estar preparados para hacer frente a sustancias de una constitución especialmente precaria.

Nuestras primeras operaciones consistieron naturalmente en la modificación de la estructura de la cisteína para deprimir la reactividad de los grupos amino, sulfhidrilo, y carboxilo. Por lo tanto, el aminoácido se convirtió en primer lugar por reacción con acetona en la tiazolidina (VIII), que a su vez se hace reaccionar con cloruro de terbutiloxicarbonilo, en presencia de piridina para dar el compuesto N-ter-butiloxicarbonilo correspondiente (IX).



[...] Una vez más, los dos ésteres isoméricos se separaron fácilmente y el isómero conjugado se redujo con polvo de zinc y ácido acético acuoso al 90% a 0° durante dos y media horas a cefalosporina C sintética (LXVI = I). La identidad del material sintético fue en este caso establecida a través del examen de su comportamiento en cromatografía de papel en varios sistemas, así como mediante la observación de su actividad antibacteriana frente a *Neisseria catarrhalis*, *Alcaligenes faecalis*, *Staphylococcus aureus* y *Bacillus subtilis*. Aún más, la sal cristalina de bario sintética fue idéntica en propiedades ópticas y espectroscópicas con la sal de cefalosporina C natural.

## 6.4 Experimentos

### Cromatografía de partición, separación de los colorantes de la espinaca

No fue únicamente el desarrollo de la instrumentación de alta tecnología lo que marcó la cuarta revolución química. La innovación en metodologías e instrumentos de uso común para el trabajo experimental en los laboratorios generó, por igual, un avance muy significativo en relación con el desarrollo de los estudios en Química. Tal es el caso de Archer J.P. Martin y Richard L.M. Synge, ambos galardonados con el premio Nobel de Química en 1952, por su trabajo en el desarrollo de la cromatografía de partición, procedimiento que continúa siendo, hasta hoy en día, uno de los más utilizados por parte de los químicos, que requieren separar sustancias de interés de entre complicadas mezclas.

El análisis cromatográfico ha sido uno de los métodos más valiosos para la Química, se tiene registro de que su uso como método de separación data de 1906, cuando Michael Tswett logró separar por primera vez algunos de los colorantes presentes en hojas de plantas verdes, mediante una cromatografía en papel. Pero fue hasta las investigaciones de Martin y Synge, quienes lograron explicar el principio de repartición cromatográfica entre la fase móvil y la fase estacionaria, que se consideró como una técnica revolucionaria de separación, sustituyendo de manera casi inmediata antiguas y menos eficientes metodologías de separación y purificación de compuestos.

La cromatografía de partición, capaz de ser aplicada en un sinnúmero de mezclas complejas y con resultados altamente cuantitativos, abrió un enorme campo de posibilidades para elegir las condiciones adecuadas de separación que permitieran trabajar en cualquier caso particular. En el discurso de presentación del Premio Nobel de 1952, presentado por el químico sueco A.W.K. Tiselius, Premio Nobel en 1948, indica sobre la cromatografía de partición: “Esta herramienta ha permitido a los investigadores en Química, Biología y Medicina abordar y resolver problemas que antes eran considerados casi desesperadamente complicados”.

#### Materiales y sustancias sugeridos

- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| – Un manojo de hojas de espinaca         | – 1 matraz Erlenmeyer de 500 mL |
| – 15 matraces Erlenmeyer de 125 mL       | – Sílice gel                    |
| – Una columna de cromatografía pequeña   | – Hexano                        |
| – Placas para cromatografía en capa fina | – Acetona                       |
| – Agua                                   |                                 |

#### Un procedimiento posible

1. Tomar unas cuantas hojas de espinaca secas y ponerlas en el matraz Erlenmeyer de 500 mL, agregar acetona para extraer todos los colorantes contenidos en las hojas (dejar las hojas remojándose en acetona por aproximadamente 45 min.)
2. Una vez que son extraídos los colorantes de las hojas de espinaca, pasar una muestra de esta mezcla color verde a la columna de cromatografía previamente empacada con sílice gel.
3. Usar diferentes fases móviles para la extracción de pigmentos, la primera consiste en hexano al 100% hasta que el primer pigmento de color amarillo-anaranjado haya sido aislado.
4. A continuación, aumentar la polaridad del eluyente agregando acetona. Recolectar el segundo pigmento de color amarillo.
5. Finalmente, volver a aumentar la polaridad del eluyente y aislar el último pigmento de color azul-verdoso.

**Nota:** Para determinar la relación en cantidad de hexano y acetona para extraer los pigmentos, es necesario probar antes en las placas cromatográficas.

## 6.5 La reacción química. Ácidos y bases

El modelo de ácidos y bases duros y blandos es la conclusión derivada del estudio de infinidad de reacciones químicas en solución (pero con aplicación también en fases gaseosa y sólida), publicada originalmente por el químico norteamericano R.G. Pearson y que durante años dio lugar a congresos internacionales, artículos y libros sobre el tema, en los que se discutió con amplitud la manera más conveniente de abordar los problemas de estructura y reactividad. Ante un incremento notable del número de especies, la comunidad química se balanceaba entre dos posiciones enfrentadas: la cualitativa contra la cuantitativa.

La primera, la que Pearson defendía, permitía incorporar bajo un solo modelo, pero de manera superficial, multitud de reacciones entre las especies y de las estructuras que se derivaban, mientras que la segunda lo hacía de manera profunda, pero reducida. Los trabajos que le preceden abordan este tema desde diferentes puntos de vista, pero en todos los casos la idea es la misma; ordenar las diferentes especies químicas de acuerdo con algún(os) parámetro(s), de manera que se pueda predecir su reactividad. En la siguiente tabla, que representa la manera de conocer de la “historia natural” de Pickstone, se identifican las características que permiten separar a las especies en duros y blandos, independientemente de su condición de ácidos o bases.

Especies blandas	Especies duros
Gran tamaño	Tamaño pequeño
Gran polarizabilidad	Pequeña polarizabilidad
Pequeño pKa (bases)	Gran pKa (bases)
Pequeño estado de oxidación (ácidos)	Estados de oxidación grandes (ácidos)
Fáciles de oxidar, pequeño $E^{\circ}_{red}$ , pequeña energía de ionización (bases)	Difíciles de oxidar, alto $E^{\circ}_{red}$ , alta energía de ionización (bases)
Fáciles de reducirse (alto $E^{\circ}_{red}$ en los ácidos)	Difíciles de reducirse (pequeño $E^{\circ}_{red}$ en los ácidos)
Pequeña densidad de carga positiva en el átomo aceptor (ácidos)	Alta densidad de carga positiva en el átomo aceptor (ácidos)
Pequeña densidad de carga negativa en el átomo donador (bases)	Alta densidad de carga negativa en el átomo donador (bases)
En ocasiones poseer orbitales vacíos de baja energía capaces de formar enlaces $\pi$ de retrocoordinación (bases)	
En ocasiones poseer un gran número de electrones en orbitales d (ácidos)	

Posteriormente, se identificaron las especies en ácidos y bases, recordando que esa condición depende de contra qué se interactúe, pero incorporando la mayor cantidad empírica de conocimiento químico que se tenía a la fecha. Esta clasificación se muestra en la siguiente tabla y, como se podrá observar, integra especies iónicas y neutras, orgánicas e inorgánicas.



	Ácidos	Bases
<b>Duros</b>	H <sup>+</sup> , Li <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> Be <sup>2+</sup> , Be(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> Sc <sup>3+</sup> , La <sup>3+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Co <sup>3+</sup> , Al <sup>3+</sup> , Ga <sup>3+</sup> , In <sup>3+</sup> , As <sup>3+</sup> Ti <sup>4+</sup> , Zr <sup>4+</sup> , Sn <sup>4+</sup> BF <sub>3</sub> , BCl <sub>3</sub> , B(OR) <sub>3</sub> , Al(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , AlCl <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , RCO <sup>+</sup> , RPO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> HX (moléculas con enlace por puente de hidrógeno)	OH <sup>-</sup> , O <sup>2-</sup> , RO <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , (Cl <sup>-</sup> ) NH <sub>3</sub> , RNH <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, ROH, R <sub>2</sub> O
<b>Intermedios</b>	Fe <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Os <sup>2+</sup> , Sn <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , Rh <sup>3+</sup> , Ir <sup>3+</sup> , Sb <sup>3+</sup> , Bi <sup>3+</sup> , B(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> , GaH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> N, N <sub>2</sub> , Br <sup>-</sup>
<b>Blandos</b>	Cu <sup>+</sup> , Ag <sup>+</sup> , Au <sup>+</sup> , Hg <sup>+</sup> , CH <sub>3</sub> Hg <sup>+</sup> , Br <sup>+</sup> , I <sup>+</sup> , R <sup>+</sup> Pd <sup>2+</sup> , Pt <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup> , Pt <sup>4+</sup> , metales Aceptores π: trinitrobenceno, quinonas, TCNE	H <sup>-</sup> , R <sup>-</sup> , CN <sup>-</sup> , SCN <sup>-</sup> , RS <sup>-</sup> , I <sup>-</sup> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , CO R <sub>3</sub> P, R <sub>3</sub> As, R <sub>2</sub> S, RSH, metales

Finalmente, Pearson procedió a enunciar las dos reglas que resumen la mayoría de los datos experimentales conocidos y que constituye el modelo de ácidos y bases duros y blandas:

**Regla 1. Equilibrio.** Ácidos duros prefieren asociarse con bases duras y ácidos blandos con bases blandas.

**Regla 2. Cinética.** Ácidos duros reaccionan más rápidamente con bases duras y ácidos blandos lo hacen con bases blandas.

Hay que hacer notar que en la Regla 1 se emplea la palabra *preferir*, es decir, en el caso de que varios reactivos puedan dar lugar a diferentes productos, lo harán generalmente dando aquellos que se predice, pero no únicamente éstos.

Las aplicaciones de este modelo abarcan de manera cualitativa prácticamente cualquier espacio de la Química, una vez que toda ella puede reconocerse a través de las especies: estructuras y reacciones orgánicas, inorgánicas, de coordinación, bioquímicas, geoquímicas, catalíticas, es decir, en disolución, estado gaseoso o sólido.

## Industria y medio ambiente

# Los plásticos

*La industria de los plásticos ha contribuido a convertirnos en una sociedad desechable.*

**S. Barger, 2007**

La cantidad de plástico que se consume anualmente en el mundo ha crecido brutalmente desde el inicio de la cuarta revolución química. De casi nada al principio de la Segunda Guerra Mundial, a cerca de 180 millones de toneladas al final de la quinta revolución química (275 millones en 2010). En poco más de medio siglo, las sociedades humanas nos volvimos adictas a los plásticos. En 1960, el estadounidense promedio consumía unos 14 kilos de productos de plástico, 50 años después consume diez veces más. La producción de plásticos es uno de los mayores negocios de la segunda mitad del siglo XX.

Muy pocos de los polímeros producidos hoy llegan a su uso final sin una modificación. Para ello se cuenta con una gran variedad de aditivos que alteran de diversas maneras sus propiedades y que constituyen un mercado mundial de miles de millones de dólares. Algunos de ellos son:

- Colorantes y pigmentos
- Agentes espumantes
- Plastificantes
- Materiales de relleno

De plástico se fabrican bolsas, botellas, paquetes y vasos que viajan sin cesar por todo el mundo. Desde las más pobladas ciudades hasta los más remotos y alejados parajes de la Tierra y en ese ir y venir son sutilmente peligrosos. Además de que en su viaje pueden lixiviar muchos de sus aditivos, poco a poco se van concentrando en determinados lugares, muchos de ellos marinos, el mayor de los cuales se encuentra en el Pacífico Sur.



**Figura 6.9.** Cadáver de un albatros encontrado en el océano Pacífico. El 80% de las aves en el Mediterráneo consumen plásticos. Además, los plásticos son causa de heridas o muertes del 85% de las tortugas marinas y del 43% de los mamíferos marinos. Foto de Chris Jordan, publicada en <https://insider.si.edu/2012/06/the-age-of-plastic-symposium-june-7-8-2012/>

## 6.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron de la cuarta revolución química construyan una pregunta abierta y contéstela empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

- Reconoce el contexto político-cultural del desarrollo de la cuarta revolución, identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la segunda revolución química al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica las obras, los movimientos y/o corrientes artísticas y filosóficas a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.

### 2. Instrumentos

- Para conocer más sobre el funcionamiento del cromatógrafo de gases consulta <https://www.youtube.com/watch?v=atTT5Rztnog>
- Si quieres empezar a aprender a interpretar un espectro de resonancia magnética nuclear consulta <https://www.youtube.com/watch?v=73lrCUNXlrQ>
- La electroforesis (por la que obtuvo el Premio Nobel de Química, en 1948, A. Tiselius) y la cromatografía son muy semejantes. Identifica esas semejanzas y también sus diferencias.
- En 1961, se empezaron a utilizar los instrumentos conocidos como *secuenciadores automáticos de proteínas*, mediante el análisis de la secuencia de aminoácidos. El principio de su funcionamiento se basa en la hidrólisis que es la ruptura de la macromolécula con

disoluciones ácidas. Por ejemplo, un hexapéptido (es decir, una macromolécula muy pequeña comparada con las proteínas) después de la hidrólisis da lugar a los siguientes péptidos: leu-ala-val; val-ileu; ala-val-ileu; glí-leu-ala y ser-gli. ¿Cuál es la estructura del hexapéptido? ¿Cuántos hexapéptidos que estén formados por diferentes aminoácidos pueden existir?

### 3. Textos originales

- El historiador de la ciencia F. Judson indica:

Un modelo no siempre es sólo un escalón en el ascenso hacia una teoría, sino que el modelo puede ser una teoría. Linus Pauling quiso saber cuál era la estructura de las moléculas de las proteínas. Durante más de 10 años fue acopiando un conjunto de hechos seguros sobre su comportamiento y sobre los detalles estructurales de sus partes componentes. Luego, un día que estaba resfriado observó precisamente el esqueleto de una posible estructura básica de las cadenas de proteínas. Su teoría adoptó la forma de un dibujo (lo que aquí se denomina *modelo material icónico*) que plegó en un modelo tridimensional más sencillo que un aeroplano de papel. Luego con sus colegas, comprobó la teoría con un modelo a escala más exacta, con bolas que representaban átomos. A esta estructura le dio el nombre de *hélice alfa*. El modelo explicaba los hechos que poseía. Éste predijo nuevos hechos. Al publicarlos contribuyó a que otros muchos químicos llevaran a cabo experimentos que corroboraran las predicciones del modelo de Linus Pauling (hay que agregar que ese modelo fue una de las razones por las que se le otorgó el Premio Nobel de Química en 1954).

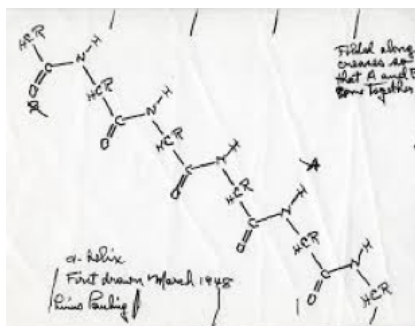


Figura 6.10. Modelo material icónico de la hélice  $\alpha$  de las proteínas.

Investiga qué otros modelos químicos construyó Pauling.

- Construye una RAT cuya conclusión sea: “nunca más habrá otra guerra mundial”.
- Varios libros de texto de Química Orgánica (Menger et al.) enumeran los principios generales para resolver un problema de síntesis. Éstos son:
  - o Comience por el final, es decir, la molécula problema.
  - o Identificación y reconocimiento de la molécula problema: ¿qué tipo de compuesto es? ¿Qué grupo(s) funcional(es) contiene? ¿Cuál es la naturaleza del esqueleto carbonatado? ¿Tiene la molécula una cadena alquílica normal o con ramificaciones? ¿Contiene anillos y son éstos cicloalquílicos o aromáticos?
  - o El grupo funcional. ¿Qué métodos generales tenemos disponibles para su preparación? ¿Cuál de ellos es aplicable al grupo funcional específico de la molécula problema?
  - o El esqueleto carbonado. Algunos de los métodos disponibles para formar grupos funcionales ¿son también aplicables para generar enlaces carbono-carbono? Si es así, ¿es compatible el método con el esqueleto carbonado específico de nuestra molécula problema? Si no lo es, ¿hay un procedimiento para formar una cadena carbonada que produzca una función convertible en la requerida?
  - o Identificación de moléculas precursoras.
  - o Cada molécula precursora se somete al mismo análisis (etapas 1 a 5) aplicado originalmente a la molécula problema. Este análisis conducirá finalmente a encontrar materias primas aceptables.

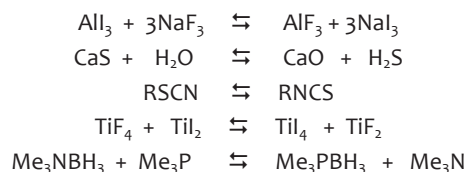
Identifica y ejemplifica en el texto de Woodward estas etapas.

#### 4. Experimentos

- ¿Cuáles son los pigmentos extraídos de las hojas de espinaca?
- Menciona el orden en que estos pigmentos salieron de la columna y por qué.
- ¿Por qué se usan mezclas de disolventes?

#### 5. Ácidos y bases

1. ¿Qué es un superácido?
2. Usando el modelo de ácidos y bases duros y blandos predice y explica hacia dónde se dirigirán las siguientes reacciones: ¿izquierda o derecha?

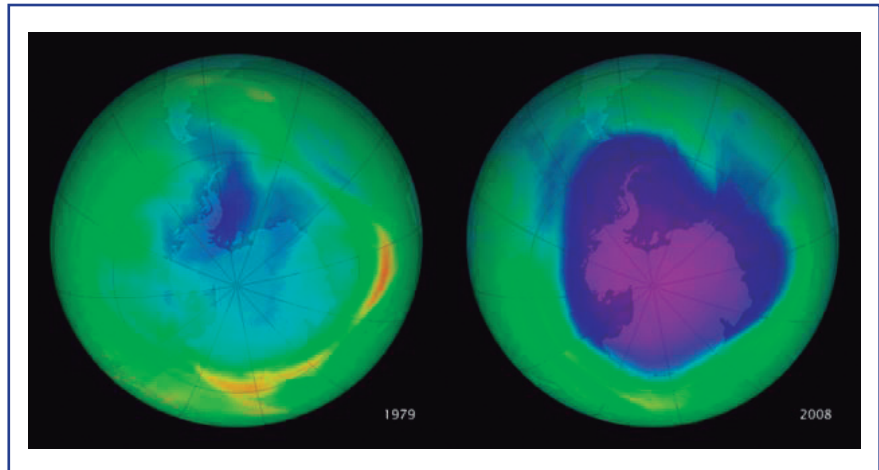


3. El modelo de ácidos y bases duros y blandos también se puede usar en la metalurgia y la geología. Por ejemplo, algunos minerales comunes de los metales duros son el rutilo (óxido de titanio,  $\text{TiO}_2$ ), la dolomita (carbonato de calcio y magnesio  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) o la cromita (óxido de hierro y cromo,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ). Los sulfuros son las bases blandas más comunes en Geología, como lo podrás comprobar averiguando la fórmula de la galena, el cinabrio o la pirita.





# 7 Quinta revolución (1974-1999)



El agujero de la capa de ozono y el desastre de Bophal dan lugar, entre otras acciones, al Protocolo de Montreal y a la Química Verde. Sobre esta última, todos los químicos deben ir tomando una posición ética.

## 7.1 Acontecimientos

En 1974, S. Rowland y M. Molina publicaron los resultados de sus investigaciones sobre el efecto de los clorofluorocarbonos en la capa de ozono, con lo que se reconoce el principal asunto que caracteriza a la quinta revolución química, la revolución ambiental. No fue la primera vez que la industria química enfrentaba dificultades públicas por su capacidad de contaminar el ambiente, pero en esta ocasión, a diferencia de todas las anteriores, inequívocamente el daño y el consiguiente riesgo eran globales. Un par de años antes, por ejemplo, ya se había prohibido el uso del DDT en Estados Unidos. Rowland indicó que la Química Ambiental (atmosférica) “apareció” con el advenimiento de las técnicas de análisis capaces de detectar una parte en mil millones, es decir, cuando se estuvo en posibilidad de distinguir una molécula específica entre mil millones de moléculas distintas, lo que se pudo hacer en aquellos años con el detector de captura de electrones (ECD) instrumento, inventado por J. Lovelock.

Coincidente con el surgimiento de la Química Ambiental, se reconocen y consolidan al menos tres nuevos territorios: la Química Organometálica, la Supramolecular y la Nanoquímica. En noviembre de 1973, se entregó el premio Nobel de Química a G. Wilkinson y a E.O. Fisher, por sus investigaciones sobre los compuestos organometálicos tipo “sándwich”. A pesar de que para ese momento ya se contaba con una experiencia en el trabajo de compuestos con enlaces metal-carbón, derivada principalmente de las investigaciones de Frankland en el siglo XIX y, luego en el siglo XX, con los organomagnesianos de V. Grignard y, posteriormente, por los estudios de los antidetonantes de la gasolina (tetraetilo de plomo) y catalizadores (Reppe, Ziegler y Natta, Wilkinson), el terreno no estaba plenamente consolidado.

Desde entonces, esta marginal rama del conocimiento químico, una vez que desde principios del siglo XIX, J.J. Berzelius estableció las fronteras internas de la Química como Orgánica e Inorgánica, no ha dejado de crecer. Se incorporó en los currículos de las carreras de Química en prácticamente todo el mundo, se escribieron libros de texto específicos, se diseñaron prácticas de laboratorio, se fundaron nuevas revistas especializadas (por ejemplo, en 1982, aparecieron *Polyhedron* y *Organometallics*, esta última, una de las diez de Química más citadas en la actualidad).

Durante la quinta revolución, los químicos aprendieron a hacer reacciones en condiciones menos extremas (en términos de presión, temperatura y disolventes) comparadas con las que hasta entonces se utilizaban. Se trataba de acercarse a aquellas condiciones que permiten la vida y que disminuyen la generación de potenciales contaminantes. Cuando la Química se vuelve Biología, las interacciones moleculares son menos intensas y se pueden reconocer agregados moleculares que conforman lo que se denominó Química Supramolecular. Así, el Premio Nobel de Química 1987 fue otorgado conjuntamente a D.J. Cram, J.M. Lehn y C.J. Pedersen “por el desarrollo y uso de moléculas con interacciones estructurales específicas de alta selectividad”. Lehn definió a la Química Supramolecular como la Química más allá de la molécula, conteniendo entidades organizadas de mayor complejidad, que resultan de la asociación de dos o más especies químicas a través de fuerzas intermoleculares.

La Nanoquímica se refiere a la posibilidad de utilizar los conocimientos de síntesis química para construir agregados moleculares de tamaño, forma, composición o superficie específica. Con múltiples aplicaciones en la actualidad, desde Medicina, cosmética o materiales, el origen de la Nanoquímica puede situarse con el descubrimiento del futboleno ( $C_{60}$ ) en 1984 por R.F. Curl, H.W. Kroto y R.E. Smalley, y la posterior síntesis de nanotubos de carbono. Hay una diferencia fundamental entre la Nanoquímica y la Química convencional que consiste en que a la escala de nanómetros ( $10^{-9}$  m) es posible “ver” (a través del Scanning Tunneling Microscope, desarrollado por G. Binnig y H. Rohrer) y manipular (a través del Atomic Force Microscope) átomos aislados o una sola molécula, en lugar de  $N(6.02 \times 10^{23})$  átomos o moléculas, por lo que la frontera entre sustancias orgánicas e inorgánicas desaparece. Además, las moléculas y las macromoléculas, así como los genes y las proteínas, son reconocidas como máquinas que realizan trabajos específicos, en lugar de bloques de materia.

En 1999, recibió el Premio Nobel de Química el egipcio A. Zewail por sus investigaciones en la Femtoquímica, es decir, las reacciones químicas rapidísimas utilizando un instrumento de flash-fotólisis integrado con un láser de Ti-zafiro. En sus propias palabras la Química había llegado al límite de lo posible:

El concepto de átomo, propuesto hace 24 siglos y rechazado por Aristóteles, nació de una idea puramente filosófica, seguramente sin anticipar algunos de los descubrimientos científicos más importantes del siglo XX. Los átomos pueden verse ahora, observarse en movimiento y manipularse. Estos descubrimientos han llevado al mundo microscópico y su lenguaje a una nueva era, y cubrir los dominios de longitud, tiempo y número. La resolución (espacial) de longitud, hasta la escala de distancia atómica (Angstrom,  $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ), y el tiempo de resolución, hasta la escala del movimiento atómico (femtosegundo,  $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ), se han alcanzado.

La cuarta revolución y su corto periodo subsecuente de ciencia normal gestó la quinta revolución permitiendo “ver” del mundo lo que no se había visto antes. Más amplio y más complejo, las fronteras del mismo se pierden. Aparecen al menos cinco nuevas subdisciplinas. La quinta revolución, al igual que la anterior, se caracteriza por cambios significativos en el énfasis de la investigación y la práctica científica, así como en la estructura de las organizaciones académicas y profesionales. Con la firma del Protocolo de Montreal, por cerca de 200 países para controlar la emisión de sustancias fluorocarbonadas a la atmósfera, empieza el tiempo de la responsabilidad mundial, cuyo tema pendiente, el calentamiento global, es el problema más importante de nuestro tiempo, junto con otro, el de la desigualdad. El historiador catalán J. Fontana indicó en 2011:

No está claro que la globalización haya favorecido en una perspectiva de largo plazo la igualdad. Si examinamos el problema de la desigualdad en una perspectiva de larga duración podemos ver que a comienzos del siglo XIX (primera revolución química) los niveles de renta de los países que hoy llamamos desarrollados y de los que consideramos subdesarrollados eran prácticamente equiparables. Comenzó entonces, sin embargo, un proceso gradual de divergencia que no ha hecho más que acentuarse con el paso del tiempo. En 1860 (segunda revolución química), el PNB *per cápita* de los países avanzados no llegaba todavía al doble del de los atrasados; en 1913 (tercera revolución química) era ya más del triple y, en 1950 (cuarta revolución química), era cinco veces mayor. La divergencia ha seguido en las últimas décadas a un ritmo cada vez más acelerado: en 1970, la relación era de uno a siete y, en 1994 (quinta revolución química), el PNB de los países desarrollados era diez veces mayor que el de los atrasados.



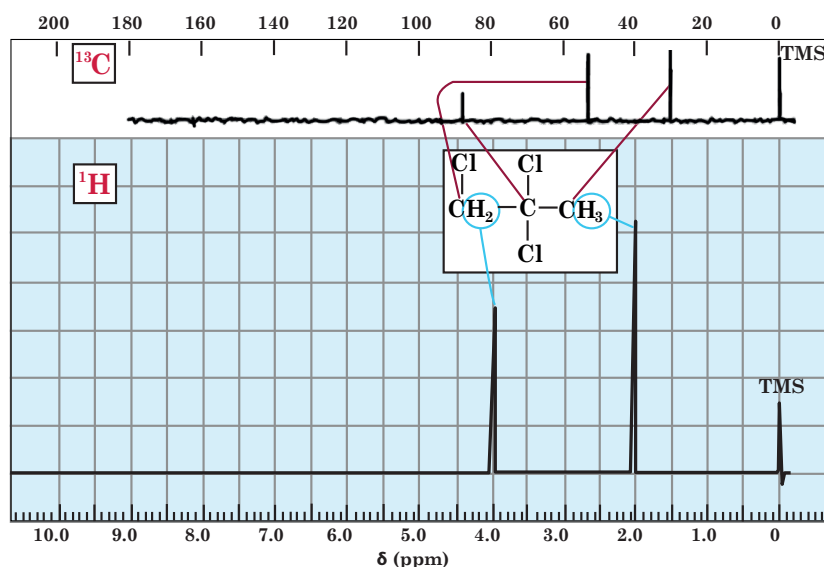
La población humana alcanzó, en el año **2000**, poco más de **6 mil millones** de personas, con una esperanza de vida cercana a los 70 años.

AÑO	HECHOS TECNOQUÍMICOS	HECHOS POLÍTICOS Y CULTURALES
1973	El alemán E.O. Fisher y el inglés G. Wilkinson reciben el Premio <i>Nobel</i> de Química por sus investigaciones en los llamados compuestos "sándwich" (ferroceno o dibencencromo), redefiniendo y ampliando la Química Organometálica.	<ul style="list-style-type: none"><li>• El tiempo de vuelo entre Manchester y Londres es de 25 minutos.</li><li>• Comienzo de la crisis energética mundial con el aumento de los precios del petróleo y el ascenso del islamismo en Irán.</li></ul>
1974	El estadounidense F.S. Rowland y el mexicano, naturalizado estadounidense, M. Molina publican en la revista <i>Nature</i> el artículo que muestra la relación entre el adelgazamiento de la capa de ozono y la presencia de sustancias fluorocarbonadas con información obtenida a través del detector de captura de electrones desarrollado por el inglés J. Lovelock.	<ul style="list-style-type: none"><li>• En 1976, se funda Apple y, en 1985, aparece el sistema operativo Microsoft Windows.</li></ul>
1976	El japonés H. Shirikawa, el norteamericano A. Hegger y el neozelandés A. MacDiarmid sintetizan los primeros polímeros conductores de electricidad por lo que obtendrían, años más tarde, el premio <i>Nobel</i> de Química. En pocas palabras obtienen metales a partir de moléculas.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Con la Guerra de las Malvinas (1982) se estandariza el Internet Protocol Suit que permite el acceso mundial a redes de telecomunicación.</li><li>• En 1986, el Premio <i>Nobel</i> de Física es entregado a los alemanes E. Ruska y G. Binning y al suizo H. Rohrer por el desarrollo de los microscopios electrónicos y de tunelaje de barrido.</li></ul>
1977	Ilya Prigogine, belga de origen ruso, recibe el Premio <i>Nobel</i> de Química por una gran contribución a la acertada extensión de la teoría termodinámica a sistemas alejados del equilibrio, que sólo pueden existir en conjunción con su entorno. Las estructuras disipativas son fundamentales para entender la vida y el tiempo.	<ul style="list-style-type: none"><li>• El mismo año de la caída del muro de Berlín entra en vigor el Protocolo de Montreal, firmado por cerca de 200 países para controlar la emisión de sustancias fluorocarbonadas a la atmósfera (1989).</li></ul>
1984	En la ciudad hindú de Bophal, la fuga de diversos gases, empleados en la fabricación de pesticidas, de la empresa norteamericana Union Carbide causó la muerte a lo largo de los siguientes años de 25 mil personas. Es la mayor catástrofe en la historia de la industria química.	<ul style="list-style-type: none"><li>• A la primera Guerra del Golfo en Iraq, le sigue la abolición del apartheid en Sudáfrica. Ese mismo año, F. Fukuyama publicó el influyente libro <i>El fin de la Historia y el último hombre</i>, donde indicaba el triunfo definitivo del capitalismo (1992).</li></ul>
1987	Los norteamericanos D.J. Cram y C.J. Pedersen junto con el francés J.M. Lehn reciben el Premio <i>Nobel</i> por el desarrollo de la Química Supramolecular. Las máquinas moleculares empiezan a rodar.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Científicos austríacos dirigidos por A. Zeilinger, anunciaron que el C<sub>60</sub> se difracta (1999).</li></ul>
1996	Por el descubrimiento de los fullerenos, moléculas esféricas y nanotubos de carbono, así como por ser precursores de la Nanoquímica, se entrega el Premio <i>Nobel</i> de Química a los norteamericanos R.F. Curl, R.E. Smalley y al inglés H.W. Kroto.	<ul style="list-style-type: none"><li>• El Rock and Roll se consolida como un tipo de música, ya no sólo en inglés, con importantes exponentes en diferentes lenguas.</li></ul>
1998	Los norteamericanos P. Anastas y J. C. Warner publican los principios que establecen la llamada Química Verde que se centra en los enfoques tecnológicos necesarios para prevenir la contaminación y reducir el consumo de recursos no renovables.	
1999	El egipcio A. Zewail recibe el Premio <i>Nobel</i> de Química por su desarrollo de la femtoquímica, aquella que detecta la existencia de sustancias durante cortísimos periodos de tiempo.	

## 7.2 Instrumentos: Resonancia Magnética Multinuclear ( $^{19}\text{F}$ , $^{31}\text{P}$ , $^{13}\text{C}$ , $^{15}\text{N}$ )

Los instrumentos desarrollados durante el breve periodo de “ciencia normal” entre la cuarta y quinta revolución, perfeccionados en los años setenta y ochenta, ayudaron significativamente al desarrollo de la Química Organometálica. Además de la Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de  $^1\text{H}$  introducida y utilizada en la cuarta revolución química, la RMN de  $^{13}\text{C}$  se volvió casi esencial en los laboratorios que investigaban sustancias organometálicas de todo el mundo. Relacionado con el papel desempeñado por J.D. Roberts, uno de los químicos más importantes de CalTech en el desarrollo de este último instrumento, el historiador de la Química Carsten Reinhardt indicó:

La manera común de clasificar el desempeño científico utiliza el de número de citas a los artículos de determinado investigador, las cantidades de fondos que obtiene y el prestigio de los premios que recibe. Los instrumentos ayudan a alcanzar los objetivos de estos científicos, cuando están conectados entre sí para establecer tradiciones de investigación. Los líderes y principales usuarios de instrumentos llegaron a ser, junto con los fabricantes, los puentes indispensables entre la instrumentación de alta tecnología y los programas de investigación química. Al hacerlo, se convirtieron en los primeros motores e innovadores en un mercado científico de citas, subvenciones y reconocimientos. Un líder abría el camino para otros científicos, y lo hacía de manera más eficiente mientras perseguía y aprovechaba el desarrollo y la popularización de instrumentos y métodos.



**Figura 7.1.** Espectro de  $^1\text{H}$  RMN y  $^{13}\text{C}$  RMN del 2,2,3 tricloro propano. En ambos casos se utiliza el tetrametilsilano (TMS) como referencia.

Así, aunque la Resonancia Magnética Multinuclear comenzó a desarrollarse durante el periodo de “ciencia normal” entre las dos últimas revoluciones químicas, es principalmente durante la quinta que se alcanzó un nivel de perfección en la sensibilidad y resolución gracias al trabajo de Richard E. Ernst, Ganador del Premio Nobel de Química en 1991. Su contribución hizo que los instrumentos de resonancia magnética multinuclear con Transformadas de Fourier (FT NMR) fueran indispensables en casi cualquier laboratorio de investigación química en todo el mundo, como puede leerse en el comunicado de prensa de la Fundación Nobel de 1991, titulado *Desarrollos revolucionarios que hacen indispensable una técnica espectroscópica para la Química*:



El Premio Nobel de Química de 1991 ha sido otorgado al Profesor Richard R. Ernst de la ETH de Zurich, por sus importantes desarrollos metodológicos dentro de la espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN). La espectroscopia de RMN que se ha desarrollado durante los últimos veinte años es quizás la técnica de medición instrumental más importante dentro de la Química. Esto se ha producido debido a un aumento dramático en la sensibilidad y la resolución de los instrumentos, dos áreas en las que Ernst ha contribuido más que nadie... Este descubrimiento es la base de la espectroscopia de RMN moderna. El aumento de diez veces, y a veces cientos de veces, en la sensibilidad ha hecho posible estudiar pequeñas cantidades de material, así como isótopos químicamente interesantes de baja aparición natural, como el  $^{13}\text{C}$ . El enorme potencial de la nueva técnica –llamada FT NMR– rápidamente se hizo evidente para los espectroscopistas de RMN. La comunidad de investigación química tuvo acceso a ella a principios de los setenta a través de instrumentos comerciales de NMR de FT. En la actualidad, prácticamente no se fabrican otros tipos de espectrómetros de RMN.

## Detector de Captura de Electrones (ECD)

En 1995, Paul J. Crutzen, Mario J. Molina y F. Sherwood Rowland recibieron el Premio Nobel de Química “por su trabajo en Química Atmosférica, particularmente en lo que se refiere a la formación y descomposición del ozono”. En su discurso de recepción del Premio F.S. Rowland indicó:

El punto de partida para este trabajo fue el descubrimiento por Jim Lovelock de que la molécula  $\text{CCl}_3\text{F}$ , una sustancia para la cual no se encontraron fuentes naturales, estaba presente en la atmósfera terrestre en cantidades aproximadamente comparables a la cantidad total fabricada hasta esa fecha. Lovelock había inventado anteriormente un sistema de detección extremadamente sensible que empleaba la captura de electrones (EC) por trazas de impurezas y lo unió a la columna de gases efluentes de un cromatógrafo de gases (GC), un dispositivo que separa una mezcla de gases en sus componentes individuales. Con este aparato (ECGC), Lovelock estableció inicialmente que la sustancia  $\text{CCl}_3\text{F}$  era siempre detectable en la atmósfera cerca de su casa, en el oeste de Irlanda, y que también estaba presente en todas las muestras de aire probadas en el viaje de la R.V. Shackleton de Inglaterra a la Antártida.

El Detector de Captura de Electrones (ECD) fue inventado y refinado a finales de los años cincuenta por James Lovelock durante su estancia en el Instituto Nacional de Investigación Médica, en Inglaterra, donde fue colega de A. Martin (Premio Nobel de Química en 1952) y T. James, inventores de la cromatografía gas-líquido. Este instrumento fue fundamental en el monitoreo del DDT durante la década de los sesenta y de los fluorocarbonos en los años setenta.

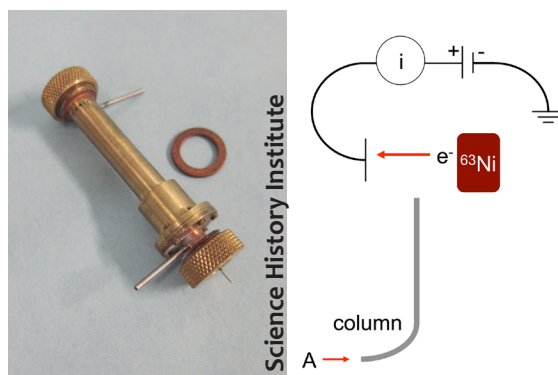


Figura 7.2. Fotografía y esquema del detector de captura de electrones. Ilustración elaborada por Kkmurray, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=37737197>

En un ECD (una cámara cerrada de menos de 2 ml de volumen) se usa una fuente de radiación (inicialmente se usaron trozos de papel de plata que contienen  $^{90}\text{Sr}$ , pero en la actualidad se utiliza  $^{63}\text{Ni}$ ) para bombardear el gas portador (normalmente nitrógeno o argón) que pasa a través de una cámara de ionización, generando así un plasma de iones positivos, radicales libres y electrones. Estos últimos



son recogidos en un colector (electrodo) y, por tanto, pueden establecer una corriente de línea de base estable en presencia de gas portador puro. Cuando una sustancia halogenada penetra junto con el gas portador puede capturar electrones, generando iones negativos de menor movilidad que los propios electrones o fragmentos neutros por recombinación con los iones positivos del plasma generados en el proceso original. Una caída en el potencial detecta la caída en el número de electrones a través de las paredes del ECD, que puede relacionarse cuantitativamente con la cantidad de la sustancia halogenada que pasa a través del detector. La versión final del ECD fue muy sensible, pero sólo para compuestos halogenados con una fuerte afinidad por los electrones. Inicialmente, los experimentos con este instrumento mostraron, por ejemplo, que una pequeña cantidad de tetracloruro de carbono en el sello de silicona era suficiente para sabotear cualquier intento subsiguiente de usarlo. En el año 2000, Lovelock señaló:

Fue entonces, y aún es, el dispositivo analítico más sensible, sencillo y barato en existencia. No es fácil describir la exquisita sensibilidad del ECD. Una forma de imaginarlo es suponer que se derrama una botella de un litro llena de un líquido perfluorocarbonado en algún lugar de Japón sobre una manta y se deja secar en el aire por sí mismo. Con un poco de esfuerzo, podríamos detectar el vapor que se había evaporado en el aire de la manta aquí en Devon, Inglaterra, unas semanas más tarde. Dentro de dos años, sería detectable por el ECD en cualquier parte del mundo.

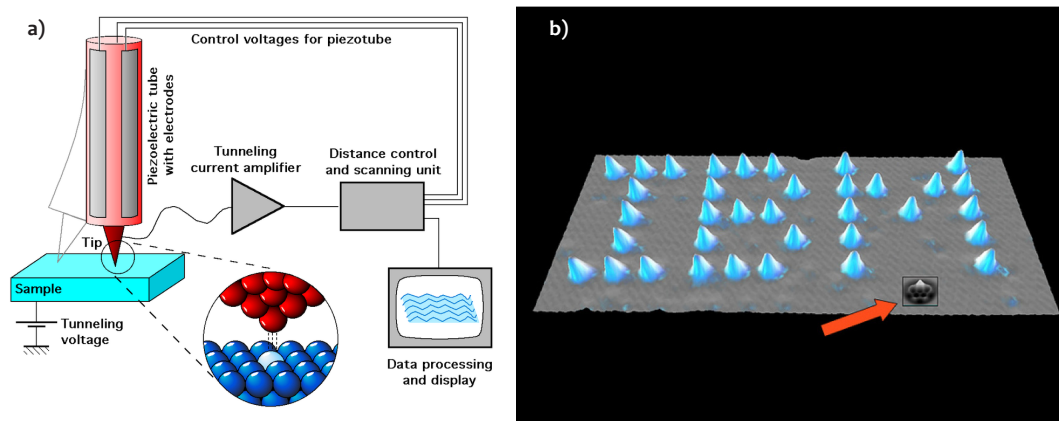
Lovelock ha pasado su carrera como científico independiente desafiando el pensamiento dominante. Es famoso por su hipótesis de Gaia, que sugiere que la Tierra es un sistema autorregulador que permite que la vida exista en el planeta.

Después de una fuerte lucha con la industria química de los clorofluoroalcanos, donde Molina y Rowland jugaron un activo papel, la respuesta política al agotamiento de la capa de ozono fue el Protocolo de Montreal. Firmado en los años ochenta por más de 200 países, fue el primer tratado universalmente ratificado en la historia de las Naciones Unidas. Así que, después de la publicación de *Silent Spring* de Rachel Carson en los años sesenta, la fundación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en Estados Unidos en los años setenta, la Química Verde (Green Chemistry) con sus 12 Principios nació durante la quinta revolución química.

## Microscopio de Barrido de efecto túnel (STM)

**E**l Microscopio de Barrido de efecto túnel (STM) fue inventado en los laboratorios de IBM en Zurich. El problema era la detección de defectos en las juntas de películas de óxido utilizadas en las computadoras de alta velocidad. Henri Rohrer y su estudiante de doctorado Gerd Binnig tuvieron éxito en la localización de pequeñísimos agujeros, investigando las características eléctricas de las películas, desarrollando así el STM. Utilizando una analogía, es posible comparar la lectura Braille al STM. En este instrumento, una punta de metal muy delgada (generalmente hecha de tungsteno o platino-iridio) se aproxima a la superficie de una superficie de material (al menos ligeramente conductora eléctricamente) a una distancia de aproximadamente 1 angstrom, de modo que si se aplica una pequeña diferencia de potencial debido al efecto túnel, se establece una corriente eléctrica débil ( $\sim 1$  nA). La corriente es muy sensible a la distancia entre la punta y el material.

Cuando la punta es desplazada a través de la superficie, la corriente de túnel puede ser detectada con precisión. Por lo tanto, a través de los dispositivos electrónicos apropiados, se obtiene una imagen topográfica de la superficie de la muestra. Usando este instrumento, diferentes superficies de diversos materiales, además de las moléculas adsorbidas en ellos, han sido estudiadas. Además, la manipulación y modificación mediante el ajuste de la distancia de la muestra de la punta o mediante el cambio de la tensión de polarización a través de la unión permiten tomar átomos uno a uno y dibujar diferentes imágenes con ellos.

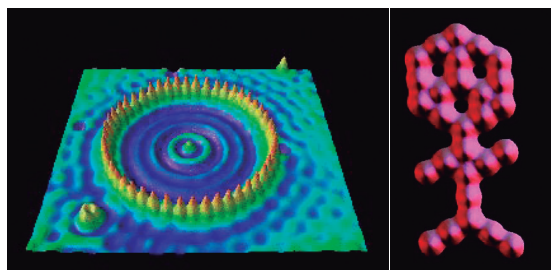


**Figura 7.3.** a) Esquema del funcionamiento del microscopio de barrido de efecto túnel (Autor: Michael Schmid, TU Wien; adaptado del IAP/TU Wien STM Gallery) y b) fotografía con átomos de Xe de la palabra IBM construida con este instrumento a temperaturas cercanas al cero absoluto y presiones de  $10^{-8}$  mbar... para que los átomos estén ¡quietos! (IBM Research - Zurich).

Junto con Ernst Ruska, Gerd Binnig y Heini Rohrer recibieron el Premio Nobel de Física 1986. En la ceremonia de entrega del premio, el profesor Johansson dijo (1986):

El microscopio puede ser considerado como una extensión del ojo humano. Pero la vista no es el único sentido que usamos para orientarnos en nuestro entorno, otro es el tacto. Con la tecnología moderna es posible construir un equipo que se basa en el principio del tacto... El “dedo” puede ser una aguja muy fina que se mueve a través de la superficie de la estructura a investigar. [...] Una superficie de cristal que aparece completamente plana en un microscopio, se ve con este instrumento como una llanura en la que los átomos se levantan como colinas en un patrón regular... Esto es sólo el comienzo de un desarrollo muy prometedor y fascinante. El viejo sueño de la antigüedad de una imagen visible de la estructura atómica de la materia comienza a parecer una posibilidad realista, gracias al progreso en la microscopía moderna.

El Microscopio de Fuerza Atómica (AFM), inventado por Binnig en 1986, es la extensión directa del Microscopio de Barrido de efecto túnel (STM) y es especialmente útil en el estudio de superficies de materiales no conductores. Este instrumento, en lugar de detectar la corriente del túnel entre la punta y la muestra, controla la fuerza (aproximadamente  $0.01 \mu\text{N}$ ) experimentada entre los átomos en el extremo de la punta (hecha de Si o nitruro de silicio) y los átomos de la superficie del material aislante o conductor). Con este instrumento se puede, por ejemplo, cortar y recoger un segmento de ADN.



**Figura 7.4.** Fotografías del corral de 48 átomos de Fe y del hombre de monóxido de carbono (CO), construido con moléculas de este compuesto de 0,5 nanómetros de longitud. Imágenes de IBM Corporation.

# Fotólisis de destello con láser de zafiro-titanio

Aunque hay fenómenos químicos que duran miles de millones de años, los procesos más básicos tienen lugar en pocos femtosegundos ( $1 \times 10^{-15}$  s). La dinámica de la reacción molecular es el núcleo de la Química; sin embargo, el aparato conceptual para describirlos es sorprendentemente pobre comparado con el construido para describir las estructuras. Como indicaron Jörn Manz y Ludger Wötze:

Cuando en 1949, George Porter realizó los primeros experimentos de fotólisis flash con una duración de milisegundos, inició una “carrera contra el tiempo”. ¡En los últimos 40 años, la resolución temporal en la observación de procesos químicos ha aumentado en once órdenes de magnitud! El desarrollo alcanzó en 1987 la resolución de femtosegundos con la observación directa, hecha por Ahmed Zewail, de las reacciones químicas a medida que se producían a lo largo de la trayectoria de reacción, desde los reactivos, pasando por el estado de transición hacia los productos. Este avance fue la culminación de sus investigaciones durante una década y marca el nacimiento de un nuevo campo científico en la interfase entre experimento y teoría, Química y Física, con numerosas aplicaciones que abarcan todas las fases de la materia... la Femtoquímica.

En un experimento de fotólisis de destello, las moléculas originales se colocan en una cámara de vacío y se excitan con un haz de luz instantánea. En los experimentos originales de Porter, el haz era un destello de luz blanca, mientras que en los experimentos de Zewail el haz se producía con un láser de zafiro-titanio. El destello debe ser suficientemente intenso y de duración mucho menor que el tiempo de reacción. El nuevo instrumento (el láser de zafiro-titanio que genera destellos con intervalos de 4 fs) que con todos los otros equipos ópticos y el detector de fluorescencia inducida por láser se convierte en un único instrumento integrado para medir el tiempo requerido para romper y formar enlaces químicos. El haz del láser genera dos pulsos. Con el primero, la molécula se rompe en sus productos. El segundo pulso permite estudiar la molécula original. Controlando el intervalo de tiempo entre los dos pulsos es posible reconocer cuán rápidamente cambia la molécula original.

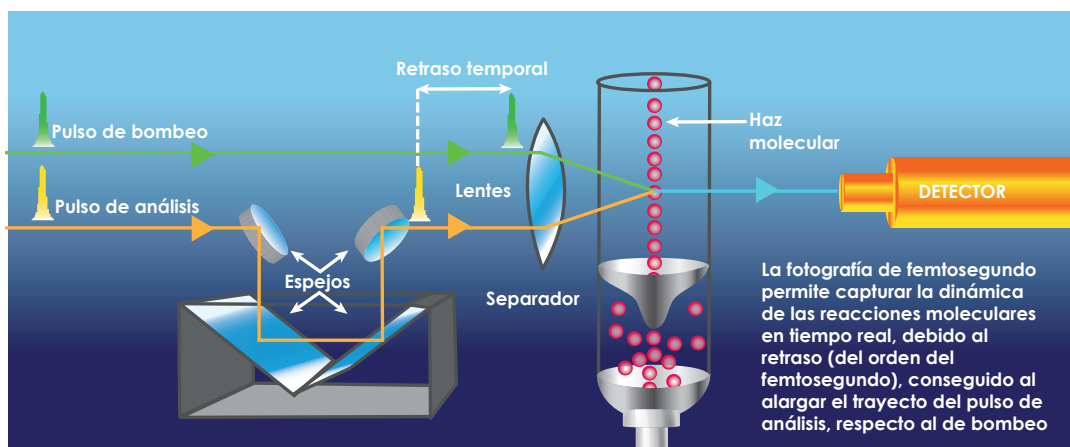


Figura 7.5. Esquema del instrumento de fotólisis de destello de láser de zafiro-titanio empleado por A. Zewail en sus experimentos de femtoquímica (basado en la ilustración de Andres Ginel en [www.blogodisea.com](http://www.blogodisea.com)).

## 7.3 Textos originales

### *Femtoquímica (Fragmento)*<sup>1</sup>



Figura 7.6. Ahmed Zewail (1946-2016).

En la historia de las civilizaciones humanas, la medición del tiempo y el registro de la duración de los acontecimientos, en el mundo natural, son algunos de los primeros esfuerzos que pueden clasificarse como científicos. El desarrollo de los calendarios que permitían el seguimiento de las inundaciones anuales del valle del Nilo en el antiguo Egipto y las estaciones para plantar y cosechar en Mesopotamia, pueden rastrearse hasta el amanecer del lenguaje escrito. Desde entonces el tiempo ha sido un concepto importante y ahora es reconocido como una de las dimensiones fundamentales de la ciencia. El concepto del tiempo encapsula la conciencia de su duración y el transcurrir del pasado al presente y al futuro, y seguramente habrá existido desde el principio con comunidades humanas que buscaban el sentido del nacimiento, la vida y la muerte, y en algunas otras, en el renacimiento o la recurrencia.

[...] Hasta cerca del año 1800 de nuestra era, la habilidad para registrar el tiempo de cada uno de los pasos individuales de cualquier proceso estaba esencialmente limitado a escalas de tiempo susceptibles a la percepción sensorial directa; por ejemplo, la habilidad de los ojos para ver el movimiento de las manecillas de un reloj, o la del oído para reconocer un determinado tono. Algo más fugaz que el parpadeo de un ojo ( $\sim 0.1$  s) o la respuesta del oído ( $\sim 0.1$  milisegundo) estaba más allá del ámbito de investigación. En el siglo XIX, la tecnología cambió drásticamente alcanzando a registrar tiempos cada vez menores. Las famosas fotografías de Eadweard Muybridge, en 1878, de un caballo galopando, de Étienne Jules Marey, en 1894, de un gato cayendo y de Harold Edgerton, a mediados de los 1900, de una bala atravesando una manzana y otros objetos son ejemplo de este desarrollo pasando de resoluciones temporales de milisegundos a microsegundos, utilizando fotografía instantánea, cronofotografía y estroboscopia respectivamente. A partir de 1980, este nivel de resolución se incrementó en diez órdenes de magnitud alcanzando la escala de los femtosegundos, la escala de los átomos y las moléculas en movimiento.

El movimiento de los átomos y las moléculas involucrados en una reacción química nunca antes se había observado en tiempo real a pesar de la rica historia de la Química transcurrida en los últimos dos milenios, que pasó de khemia a kemia, luego alquimia y eventualmente Química (ver el papiro de Estocolmo). Los enlaces químicos se rompen, se forman o cambian de geometría con extraordinaria rapidez. Ya sea en sustancias aisladas o en cualquier fase, estas transformaciones ultra-rápidas son un proceso dinámico que involucra el movimiento mecánico de núcleos atómicos y electrones. La velocidad del movimiento de los átomos es  $\sim 1$  km/s y cuando se trata de registrar ese movimiento a escala atómica, es decir, a distancias de ångström, la velocidad promedio es  $\sim 100$  fs. Ese movimiento atómico en

<sup>1</sup> Zewail, 1999.

reacciones que se desarrollan pasando por sus estados de transición es el campo de la femtoquímica. Cuando se tiene una resolución temporal de fs se pueden “congelar” estructuras lejos del equilibrio previamente a sus movimientos vibracionales o rotacionales y de reacción. Las preguntas pertinentes acerca de la dinámica del enlace químico son las siguientes: ¿de qué manera la energía colocada en las moléculas de los reactivos se redistribuye entre los diferentes grados de libertad y qué tan rápido esto sucede?; ¿cuál es la velocidad de los cambios químicos que conectan los estados cuánticos individuales en los reactivos y los productos?; ¿cómo es el movimiento nuclear preciso que lleva a la reacción a través de su estado de transición y qué tan rápido es? Como lo ha indicado Jim Baggett: “la historia completa de la dinámica de las reacciones químicas y la cinética se ha escrito dando diferentes respuestas a estas tres preguntas”.

En la femtoquímica, los estudios de los cambios físicos, químicos o biológicos son al nivel temporal de las vibraciones moleculares: es decir, de los movimientos nucleares. En este sentido la femtoquímica representa el fin de la carrera contra el tiempo... “alcanzando el final del camino”. Por la misma razón, Martens dijo: “toda la química es femtoquímica”. Los efímeros estados de transición, identificados en el pasado por los paréntesis [ET]‡ indicando su elusividad pueden ahora ser registrados como una especie molecular ET‡. Además, en esta escala de tiempo, la descripción coherente dependiente del tiempo de una trayectoria mono-molecular representa la “clásica película” del movimiento nuclear a través de su estado de transición para llegar, de los reactivos a los productos. La escala de tiempo de los femtosegundos es única para la creación de esas ondas de materia coherentes a distancias atómicas, un problema anclado en el desarrollo de la mecánica cuántica y la dualidad de la materia.

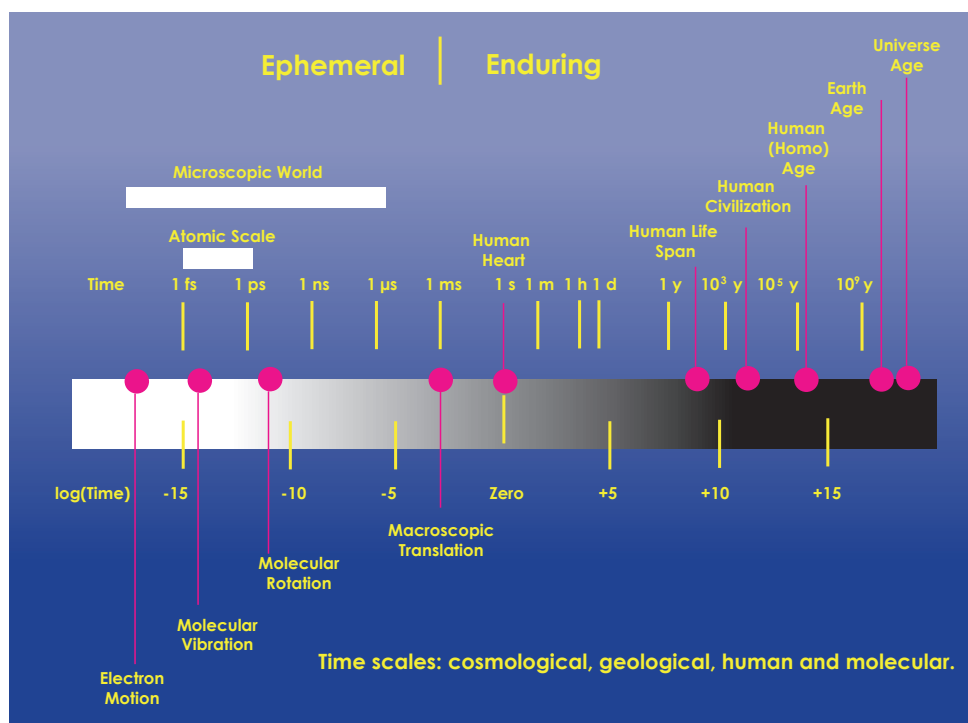


Figura 7.7. Escalas de tiempo cosmológicas, geológicas, humanas y de eventos moleculares. La escala de tiempo se extiende más de treinta órdenes de magnitud, del Big Bang a la era femto.

[...] Hace veinticuatro siglos, el filósofo griego Demócrito con su maestro Leucipo iniciaron lo que entonces sería una nueva manera de pensar acerca de la materia invisible y de su entidad elemental, el átomo. Richard Feynman contestó a la pregunta, si usted tuviera que reducir a una oración el descubrimiento científico más importante de toda la historia ¿cuál sería? Él dijo: “todo está hecho de átomos”. El atomismo de Demócrito, rechazado por Aristóteles, nació únicamente del pensamiento filosófico, con certeza, sin anticipar algunos de los descubrimientos más importantes del siglo XX. Ahora los átomos pueden verse, observarse en movimiento y manipularse. Estos descubrimientos han traído el mundo microscópico y su lenguaje a una nueva era que abarca la longitud, el tiempo y el número. La resolución de la longitud (espacial) ha alcanzado la escala atómica (ångström) y la resolución temporal ha llegado al movimiento atómico (femtosegundos). La captura de un único ion (electrón) también se ha conseguido. Todo lo anterior hecho merecedor de sendos premios *Nobel* a sus descubridores.



## Homenaje a Gaia (Fragmento)<sup>2</sup>



Figura 7.8. James Lovelock (1919-).

Me gusta mucho el campo, en particular la costa marina, pero soy un científico y sé que si queremos vivir bien en la Tierra, lo primero que debemos hacer es entenderla. Los mejores científicos ambientales saben tan poco de la Tierra como los mejores médicos en la batalla de Waterloo sabían de los cuerpos heridos de sus soldados. Tratamos de hacerlo mejor, pero las ciencias son lentas en encontrar las respuestas. Ayuda el tener en cuenta que la arrogante certeza es la antítesis de las ciencias.

[...] El tiempo y el clima que conocemos proviene de nuestro contacto insustancial con ese gas que es el aire; su capacidad de almacenar el calor que nos llega del sol es 3 mil veces menor que la capacidad del océano.

El agua es, con mucho, la sustancia más importante que hay en la Tierra. Sin ella no contaríamos con la vida orgánica y el clima sería un poco menos caliente que el de Venus. No podemos ignorar el clima de los océanos cuando tratamos de calcular la temperatura de la Tierra. Los mares almacenan el calor de manera sutil y en sus capas más profundas su temperatura puede ser de 4°C.

[...] La historia de Gaia es un drama en desarrollo y mi agradecimiento a aquellos que han participado en el mismo [...] Carl Sagan, Dian Hitchcock y Louis Kaplan – todos entonces en el Jet Propulsion Laboratory– fueron los primeros en oír con interés mi idea de que de alguna manera la vida en la superficie de la Tierra regulaba la Química atmosférica... una mención especial merece el novelista y Premio Nobel, William Golding quien le dio nombre a mi teoría. Particular reconocimiento a mi amiga Lynn Margulis quien me acompañó en el desarrollo de Gaia desde 1971. Ella aportó la “carne biológica” en mi “esqueleto fisicoquímico”. Lo peor que le puede suceder a una nueva teoría es que sea ignorada, por ello agradezco la fuerte e incluso mordaz crítica del microbiólogo Ford Doolittle y de Richard Dawkins [...] y también quedo endeudado con Sir John Cornforth.

[...] La vida hace más que adaptarse a la Tierra, la cambia y la evolución es una danza estrecha entre la vida y su entorno de la cual emerge esa entidad que es Gaia.

[...] Mientras yo apenas estaba experimentando con mi instrumento, otros e importantes científicos lo usaron en el análisis de residuos de pesticidas en los alimentos [...] estableciendo una base de datos sobre su distribución global, encontrando que algunos de ellos como el DDT y el dieldrin se encontraban en cualquier lugar y en todos los seres vivos. Con esta información, Rachel Carson escribió su libro *La Primavera Silenciosa* en el que prevenía al mundo de las últimas consecuencias del uso de estas sustancias por los agricultores. Este importante libro cambió el curso de la política y en muchos lugares su sombrío pronóstico de una primavera silenciosa se volvió realidad. Aunque no, como ella lo predijo, resultado del envenenamiento por los pesticidas, sino por la destrucción de muchos ecosistemas.

---

<sup>1</sup> Lovelock, 2000.



Cuando oí por primera vez sobre este uso del detector de captura de electrones me enorgullecí. Compartía con Rachel Carson la preocupación sobre el daño que a la vida silvestre y los ecosistemas naturales podían producir diferentes sustancias. Algunos sectores de la industria química reaccionaron en forma tonta y vergonzosa intentando desacreditarla como persona. Sucedió lo contrario, ya que la convirtieron en la primera santa y mártir del naciente e inocente Movimiento Verde.

En la medida en que el ambientalismo se desarrolló, las ideas de Carson y sus datos fueron corrompidos. No quiero decir que los datos obtenidos fueran falsos, pero una vez que el detector de captura de electrones es tan sensible puede detectar cantidades completamente triviales de pesticidas y de otras sustancias químicas. Antes de que se usara el detector de captura de electrones en ese asunto hubiera sido fácil y conveniente ajustar el cero al menor nivel permisible de residuos de pesticidas en los alimentos. En la práctica cero significa la menor cantidad posible que puede ser detectada. Una vez que se empezó a usar el detector de captura de electrones, el cero como límite inferior resultó tan pequeño que aceptarlo absolutamente significaría el rechazo de cualquier alimento. Hasta los vegetales “orgánicos” sin abonos industriales o las frutas y la vegetación silvestre contiene niveles detectables de pesticidas, así de sensible es el instrumento.

Necesitamos sentido común y aceptar la sabiduría de Paracelso, quien dijo hace ya mucho tiempo “La dosis es el veneno”. Inclusive el agua es venenosa en exceso. Hasta los mortíferos gases nerviosos no representan ningún peligro al nivel de picogramos, cantidad fácilmente detectable por el detector de captura de electrones. Desafortunadamente, el sentido común es un bien escaso.

[...] Una de las muchas razones por las que considero al Movimiento Verde con una mezcla de despecho y afecto es su obsesión con los productos de las industrias química y nuclear. Para muchos “verdes” si sustancias como el yoduro de metilo o el disulfuro de carbono provienen de una satánica fábrica son por naturaleza diabólicas, pero si provienen de una granja “orgánica” o de algas marinas serán buenas y saludables. Para mí como científico, no importa el origen; me enveneno si ingiero mucho de ello. La estricnina o el cianuro de sodio no son menos venenosos si provienen de una planta silvestre o de una granja “orgánica” que de un laboratorio químico. Las sustancias más venenosas de todas son las toxinas provenientes de microorganismos y plantas: las botulinas de las bacterias y la ricina y la faloidina de aceite vegetal y setas [...] Me gustaría que los “verdes” crecieran y olvidaran esas verdades simplistas de sus tiempos estudiantiles. Es natural entre los jóvenes desconfiar de las industrias y de sus motivos de lucro, pero cuando nos volvemos consumidores, todos estamos explotando la Tierra.

[...] Soy científico y agnóstico, pero también un animal que quiere vivir exclusivamente en el mundo intelectual de la ciencia moderna.

[...] Los placeres de la ciencia están en la mente, pero la poesía y la música mueven también nuestros corazones. No importa qué tanto y qué tan bien divulguemos la ciencia, no triunfaremos: no sólo es extraña y antinatural, sino que también provisional. Su verdad y respetabilidad depende de su honesta capacidad de aceptar que nunca estará segura acerca de nada.

[...] Todavía somos animales que estamos evolucionando, carnívoros tribales. Nuestro pensamiento independiente e imaginación es superficial; lo que nos dirige son sentimientos de hambre, amor, odio, miedo y los mensajes de nuestros sentidos. Lo anterior no es tan malo como el comentario de Bertrand Russell: “el hombre promedio prefiere enfrentar la muerte o la tortura que pensar”, pero los sentimientos predominan. Porque somos animales tribales respetamos las jerarquías y seguimos a los líderes. Tenemos un instinto, quizás genético, de necesitar un líder de la tribu: alguien a quien temer, adorar o seguir sin preguntar, y si es necesario, morir por él.

## 7.4 Experimentos

### Síntesis de ferroceno, el inicio de la Química Organometálica moderna

Una de las recompensas más emocionantes de la investigación en Química resulta en la obtención por serendipia de nuevos compuestos capaces de abrir nuevos campos de investigación. Tal es el caso de los investigadores T.J. Kealy y P.L. Pauson, que al tratar de preparar fulvaleno por oxidación del bromuro de ciclopentadieno de magnesio con cloruro férrico anhidro, del que obtuvieron por casualidad y sin saberlo, un compuesto organometálico, de color anaranjado que presentaba una elevada estabilidad térmica, una moderada inercia frente al oxígeno y una remarcable estabilidad frente a ácidos y bases; el cual creyeron era un simple dialquilo de fórmula  $\text{FeC}_{10}\text{H}_{10}$ .

La publicación en una revista de investigación de esta reacción causó, sin embargo, intriga en otros grupos de investigadores encabezados por científicos como: Ernst O. Fischer, Geoffrey Wilkinson y el entonces reciente premio Nobel Robert B. Woodward. Los resultados de todas las investigaciones llevaron a una nueva propuesta sobre la estructura de este nuevo compuesto anaranjado, el cual no consideraban fuese un simple dialquilo. Woodward junto con su grupo de investigación bautizaron con el nombre de ferroceno a este nuevo compuesto, pues lograron mostrar su semejanza en aromaticidad con el benceno; en los trabajos realizados en conjunto con el equipo de G. Wilkinson, se demostró mediante estudios de espectroscopia de infrarojo que la estructura molecular del ferroceno era tipo “sándwich”.

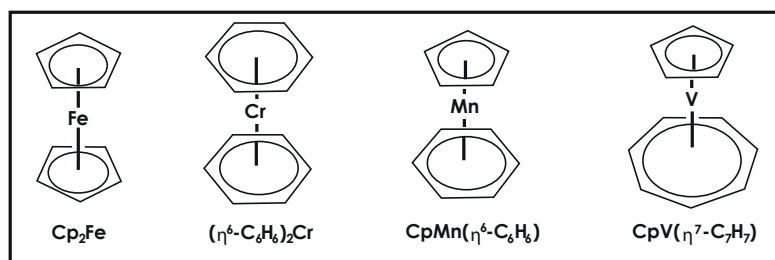


Figura 7.9. Diversos compuestos “sándwich”. Wilkinson y Fisher obtuvieron el premio Nobel de Química en 1973, particularmente, por su investigación en los dos primeros, el ferroceno y el dibencencromo.

La influencia que tuvieron los trabajos de E. Fischer, G. Wilkinson y R. Burns Woodward en el descubrimiento de estas nuevas estructuras e interacciones químicas, resultó con el inicio de la Química Organometálica moderna.

#### Materiales y sustancias sugeridos\*

- |   |                                   |  |
|---|-----------------------------------|--|
| - 1 matraz de bola de dos bocas de 100 mL | - 2 pinzas de tres dedos con nuez | - 1 mortero con pistilo                              |
| - 1 espátula                              | - 1 filtro Büchner                | - 1 matraz Schlenk de 100 mL                         |
| - 1 agitador magnético                    | - 1 jeringa de 25 mL              | - 2 vidrios de reloj                                 |
| - 1 vaso de precipitados de 100 mL        | - papel filtro                    | - 50 mL de biclopentadieno                           |
| - 1 llave de paso esmerilada              | - 1 jeringa de 1 mL               | - 4.5 g de KOH molido                                |
| - 1 pipeta de 10 mL                       | - 1 probeta de 10 mL              | - 1.3 g de $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ |
| - 1 soporte universal                     | - 2 agujas de acero inoxidable    | - 15 mL de HCl 6M                                    |
| - 2 Parrillas con agitación magnética.    | - 1 agitador de vidrio            | - 20 g de hielo                                      |
| - 1 matraz Kitasato de 100 mL             | - 2 tapones de hule reversible    | - 10 ml de dimetilsulfóxido (DMSO)                   |
|   | - 1 cánula de acero inoxidable    | - 15 mL de tetrahidrofurano (THF)                    |

\* Éste es, sin duda, el experimento más complicado del presente texto. Actualmente, forma parte de las prácticas experimentales de los cursos de Química Organometálica en la Facultad de Química y se incorpora con un ejemplo de los materiales y procedimientos que se utilizan en la Química contemporánea.

### Un procedimiento posible

1. Moler 4.5 g de KOH lo más rápido posible y transferir el sólido a un matraz de 100 mL de dos bocas, una debe tener una llave de paso esmerilada y un agitador magnético.
2. Tapar una de las bocas con un tapón de hule reversible y purgar el sistema por triplicado.
3. Bajo nitrógeno, agregar 15 mL de THF mediante una jeringa e iniciar la agitación. Utilizando una jeringa agregar a la mezcla anterior 1 mL de ciclopentadieno recién destilado y agitar vigorosamente. Dejar la suspensión en agitación por 30 minutos o hasta que la coloración permanezca constante.

En atmósfera de nitrógeno preparar una disolución de 1.3 g de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  en 10 mL de DMSO. Transferir lentamente (aproximadamente 10 minutos) la solución de  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  a la mezcla de reacción bajo nitrógeno utilizando una jeringa.

4. Dejar la reacción en agitación por 30 minutos.
5. Suspender la agitación y verter la mezcla de reacción en un vaso de precipitados de 100 mL que contenga 15 mL de HCl 6M y 20 g de hielo. Agitar manualmente para que todo precipite.
6. Filtrar al vacío el precipitado obtenido y lavar con 2 porciones de 5 mL de agua, secar el producto y pesarlo para obtener el rendimiento.

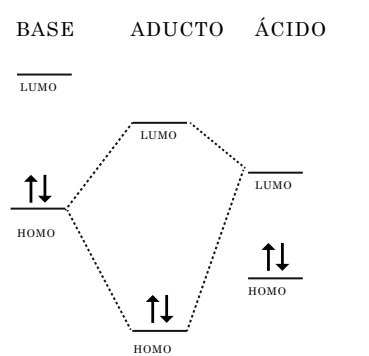
## 7.5 La reacción química. Ácidos y bases

El modelo de orbitales moleculares, creado durante la cuarta revolución por Mulliken y desarrollado en el subsiguiente periodo de ciencia normal por Hoffmann y Fukui (galardonados con el Premio Nobel de Química en 1981), era el único capaz de explicar las propiedades ácido base de especies tan disímiles como los carbocationes de Olah, los aniones de cúmulos metálicos (o del  $C_{60}$ ) o aductos como el  $[Ag\text{-benceno}]^+$ , el  $Ni(C_2B_9H_{11})_2$ , muchos de ellos sintetizados y/o caracterizados durante la quinta revolución.

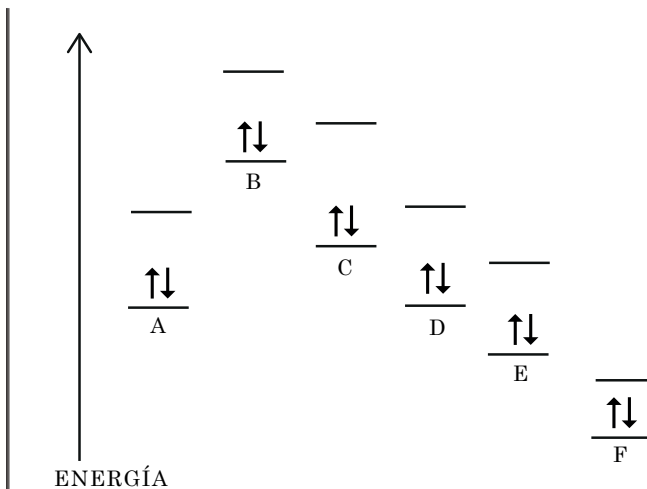
De acuerdo con el modelo de orbitales moleculares y empleando la nomenclatura desarrollada por Fukui de orbitales moleculares frontera, en la que se reconoce el papel central de estos orbitales en el inicio de las reacciones químicas, se tiene que:

- Un ácido, un aceptor de electrones en el antiguo sentido de Lewis, es una especie que emplea un orbital molecular desocupado de baja energía (LUMO por sus iniciales en inglés, *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) para iniciar una reacción y formar un aducto.
- Una base, un donador de electrones en el antiguo sentido de Lewis, es una especie que emplea un orbital molecular ocupado por dos electrones apareados, de alta energía (HOMO por sus iniciales en inglés, *Highest Occupied Molecular Orbital*) para iniciar una reacción y formar un aducto.

Estas definiciones reconocen que son las moléculas las que reaccionan unas con las otras (así sean las moléculas mononucleares, es decir, los átomos) y que son las propiedades moleculares (los HOMO y LUMO correspondientes) las que definen esa reactividad para la formación de un aducto. Así el HOMO de la base, en el que se sitúan dos electrones, interactúa con el LUMO del ácido para formar dos nuevos orbitales moleculares uno de los cuales, el de menor energía (HOMO) se encuentran ya en el aducto, como se puede ver en la **Figura 7.10**.



**Figura 7.10.** Representación de la formación de un aducto a partir del HOMO de la base con el LUMO del ácido. Cada orbital molecular puede albergar hasta dos electrones. En el caso de los radicales tienen solamente uno (SOMO por sus iniciales en inglés, *Single Occupied Molecular Orbital*).



**Figura 7.11.** Representación de la relativa naturaleza de las especies químicas como ácidos o bases dependiendo de la energía de los HOMOS y LUMOS de contra quienes reaccionen.

Un asunto muy importante es que la naturaleza de una especie como ácido o base ya no es absoluta, sino que depende de contra quien reaccione. Así en la **Figura 7.11**, observando los HOMO y LUMO de las diferentes especies representadas, la hipotética especie A es un ácido contra B y C, pero una base contra E y F.

A través del modelo de orbitales moleculares se pueden interpretar diversas especies químicas, como los radicales, los que a través de su SOMO (*Single Occupied Molecular Orbital*) presentan una gran reactividad, o a las involucradas en las reacciones de óxido-reducción, que aquí no son otra cosa que reacciones ácido-base en las que la donación de electrones es prácticamente completa.

## Industria y medio ambiente

# Medicamentos

Desde la segunda revolución química, muchas de las compañías de colorantes europeas se van transformando en farmacéuticas. Al final de la quinta revolución, más de la mitad de la investigación mundial en medicamentos se realiza en Estados Unidos y sólo una de cada 10 mil sustancias se comercializan. Algunos de los acontecimientos más importantes en el desarrollo de la industria de los medicamentos en este corto periodo fueron:

- En Estados Unidos se funda Genentech, la primera compañía que utiliza la tecnología del ADN recombinante. Se inicia y generaliza el uso de la Química combinatoria para el diseño de medicamentos. Pfizer lanza al mercado el Viagra y el Lipitor (estatina), ambos enormes éxitos comerciales.
- En Suiza, tres compañías de este país, Ciba, Geigy y Sandoz se fusionan en la que hasta ese momento fue la integración empresarial mundial más grande de la historia creando Novartis.

En todas las fases que constituyen el medio ambiente (agua, aire y suelo) se han detectado residuos de medicamentos de diversa índole: hormonas, antibióticos, anticancerígenos, antidepresivos provenientes tanto de uso humano como veterinario. Aproximadamente, el 60% de la dosis de un medicamento administrado por vía oral se excreta como sustancia activa en la orina de los animales y los seres humanos. Una parte importante de los medicamentos se desecha a través de los lavabos e inodoros. Una vez en el medio ambiente, los medicamentos se van transformando y desplazando de una fase a otra. Algunos de los que quedan en aguas residuales pueden resistir tratamientos de purificación. Los que se disuelven en grasas, por ejemplo, pueden además acumularse en el tejido adiposo de los animales e introducirse en la cadena alimentaria. Sin embargo, en general, su persistencia en el medio ambiente es baja, lo que no excluye que la de algunos en particular no lo sea. Por ejemplo, en la India se pudo establecer que el descenso de la población de buitres fue debido al envenenamiento por el analgésico diclofenaco, detectado en los cadáveres de los que se alimentaban estas aves.

Hasta el final de la quinta revolución, el proceso de autorización de medicamentos en Europa no incluía una evaluación de impacto ambiental. Tampoco se había considerado la evaluación de los riesgos de los suelos contaminados o de la transferencia de residuos a animales destinados al consumo humano. En Europa sólo se han detectado antibióticos de uso veterinario en muy bajas concentraciones en los productos lácteos.



## 7.6 Autoevaluación

Consta de dos partes. La primera consiste en responder las preguntas que se hacen sobre las cinco secciones en las que está dividido cada capítulo. A continuación se presenta una tabla en donde se puede cotejar qué porcentaje del total se contestó.

Actividad	Autoevaluación Actividades resueltas / total de actividades por sección
1. Acontecimientos	
2. Instrumentos	
3. Textos originales	
4. Experimentos	
5. Ácidos y bases	
TOTAL	/

La segunda parte es una pequeña investigación. Para ello, con lo que aprendieron de la quinta revolución química construyan una pregunta abierta y contéstela empleando para ello un diagrama heurístico y finalmente evalúenlo. La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se presentan y ejemplifican en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico. Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

### 1. Acontecimientos

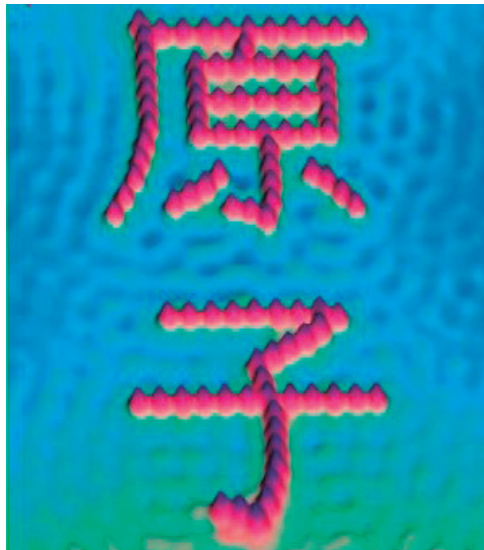
- Reconoce el contexto político-cultural del desarrollo de la quinta revolución, identificando al menos tres acontecimientos no indicados en la tabla.
- Amplía brevemente tu conocimiento sobre las contribuciones de los protagonistas principales de la quinta revolución química al saber presente. Investiga cuál o cuáles de sus aportaciones no son válidas hoy en día.
- Identifica las obras, los movimientos y/o corrientes artísticas y filosóficas a los que pertenecen los artistas y filósofos indicados.

### 2. Instrumentos

- Una de las moléculas responsables de la destrucción de la capa de ozono y detectada por el ECD es el Freón-12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) el cual se utilizaba en aerosoles, combustibles y refrigerantes. Se sabe que cada molécula de Freón-12 que llega a la estratosfera (capa donde se tiene la mayor concentración de ozono) destruye 100 mil moléculas de ozono. Si en un frasco de aerosol se tuvieran 0.001 g de Freón-12, ¿cuántas moléculas de ozono se destruirían si se utilizara, es decir, se arrojara a la atmósfera todo el aerosol?
- Sólo para tener una idea de la velocidad de las reacciones que se estudian a través de la fotólisis de destello, ¿cuántos femtosegundos tarda la luz en atravesar una molécula de  $\text{C}_{60}$ ?



- La siguiente imagen de STM representa 100 átomos de Fe sobre una superficie de Cu arreglados como dos caracteres kanji que juntos significan átomo. Si el diámetro de un átomo de Fe es de 248 pm, ¿cuál es la longitud (en nm) del rectángulo central del signo superior?



### 3. Textos originales

- Construye una RAT cuya conclusión sea: *Soy científico y agnóstico, pero también un animal que quiere vivir exclusivamente en el mundo intelectual de la ciencia moderna.*
- Identifica eventos (de preferencia) químicos que sucedan en s, ms,  $\mu$ s, ns, ps, fs.
- La hipótesis de Gaia ha sido muy controvertida. Identifica al menos una premisa que la sostenga y otra que la contradiga.

### 4. Experimentos

1. ¿Qué reacción se está llevando a cabo? Escribe la reacción completa y balanceada.
2. ¿Por qué se debe preparar la solución bajo atmósfera inerte?
3. ¿A qué se debe la coloración en la solución obtenida?

### 5. Ácidos y bases

1. Indica qué especies químicas pueden corresponder al ácido y la base en la primera figura.
2. Ejemplifica las especies A-F en la segunda figura.
3. Ejemplifica con las especies químicas adecuadas lo que se dice en el siguiente párrafo:

A través del modelo de orbitales moleculares se pueden interpretar diversas especies químicas, como los radicales, los que a través de su SOMO (*Single Occupied Molecular Orbital*) presentan una gran reactividad, o a las involucradas en las reacciones de óxido-reducción, que aquí no son otra cosa que reacciones ácido-base, en las que la donación de electrones es prácticamente completa.

# Conclusiones

*No hay duda que nuestras actividades están influyendo en los parámetros que determinan el clima de la Tierra, no hay duda que nuestras actividades están consumiendo los combustibles fósiles que tardaron millones de años en producirse, no hay duda de que nuestras actividades están acabando con el agua de los acuíferos, con los peces en el mar, con los rendimientos de la tierra, etcétera.  
¿Por qué no estamos modificando ya, a toda velocidad, nuestros hábitos, para atenuar todas estas tendencias?  
¿De dónde sale esa tendencia a creer que el mundo es infinito?*

**C. Amador, 2010**

La caracterización de la Química en *La Enciclopedia* de Diderot, documento que simboliza la Ilustración y que con personajes como Black, Lavoisier o Dalton, instrumentos como la cuba hidroneumática o la balanza y el átomo como entidad identitaria marcan el inicio de nuestra disciplina, resulta al final del trayecto poco menos que paradójica:

Los químicos son todavía un pueblo distinto, no muy numeroso, que tiene una lengua propia, sus leyes particulares, sus misterios y que vive prácticamente aislado en medio de un pueblo más grande, que muestra poca curiosidad por sus asuntos y que no espera casi nada de su industria.

El texto en *La Enciclopedia* sigue acertando al final del siglo XX y a principios del XXI, en lo que respecta a la lengua propia, el aislamiento, los misterios y su reducido tamaño, pero se equivoca sobre su industria. La faz del planeta ha cambiado en buena medida por las actividades que realizó, realiza y realizará la industria química. Pero la industria química en la mejor aproximación tecnocientífica la construyeron y operan hoy los químicos en sus diferentes variedades: ingenieros, farmacéuticos, metalúrgicos, biotecnólogos, etc. Todos ellos, ya sea analizando o, como lo hacen la mayoría, sintetizando nuevas sustancias, han venido creando un espacio artificial que la industria química ha vuelto planetario.

Dos ideas hay que rescatar de este trayecto:

1. Una sustancia química es lo que es, independientemente de su origen. Las sociedades humanas, lo son, porque rodeadas de materiales, son artificiales.
2. Vivir, y hoy los humanos viven más que nunca antes... ¡también gracias a la Química! ... rodeados de contaminantes, conservadores, alimentos preparados, medicinas y otras muchas más sustancias químicas, es un riesgo... como lo ha sido siempre.

En general, a los químicos nos importa poco nuestra historia. Sin embargo, cuando una comunidad renuncia a recordar por su propia cuenta el relato del pasado, del suyo propio, abdicando a reconocer aquellos eventos que deben formar parte de la memoria colectiva de esa comunidad, esta imagen del pasado, y por qué no, la del presente y el futuro, es construida por otros. Con ello y como diría el filósofo español Ortega y Gasset, el que vence “hace mundo, y es ese mundo configurado por los vencedores el que se trataría en todo caso de transformar”. Conocer la historia de la Química, reconocer sus aciertos y sus errores, sus complejidades y sus dilemas éticos, su responsabilidad o su irresponsabilidad es un acto de defensa identitaria en un mundo en transformación. Es una gran tarea.

*Quizá nuestra tierra, quizá la humanidad  
lleguen también a una meta ignorada  
que se habrán creado para sí mismas.  
Ninguna mano nos dirige, ningún ojo ve en nuestro lugar;  
el timón se ha roto hace ya mucho tiempo o,  
mejor, nunca ha existido: está aún por hacer.  
Es una gran tarea y es nuestra tarea.*

**J.M. Guyau, 1884**

# Bibliografía

- Achinstein P. (2001). Who really discovered the electron? In Buchwald J.Z. & Warwick A. (eds.) *Histories of the Electron. The Birth of Microphysics*. The MIT Press: Cambridge.
- Agar J. (2012). *Science in the Twentieth Century and Beyond*. Polity Press: Cambridge.
- Aldridge S., Johnston J., Osborne C. (2000). *Cutting Edge Chemistry*. RSC: London.
- Amador C. (2010). *El Mundo Finito. Desarrollo sustentable en el siglo de oro de la humanidad*. UNAM-FCE: México.
- Anastas P.T. and Williamson T.C. (eds) (1996). *Green Chemistry: design chemistry for the environment*, vol. 626 ACS Symposium Series. American Chemical Society: Washington.
- Aston F.W. (1933). *Mass-spectra and isotopes*. Edward Arnold & Co.: London.
- Baird D. (2004). *Thing Knowledge. A philosophy of Scientific Instruments*. University of California Press: Berkeley.
- Baird D. and Shew A. (2004). Probing the History of Scanning Tunneling Microscopy. In: Baird D., Nordmann A., & Schummer J. (eds) *Discovering the Nanoscale*. IOS Press: Amsterdam.
- Basante A. (2016). *Química Experimental Histórica*. Tesis de Licenciatura en Química, Facultad de Química-UNAM: México.
- Bensaude-Vincent B. and Simon J. (2008). *Chemistry-The impure science*. Imperial College Press: London.
- Bourdieu P. (2003). *El oficio de científico*, Anagrama, Barcelona.
- Boyle R. (2012) *El químico escéptico*, Crítica, Barcelona.
- Brock W. H. (1998). *Historia de la Química*, Alianza Editorial, Madrid.
- Bud R. & Warner D.J. (1998). *Instruments of Science. An Historical Encyclopedia*. The Science Museum, London and The National Museum of American History, Smithsonian Institution: New York & London.
- Cannizzaro S. (1910) *Sketch of a Course of Chemical Philosophy*, Alembic Club Reprints 18, Simpkin, Marshall, Hamilton, Kent & Co Ltd, London.
- Cartwright J. (2000). *From Phlogiston to Oxygen*. ASE: Hatfield.
- Chamizo J.A. (1994). *El científico de la sonrisa contagiosa. Linus Pauling*. CONACULTA-Pangea: México.
- Chamizo J.A. (2010). *Introducción experimental a la historia de la Química*. FQ-UNAM: México.
- Chamizo J.A. (2011). *La imagen pública de la química*, *Educación Química*, 22, 4-11.
- Chamizo J.A. (2013). *A new definition of models and modeling in chemistry' teaching*. *Science & Education* 22, 1613-1632.
- Chamizo J.A. (2013). *Technochemistry: One of the chemist' way of knowing*. *Foundations of Chemistry*, 15, 157-170.
- Chamizo J.A. (2014). *De la paradoja a la metáfora. La enseñanza de la química a partir de sus modelos*, Siglo XXI-Facultad de Química-UNAM: México.
- Chamizo J.A. (2014). *The role of instruments in Three Chemical' Revolutions*, *Science & Education*, 23, 955-982.
- Chamizo J.A. (2015). *How chemistry teachers, using history of chemistry, could teach chemistry in Lavonen J. et al. (eds), Science Education Research: Engaging Learners for a Sustainable Future*, ESERA, Helsinki.
- Chamizo J.A. (2017). *The Fifth Chemical Revolution*, *Foundations of Chemistry*, publicado Online el 20 de marzo.
- Chamizo J.A. (2017). *La cuarta revolución química (1945-1966). De las sustancias a las especies químicas*, *Educación Química*, 28, 202-210.
- Chamizo J.A. (2017). *Habilidades de Pensamiento Científico. Los Diagramas Heurísticos*, FQ-UNAM, México.
- Chamizo J.A. & Garritz A. (2014) *Historical Teaching of Atomic and Molecular Structure en Matthews M. (ed) International Handbook of research in History Philosophy and Science Teaching*, Springer: Dordrecht.
- Chang H. (2011). *The persistence of epistemic objects through scientific change*. *Erkenntnis*, 75, 413-429.
- Chen J. (2008). *Introducing to Scanning Tunneling Microscopy*. Oxford University Press: Oxford.

- Cerruti L. (2016). *Bella e potente. La chimica dagli inizi del Novecento ai giorni nostril*. Editori Riuniti University Press: Roma.
- Clow A. and Clow N. (1952). *The Chemical Revolution. A contribution to Social Technology*. Gordon and Breach Science Publishers: Philadelphia.
- Crosland M.P. (1988). *Estudios Históricos en el Lenguaje de la Química*. IIF-UNAM: México.
- Cruz D., Chamizo J.A., Garritz A. (1986). *Estructura Atómica. Un enfoque químico*. Fondo Educativo Iberoamericano: México.
- Dalton J. (1992). Un nuevo sistema de filosofía química en Chamizo J.A. *El maestro de lo infinitamente pequeño*. John Dalton, CONACULTA-Pangea: México.
- Delacroix A. & Porte C. (1995) 'Les balances et gazomètres de Lavoisier', Demeulenaere-Douyère C. (ed) *Il y a 200 ans Lavoisier. Actes du Colloque organisé à l'occasion du bicentenaire de la mort d'Antoine Laurent Lavoisier le 8 mai 1794*, l'Académie des Sciences: Paris.
- De la Mora C. (2013). *Diseño y validación de material didáctico para la enseñanza de la Segunda Revolución Química*, Tesis de licenciatura en Química, Facultad de Química-UNAM: México.
- Elschenbroich C. and Salzer A. (1992). *Organometallics- A concise introduction*. VCH: Weinheim.
- Garritz A. (2014). Historia de la Química Cuántica, *Educación Química*, 25, 170-175.
- Gavroglu K. & Simoes A. (2012). *Neither Physics nor Chemistry. A history of Quantum Chemistry*. The MIT Press: Cambridge.
- Grasselli J.G. (1992). Analytical Chemistry-Feeding the environmental revolution? *Analytical Chemistry*, 64, 677-685.
- Haber F. (1966) *Nobel Lectures, Chemistry 1901-1921*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- Hall N. (ed.) (2000). *The New Chemistry*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Holmes F.L. (1989). The Complementarity of Teaching and Research in Liebig's Laboratory, *Osiris*, 5, 121-164.
- Holmes F.L. & Levere T.H. (eds). (2000). *Instruments and Experimentation in the History of Chemistry*. The MIT Press: Cambridge.
- Ihde A.J. (1964). *The Development of Modern Chemistry*, Harper Row, New York.
- Jensen W.B. (1980). *The Lewis Acid Base Concepts. An Overview*. John Wiley: New York.
- Jensen W.B. (1998). Logic, History and the Chemistry Textbook. III. One Chemical Revolution or Three, *Journal of Chemical Education*, 75, 961-969.
- Jensen W.B. (ed) (2002). *Mendeleev on the Periodic Table. Selected Writings 1869-1905*. Dover: New York.
- Jensen W. (2003). *Philosophers of Fire*, Oesper Collection, University of Cincinnati: Cincinnati.
- Kind V. (2004). *Contemporary Chemistry for Schools and Colleges*, RSC: London.
- Klein U. (2012). Objects of Inquiry in Classical Chemistry: material substances, *Foundations of Chemistry*, 14, 7-23.
- Kuhn T. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. FCE: México.
- Kuhn T. (1992). The Trouble with the Historical Philosophy of Science, Robert and Maurine Rothschild Distinguished Lecture, *An Occasional Publication of the Department of History*, Harvard University: Harvard.
- Lavoisier A. (1995). *Tratado Elemental de Química (edición facsimilar)*. Prólogo Aceves P. UAM-México.
- Le Goff J. (2001). *El orden de la memoria*, Paidós: Barcelona.
- Lehn J-M. (1995). *Supramolecular chemistry, Concepts and perspectives*. VCH-Wiley: Weinheim.
- Levere T. (2001). *Transforming Matter*, John Hopkins University Press: Baltimore.
- Lewis G.N. (1923) *Valence and The Structure of Atoms and Molecules*, ACS Monographs Series, New York.
- Lovelock J.E. (1974). The Electron Capture Detector. Theory and Practice. *Journal of Chromatography A*, 99, 3-12.
- Lovelock J. (2000.a) *Homage to Gaia: The Life of and Independent Scientist*, Oxford University Press; Oxford.
- Marcum J.A. (2012) 'From Paradigm to Disciplinary Matrix and Exemplars' in Kindi V. & Arabatzis T. *Kuhn's The Structure of Scientific Revolutions Revisited*, Routledge: New York.
- McEvoy J. (2010). *The historiography of the chemical revolution: Patterns of Interpretation in the History of Science*, Pickering & Chatto: London.
- Mendeleev D.I. (1990). Principios de química en García H. *El químico de las profecías*, Pangea, México.

- Menger F.M., Goldsmith D.J., Mandel L. (1976) *Química Orgánica*. Fondo Educativo Interamericano: Bogotá.
- Morris P.J.T. (ed) (2002). *From Classical to Modern Chemistry. The Instrumental Revolution*, Royal Society of Chemistry-Science Museum: London.
- Morris P.J.T. (2016). *The Matter Factory. A History of the Chemistry Laboratory*. Reaktion Books, London.
- Nieto-Galán A. (2010). “¿Para qué sirve la historia de la química? Una reflexión sobre el pasado de una profesión”. En: Chamizo J. A. (coord.), *Historia y filosofía de la Química*, UNAM-Siglo XXI: México.
- Nye M.J. (1993). *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry: dynamics of nature and dynamics of disciplines 1800-1950*, University of California Press: Berkeley.
- Ozin G.A., Arsenault A.C. and Cademartiri L. (2009). *Nanochemistry. A chemical Approach to Nanomaterials*. RSC: London.
- Paracelso (1945). *Opera Omnia en Obras Completas*, Editorial Schapire, Buenos Aires.
- Pauling L. (1962). *Ciencia y paz*, [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/peace/laureates/1962/pauling-lecture.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/peace/laureates/1962/pauling-lecture.html), consulted 11th February.
- Pearson R.G. (1963). Hard and Soft Acids and Bases, *Journal of the American Chemical Society*, 85, 3533-3539.
- Pickstone J.V. (2000). *Ways of knowing*. Manchester University Press: Manchester.
- Porter G. (1995). Flash photolysis into the Femtosecond- A Race against Time. In: Manz J., and Wötse L. (eds) *Femtosecond Chemistry*. VCH: Weinheim.
- Reichen C.A. (1964). *A History of Chemistry*. Prentice Hall International: London.
- Reinhardt C. (2006). *Shifting and rearranging. Physical methods and the transformation of modern chemistry*. Science History Publications: Sagamore Beach.
- Rocke A. (1993). The quiet revolution of the 1850s: Social and empirical sources of scientific theory. In : Mauskopf S.H. (Ed.), *Chemical sciences in the modern world*. University of Pennsylvania Press, Philadelphia.
- Rogers D. (2006). *Nobel Laureate Contributions to 20th Century Chemistry*, RSC: Cambridge.
- Rowland F.S. (1995). *Nobel Lecture in Chemistry*, <http://nobelprize.org>, consulted 11th February 2016.
- Russell C.A. (1971). *The History of Valence*, Leicester University Press: Oxford.
- Scerri E.R. (2007). *The Periodic Table. Its Story and its Significance*, Oxford University Press: Oxford.
- Schummer J. (2004). Substances versus Reactions, *HYLE International Journal for Philosophy of Chemistry* 10, 3-4.
- Shapin S. & Schaffer S. (2011). *Leviathan and the air-pump. Hobbes, Boyle and the experimental life*, Princeton University Press: Princeton.
- Siegfried R. (2002) *From Elements to Atoms. A History of Chemical Composition*, American Philosophical Society: Philadelphia.
- Söderqvist T. (ed.) (1997). *The Historiography of Contemporary science and Technology*. Harwood Academic Publishers: Amsterdam.
- Taylor S. (1957). *Los alquimistas. Fundadores de la química moderna*, Breviarios, Fondo de Cultura Económica, México.
- Von Bayer H.C. (1994). *Taming the atom-The Emergence of the Visible Microworld*. Penguin Books, London.
- Woodward R. (1965) *Avances recientes en la química de los productos naturales*, [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1965/woodward-lecture.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1965/woodward-lecture.html), consulted 11th February.
- Zewail A. (1999) *Femtoquímica*, [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1999/zewail-lecture.pdf](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1999/zewail-lecture.pdf), consulted 11th February.



# Apéndice 1

## Ejemplos de Diagramas Heurísticos y Rejillas Argumentativas de Toulmin (RAT)

La construcción de diagramas heurísticos, como la de preguntas abiertas o la argumentación son habilidades de pensamiento científico que se detallan en el libro electrónico: Chamizo J.A. *Habilidades de pensamiento científico*. *Los diagramas heurísticos*, FQ-UNAM, México, 2017 ([http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014\\_Habilidades\\_pensamiento\\_cientifico.pdf](http://www.joseantoniochamizo.com/pdf/educacion/libros/014_Habilidades_pensamiento_cientifico.pdf)).

Aquí se presentan dos DH y dos RAT con sus respectivos comentarios.

El primer DH corresponde a un equipo de tres alumnos de licenciatura, de varias carreras y aproximadamente a la mitad de las mismas, que realizaron la investigación sugerida en el capítulo 2 sobre Protoquímica. Así:

- Hay hechos relevantes, pero no todos ellos. Dos puntos en lugar de los tres que ellos mismos indican, una vez que no hay hechos sobre la metodología.
- La pregunta es clara y acotada basada en alguno de los hechos. Dos puntos.
- Tanto los conceptos como la metodología son parcialmente adecuadas. Los conceptos enunciados son pertinentes y queda claro en la respuesta que a pesar de indicar un modelo adecuado no lo conocen suficientemente para responder la pregunta. Por otro lado, la conclusión de la metodología no se deriva de los datos ni de su procesamiento. Cinco puntos en lugar de los siete que ellos marcan en su autoevaluación.
- La respuesta merece sólo un punto una vez que el análisis de la metodología no obtiene ningún punto y el modelo enunciado, aunque correcto no se utiliza. En general, una respuesta adecuada debe tener la siguiente estructura:

**De acuerdo con el modelo... y por... considerando los datos...  
la respuesta a la pregunta... es...**

- Hay sólo dos referencias que hacen mención a los hechos y los conceptos. Dos puntos.

La evaluación final es 12/20, mientras que la autoevaluación de los alumnos fue 18/20. La autoevaluación hay que practicarla en grupo.



Diagrama heurístico sobre: Controversia entre Thomas Hobbes y Robert Boyle.		PTS												
<b>HECHOS RELEVANTES</b> - En 1651 T. Hobbes publica su libro The Leviathan. - En 1656 Otto von Guericke lleva a cabo el experimento conocido como los Hemisferios de Magdeburgo. - En 1659 Robert Boyle con ayuda de Robert Hooke fabrica la Bomba de Vacío. - El 15 de julio de 1662 es fundada en Londres la Royal Society. - En 1661 Robert Boyle publica The Sceptical Chymist, exaltando el valor de los experimentos como vehículo de conocimiento. - En el siglo XVII T. Hobbes indica la inferioridad social de aquellos que se dedican al trabajo práctico.		3/3												
<b>PREGUNTA</b> ¿Por qué la disputa entre Robert Boyle y Thomas Hobbes marcó el inicio de la actividad experimental pública de una manera recurrente en Europa de la segunda mitad del siglo XVII?		3/3												
<b>CONCEPTOS</b>		1/1												
<b>Aplicaciones</b> - Historia de la química. - Estudio de la separación de las ciencias sociales-humanas y las ciencias naturales. - Importancia de la argumentación, verificación y validación del quehacer científico.	<b>METODOLOGÍA</b> Procedimiento para la obtención de datos Investigación documental en textos compilados o de archivo sobre las ideas de Robert Boyle y Thomas Hobbes; así como investigación previa que juntan los registros que datan sobre la disputa y las acciones tomadas por cada uno para sostener sus argumentos.	1/1												
<b>Lenguaje</b> - Bomba de vacío. - Validación. - Filosofía Natural. - Hechos. - Éter. - Valor del conocimiento. - Vacío.	<b>Procesamiento de los datos para obtener un resultado</b>	1/1												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fecha</th> <th>Acontecimiento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1643</td> <td>Evangelista Torricelli fabrica el barómetro de mercurio, introduciendo el concepto de vacío.</td> </tr> <tr> <td>1660</td> <td>Thomas Hobbes critica la labor experimental, ya que eran a puerta cerrada y de dudosa veracidad.</td> </tr> <tr> <td>1660</td> <td>Robert Boyle publica The Sceptical Chymist. En ese mismo año comienza a realizar experimentos en público.</td> </tr> <tr> <td>1661</td> <td>William Brouncker es nombrado primer presidente de la Royal Society en Londres, marcando así su fundación oficial</td> </tr> <tr> <td>1666</td> <td>Jean-Baptiste Colbert funda en París la Académie de sciences.</td> </tr> </tbody> </table>	Fecha	Acontecimiento	1643	Evangelista Torricelli fabrica el barómetro de mercurio, introduciendo el concepto de vacío.	1660	Thomas Hobbes critica la labor experimental, ya que eran a puerta cerrada y de dudosa veracidad.	1660	Robert Boyle publica The Sceptical Chymist. En ese mismo año comienza a realizar experimentos en público.	1661	William Brouncker es nombrado primer presidente de la Royal Society en Londres, marcando así su fundación oficial	1666	Jean-Baptiste Colbert funda en París la Académie de sciences.	1/1
	Fecha	Acontecimiento												
	1643	Evangelista Torricelli fabrica el barómetro de mercurio, introduciendo el concepto de vacío.												
	1660	Thomas Hobbes critica la labor experimental, ya que eran a puerta cerrada y de dudosa veracidad.												
	1660	Robert Boyle publica The Sceptical Chymist. En ese mismo año comienza a realizar experimentos en público.												
	1661	William Brouncker es nombrado primer presidente de la Royal Society en Londres, marcando así su fundación oficial												
1666	Jean-Baptiste Colbert funda en París la Académie de sciences.													
<b>Modelo</b> Modelo de la teoría de red de actores (ANT por sus siglas en inglés).	Análisis y/o conclusión derivado de los datos La discusión entre Hobbes y Boyle derivó en la necesidad de la creación de validación por personas de renombre o especializadas, imponiendo así, las ideas de Boyle sobre las de Hobbes.	1/2												
		2/2												
<b>RESPUESTA:</b> Porque las refutaciones de T. Hobbes promovieron el desarrollo de experimentos por parte de R. Boyle que fueron sometidos a la validación social a través de testigos destacados de la sociedad, lo que evocó en la posterior fundación de las primeras sociedades y academias de ciencia, que a su vez promueven la actividad experimental pública de una manera habitual, tal y como la conocemos hoy en día.		3/3												
<b>REFERENCIAS</b> Hechos: Shapin y Schaffer. <i>El Leviatán y la bomba de vacío</i> . Buenos Aires. (1985). Conceptos: Fernback, J. <i>Beyond the Diluted Community Concepts</i> , New Media & Society. (2007). Metodología:		2/3												
<b>Autoevaluación</b> (total de puntos entre los posibles). Se tienen que sumar todos los puntos obtenidos		18/20												

El siguiente DH fue realizado hace varios años por un alumno de maestría en el curso de historia y filosofía de la Química. Ha sido adaptado a la nueva plantilla, por lo que las especificaciones de las referencias así como de otros asuntos y el detalle del modelo no son explícitas en su lugar, pero sí en la respuesta. Siendo muy exigentes, la evaluación final coincide con la del alumno 19/20.

Diagrama heurístico sobre: El método metalúrgico de beneficio de patio o amalgamación		PTS												
<b>HECHOS</b> -El método de amalgamación para la extracción de plata fue implementado en Pachuca en 1555 por el sevillano Bartolomé de Medina, convirtiéndose en el principal método metalúrgico empleado en los tres siglos siguientes, sustituyendo al de fundición y llevándose a cabo una revolución tecnológica. [1] - En 1792 se inaugura el Colegio de Minería, institución dirigida a formar ingenieros, con base en modernos conocimientos científicos y técnicos, entre ellos de química, metalurgia y mineralogía, para mejorar la minería en Nueva España. [2] - Los libros con un enfoque moderno <i>Nueva teórica y práctica del beneficio de los metales</i> de José Garcés y Eguía y, <i>Tratado de la amalgamación de Nueva España</i> de Federico Sonneschmidt se emplearon como libros de texto para la cátedra de química y metalurgia del Colegio de Minería durante la mayor parte del siglo XIX. [3] - La independencia de México produjo una crisis en la industria minera mexicana por el escaso mercurio necesario para el procedimiento de patio, pues anteriormente se importaba de España. [4]		3												
<b>PREGUNTA</b> ¿Por qué los peritos, ensayadores e ingenieros de minas mexicanos egresados del Colegio de Minería no propusieron tecnologías de beneficio alternativas al método de patio, dadas las dificultades y costos de este procedimiento practicado desde hacía más de dos siglos atrás?		3												
CONCEPTOS	METODOLOGÍA													
<b>Aplicaciones</b> - Amalgamas odontológicas - Estudio teórico de un proceso fisicoquímico complejo - Estudios de historia de la ciencia	<b>Procedimiento para la obtención de datos</b> Investigación documental en diarios y documentos de archivo sobre la participación de los ingenieros egresados del Colegio de Minería en la industria minera mexicana y el papel que desempeñaron en las mismas. Búsqueda en los libros de texto decimonónicos existentes en la biblioteca del Colegio de Minería sobre las representaciones teóricas de los diferentes métodos metalúrgicos. Búsqueda en diarios oficiales sobre las patentes que se concedieron en torno al método de amalgamación	1												
		1												
<b>Lenguaje</b> - Amalgama - Innovación incremental - Innovación radical - Adopción masiva - Revolución tecnológica - Paradigma tecnoeconómico - Insumo clave - Eficiencia técnica - Productividad - Trayectoria natural - Sistema tecnológico - Azogue - Saltilerra - Magistral - Hacienda - Changarros	<b>Procesamiento de los datos para obtener un resultado</b>	1												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fecha</th> <th>Acontecimiento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1555</td> <td>Bartolomé de Medina introduce una innovación radical en la industria metalúrgica mexicana: el método de beneficio de patio adoptándose masivamente por los mineros mexicanos dejando atrás el costoso método de fundición y dándose inicio un nuevo rumbo tecnológico.</td> </tr> <tr> <td>1556 y ss.</td> <td>Numerosas personas del ramo minero proponen innovaciones incrementales al método de beneficio de patio.</td> </tr> <tr> <td>1622</td> <td>El virrey Diego Carrillo de Mendoza y Pimentel, marqués de Gelves prohíbe el uso del método de fundición para beneficiar plata.</td> </tr> <tr> <td>1792</td> <td>Se inaugura el Colegio de Minería en la Ciudad de México con el propósito de formar los cuadros de profesionales científicos que mejoraran las técnicas minero-metalúrgicas.</td> </tr> <tr> <td>1800</td> <td>Se expiden los primeros títulos de perito facultativo de minas a los alumnos que completaron sus estudios</td> </tr> </tbody> </table>	Fecha	Acontecimiento	1555	Bartolomé de Medina introduce una innovación radical en la industria metalúrgica mexicana: el método de beneficio de patio adoptándose masivamente por los mineros mexicanos dejando atrás el costoso método de fundición y dándose inicio un nuevo rumbo tecnológico.	1556 y ss.	Numerosas personas del ramo minero proponen innovaciones incrementales al método de beneficio de patio.	1622	El virrey Diego Carrillo de Mendoza y Pimentel, marqués de Gelves prohíbe el uso del método de fundición para beneficiar plata.	1792	Se inaugura el Colegio de Minería en la Ciudad de México con el propósito de formar los cuadros de profesionales científicos que mejoraran las técnicas minero-metalúrgicas.	1800	Se expiden los primeros títulos de perito facultativo de minas a los alumnos que completaron sus estudios	1
	Fecha	Acontecimiento												
	1555	Bartolomé de Medina introduce una innovación radical en la industria metalúrgica mexicana: el método de beneficio de patio adoptándose masivamente por los mineros mexicanos dejando atrás el costoso método de fundición y dándose inicio un nuevo rumbo tecnológico.												
	1556 y ss.	Numerosas personas del ramo minero proponen innovaciones incrementales al método de beneficio de patio.												
	1622	El virrey Diego Carrillo de Mendoza y Pimentel, marqués de Gelves prohíbe el uso del método de fundición para beneficiar plata.												
	1792	Se inaugura el Colegio de Minería en la Ciudad de México con el propósito de formar los cuadros de profesionales científicos que mejoraran las técnicas minero-metalúrgicas.												
1800	Se expiden los primeros títulos de perito facultativo de minas a los alumnos que completaron sus estudios													

	1810-1875	Algunos egresados del Colegio de Minería propusieron innovaciones incrementales a los métodos de amalgamación empleados en las haciendas mexicanas.	
	1822	Una vez lograda la independencia, inversionistas ingleses se interesaron por la minería mexicana, lo cual aseguró el abasto del mercurio necesario para el beneficio.	
Modelo Revoluciones tecnológicas de Carlota Pérez [5]	Análisis y/o conclusión derivado de los datos		2
	El método de fundición era bastante costoso y poco eficiente, lo cual favoreció que el método de beneficio de patio, en el que se empleaba mercurio como insumo clave, lo sustituyera al ser más ventajoso, eficiente y productivo.		2
RESPUESTA: Porque en la época del Colegio de Minería, el método de beneficio de patio aún no agotaba su trayectoria natural innovativa, ni se había dado una explicación teórica definitiva de éste en términos de la química moderna. Los peritos, ensayadores e ingenieros egresados de esta institución, al ser parte del paradigma tecnoeconómico, participaron activamente en la implementación de innovaciones incrementales al método y en la construcción de las interpretaciones teóricas del mismo. Además las medidas políticas e inversiones extranjeras ayudaron a disminuir las dificultades que generaba el abasto de mercurio, lo cual evitó una crisis en el empleo de este insumo clave.			2
REFERENCIAS [1] Castillo M. (2006). <i>Bartolomé de Medina y el siglo XVI</i> . Santander: Universidad de Cantabria, p. 109. [2] Ramos M.P. (2013). <i>Vicisitudes de la ingeniería en México (siglo XIX)</i> . México: UNAM-CEIICH, pp. 46 y 47. [3] Aceves P. (1993). <i>Química, botánica y farmacia en la Nueva España a finales del siglo XVIII</i> . México: UAM-X, p.121. [4] Romero M. (1997). <i>Minería y guerra. La economía de Nueva España 1810-1821</i> . México: UNAM-CM México, p. 142. [5] Pérez C. (2005). <i>Revoluciones tecnológicas y capital financiero</i> . México: Siglo XXI, pp. 25-77.			3
Autoevaluación			19/20

Las siguientes RAT, en dos formatos diferentes, alcanzan el nivel cuatro de competencia argumentativa una vez que alcanzan una conclusión completa y fuerte.

### Rejilla Argumentativa de Toulmin (RAT)

Nombres: Macario Sánchez y Patricia García	
<p>Hechos: Se hicieron reaccionar dos sustancias, A y B, obteniendo una sustancia C y agua</p>	<p>Garantía: La reacción de un ácido y un alcohol forma un éster y agua</p>
<p>Conclusión: La sustancia C es un éster</p>	
<p>Sustento: Los ésteres se forman por reacción entre un ácido y un alcohol en una reacción de condensación. En las reacciones de condensación, dos moléculas forman un producto más complejo con pérdida de una molécula pequeña, generalmente agua. En las reacciones orgánicas el agua se forma a partir del OH del ácido y del H del alcohol. Este proceso se llama esterificación.</p> <p>Phillips J., Strozak V., Wisntrom C. (2001) <i>Química, conceptos y aplicaciones</i>, McGraw Hill, México.</p>	<p>Refutación: Que sea una reacción de neutralización donde A sea un hidróxido y B un ácido y se obtenga una sal y agua</p> <p>Brown T.L. et al., <i>Química: La Ciencia Central</i> (2014) Pearson Educación, México.</p>
<p>Argumentación completa: Tanto en las reacciones de neutralización (de acuerdo al modelo de Arrhenius) como en las de esterificación, reaccionan dos sustancias diferentes A (ácido o alcohol) con B (base o ácido orgánico) para dar C (sal o éster) y agua.</p>	
<p>Conclusión: Enunciado que debe ser sustentado o desaprobado.</p> <p>Hechos: Datos o informaciones (que pueden derivar de observaciones, experimentos, etc.) que se usan para evaluar una conclusión.</p>	<p>Justificaciones: Son razones (reglas, principios, modelos) que se proponen para relacionar los datos con la conclusión.</p> <p>Sustento: modelo que sostiene la garantía con referencias.</p> <p>Refutaciones: son las excepciones a la conclusión pero que le dan fuerza.</p>

### Rejilla Argumentativa de Toulmin (RAT)

<p><b>Hechos:</b> El hierro se oxida cuando se coloca en presencia de agua y oxígeno</p>	y a q u e	<p><b>Garantía:</b> De acuerdo con el modelo de Lavoisier todos los metales reaccionan con el oxígeno</p>	
<p>entonces</p>	<p><b>Conclusión:</b> Los objetos fabricados con hierro se oxidarán a la intemperie</p>		
a c a u s a d e q u e	<p><b>Sustento:</b> El <math>\Delta G</math> para la reacción de oxidación es negativa. Los metales tienen baja energía de ionización (función trabajo) y fácilmente pueden perder electrones para convertirse en cationes.  [Atkins P.W. (1984). <i>Physical Chemistry</i>, Oxford University Press, Oxford]</p>	a m e n o s q u e	<p><b>Refutación:</b> Se le agregue al hierro alguna impureza como C, Cr o Mo y se convierta en acero inoxidable, o que se recubra de una capa que impida el contacto del hierro con el oxígeno y el agua, tal como puede observarse en el pilar de hierro que se encuentra en Delhi (India) construido hace unos 1600 años y que no se ha corroído aún. [Gillespie R.J. et al, (1994). <i>Atoms, Molecules, and Reactions. An Introduction to Chemistry</i>, Prentice Hall, Englewood Cliffs].  <a href="http://www.thehindu.com/thehindu/seta/2002/09/12/stories/2002091200090200.htm">http://www.thehindu.com/thehindu/seta/2002/09/12/stories/2002091200090200.htm</a></p>
<p><b>Argumentación completa:</b> Los objetos fabricados con hierro puro se oxidan cuando se colocan en presencia de agua y oxígeno, ya que esta reacción es exergónica. Sin embargo, cuando los objetos de hierro contienen impurezas de C y Cr o Mo lo que resulta es una aleación, conocida como acero inoxidable, y que como su nombre indica resiste la reacción de oxidación. Otra manera de evitar la corrosión consiste en recubrir el objeto de hierro con una película protectora, como se observa en el pilar de Delhi.</p>			
<p><b>Conclusión:</b> Enunciado que debe ser sustentado o refutado.  <b>Hechos:</b> Datos o informaciones (que pueden derivar de observaciones, experimentos, etc.) que se usan para evaluar una conclusión.</p>	<p><b>Garantía:</b> Son razones (reglas, principios, modelos) que se proponen para relacionar los hechos con la conclusión.  <b>Sustento:</b> Modelo que sostiene la garantía con al menos una referencia bibliográfica.  <b>Refutación:</b> Excepción a la conclusión, pero que le da fuerza.</p>		

# Apéndice 2

## Química General Paradigmática

Thomas Kuhn es, con Stephen Toulmin, uno de los iniciadores del giro historicista en la filosofía de la ciencia ocurrido durante la segunda mitad del siglo pasado. De acuerdo con Kuhn, el desarrollo de la ciencia no es un proceso acumulativo, sino más bien uno de ruptura y reconstrucción. A los periodos de ruptura los llamó *revoluciones científicas* y a los de reconstrucción *ciencia normal*. Los de reconstrucción se organizan alrededor de lo que originalmente Toulmin y luego él mismo llamó paradigma. El paradigma como un todo determina qué problemas se investigan, qué datos se consideran pertinentes, qué técnicas de investigación se utilizan. Sobre esto el sociólogo Pierre Bordieu (2003) agrega:

El paradigma es el equivalente de un lenguaje o de una cultura, determina las cuestiones que pueden ser planteadas y las que pueden ser excluidas, lo que se puede pensar y lo que es impensable.

Kuhn, más que ningún otro filósofo de las ciencias, ha insistido en la importancia de la educación en la conformación de la 'ciencia normal' (Kuhn, 1971, p. 214):

Sin embargo, puesto que los libros de texto son vehículos pedagógicos para la perpetuación de la ciencia normal, siempre que cambien el lenguaje, la estructura de los problemas o las normas de la ciencia normal tienen íntegramente, o en parte, que volver a escribirse.

Avalando su importancia, el mismo Kuhn reconoce que los libros de texto no indican cómo se construyó, ni cómo se construye el conocimiento científico como se indica en el primer epígrafe del presente texto.

Aceptando la descripción de Kuhn de ciencia normal, se puede identificar, respecto al currículo de Química General una posición dominante que, como su nombre lo indica, es la que prevalece prácticamente en todo el mundo. Reconocer esta estrecha posición dominante coincide con lo dicho por el mismo Kuhn (1963, pp. 350-351):

La característica más distintiva de la educación científica es que, en una extensión no compartida con ningún otro campo creativo o del saber se transmite a través de los libros de texto escritos especialmente para los estudiantes. Cada libro que busca ser utilizado en un determinado curso compete, ya sea en profundidad o en detalles pedagógicos, pero prácticamente nunca en estructura conceptual... los libros de texto no abordan los problemas que los científicos profesionales enfrentan o la variedad de técnicas que la experiencia les ha mostrado son capaces de utilizar para resolverlos. En su lugar, los libros de texto exhiben una colección de problemas-solución que los científicos profesionales han aceptado como paradigmáticos, pidiéndosele a los alumnos que, ya sea con lápiz y papel o en el laboratorio, los resuelvan utilizando los métodos y/o sustancias que han mostrado con anterioridad en sus páginas.

Una característica importante de muchos de los paradigmáticos currículos actuales es la rígida relación existente entre las temáticas, las posturas filosóficas inherentes a las ciencias y la pedagogía y una manera de reconocerlos es a través de los libros de texto. De ellos, los importantes son aquellos ampliamente traducidos y con varias ediciones, es decir, los más influyentes. En la siguiente tabla se presentan los libros y contenidos resumidos que conforman la estructura paradigmática de la Química en nuestro país. Para establecerlo se procedió a identificar los textos que los documentos curriculares de los cursos generales profesionales (universidades, politécnicos y/o tecnológicos) reconocen explícitamente y que son utilizados por la mayoría. En muchos casos son sugeridos en la educación media superior, tanto para los alumnos como para los profesores.



**Tabla 1.** Estructura Disciplinar Paradigmática de la “Química General” en México\* y su relación con los contenidos del presente texto. Algunos de los contenidos de esta aproximación histórica, particularmente los más recientes, no aparecen estructuralmente en los libros consultados.

QUÍMICA GENERAL	Revoluciones	Instrumentos	Textos Originales	Experimentos
1. Estructura atómica y molecular	1-5	Kaliapparat, Polarímetro Tubo de rayos catódicos, Espectrómetro de masas STM	Lavoisier, Dalton, Cannizaro, Lewis	Espectroscopia
2. Estequiometría	1			Los metales se pueden quemar
3. Termoquímica	1	Calorímetro		
4. Periodicidad	2		Mendeleiev	
5. Enlace químico	3		Lewis	
6. Fuerzas intermoleculares		Alambique Bomba de vacío		Cromatografía
7. Equilibrio químico. Ácidos y bases	1-5		Haber	
8. Termodinámica	P, 1,2,3,5	Bomba de vacío		
9. Electroquímica	1			Electrólisis del agua
10. Metales y metalurgia	Alquimia			Los metales se pueden quemar
11. Química Orgánica	3, 4	RMN	Woodward	Malva, baquelita
12. Bioquímica	3,4,5			Cromatografía

\* Los textos son:

a) T. L. Brown, H. E. LeMay, B.E. Bursten, C. J. Murphy, P.M. Woodward, *Química: La Ciencia Central* (2014). 12ª edición, Pearson Educación, México, 1064 p.

b) R. Chang, K. A. Goldsby, *Química*, (2013) 11ª edición McGraw Hill Interamericana, México, 1107 p.

Las imágenes utilizadas para este libro fueron tomadas de internet, bajo la licencia **Creative Commons Attribution 4.0 International**. Los sitios se citan en la siguiente tabla.

Página	Figura	Tomada de:
14	Ouroboros	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ouroboros.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ouroboros.svg</a>
16	1.1	<a href="https://www.metmuseum.org/art/collection/search/401389">https://www.metmuseum.org/art/collection/search/401389</a>
16	1.2	<a href="https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436105">https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436105</a>
19	Alambique	<a href="https://principia.io/2018/04/05/maria-la-judia-primera-mujer-inventora-y-su-relacion-con-la-alquimia.ljcoOSl/">https://principia.io/2018/04/05/maria-la-judia-primera-mujer-inventora-y-su-relacion-con-la-alquimia.ljcoOSl/</a>
19	1.3	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alembics_from_Andreas_Libavius_Alchymia.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alembics_from_Andreas_Libavius_Alchymia.png</a>
20	1.4	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lion_devouring_the_sun.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lion_devouring_the_sun.jpg</a>
21	1.5	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_three_headed_monster_in_an_alchemical_flask,_representing_Wellcome_V0025637.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_three_headed_monster_in_an_alchemical_flask,_representing_Wellcome_V0025637.jpg</a>
23	1.6	<a href="http://elculturazo.es/las-siete-reglas-de-paracelso/">http://elculturazo.es/las-siete-reglas-de-paracelso/</a>
24	1.7	Cruz D., Chamizo J.A., Garritz A. Estructura atómica, Fondo Educativo Interamericano, México, 1986, p. 22
25	1.8	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glass_jug_Louvre_AF1316.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glass_jug_Louvre_AF1316.jpg</a>
29	1.9	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Slave_market_New_York_1730.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Slave_market_New_York_1730.jpg</a>
32	Hemisferios de Magdeburgo	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magdeburg_hemispheres.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magdeburg_hemispheres.jpg</a>
32	Tabla de afinidades	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_affinity#/media/File:Affinity-table.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_affinity#/media/File:Affinity-table.jpg</a>
35	2.1	<a href="http://www.eoht.info/page/Pneumatical+engine">http://www.eoht.info/page/Pneumatical+engine</a>
36	2.2	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSM_V42_D450_Robert_Boyle.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSM_V42_D450_Robert_Boyle.jpg</a>
38	2.3	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J._Mayow;_combustion_and_respiration._1674_Wellcome_M0011674.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J._Mayow;_combustion_and_respiration._1674_Wellcome_M0011674.jpg</a>
41	2.4	<a href="https://mogckchem.weebly.com/the-contact-process-in-the-manufacture-of-sulfuric-acid.html">https://mogckchem.weebly.com/the-contact-process-in-the-manufacture-of-sulfuric-acid.html</a>
44	Tabla de las sustancias simples de Antoine Laurent Lavoisier	L. Lavoisier, <i>Tratado elemental de Química</i> , traducido por Vicente Cervantes en 1797 y publicado por el Real Seminario de Minería. Edición facsimilar de 1990, publicada por la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, con un estudio preliminar de Patricia Aceves, p. 140.
44	Pila de Volta	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pila_di_Volta_01.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pila_di_Volta_01.jpg</a>
47	3.1	H. Cavendish <i>Philosophical Transactions of the Royal Society</i> , 1766, 56, p. 141.
48	3.2	Tomado de Delacroix A., & Porte C. (1975). Les balances et gazometres de Lavoisier. In C. Demeulenaere-Douye're (Ed.), <i>Il y a 200 ans Lavoisier. Actes du Colloque organis' a' l'occasion du bicentenaire de la mort d'Antoine Laurent Lavoisier le 8 mai 1794</i> . Paris: l'Academie des Sciences.

48	3.3	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Calorimetry#/media/File:Ice-calorimeter.jpg">https://en.wikipedia.org/wiki/Calorimetry#/media/File:Ice-calorimeter.jpg</a>
49	3.4	<a href="https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436106">https://www.metmuseum.org/art/collection/search/436106</a>
51	3.5	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:John_Dalton#/media/File:John_Dalton._Mezzotint_by_C._Turner,_1834,_after_J._Lonsdale_Wellcome_V0001446.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:John_Dalton#/media/File:John_Dalton._Mezzotint_by_C._Turner,_1834,_after_J._Lonsdale_Wellcome_V0001446.jpg</a>
52	3.6	<a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Daltons_symbols.gif">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Daltons_symbols.gif</a>
60	Moléculas asimétricas	<a href="http://dataphys.org/list/vant-hoffs-molecular-paper-models/">http://dataphys.org/list/vant-hoffs-molecular-paper-models/</a>
60	65	<a href="https://ast.wikipedia.org/wiki/Ficheru:Mendeleev%27s_1869_periodic_table.svg">https://ast.wikipedia.org/wiki/Ficheru:Mendeleev%27s_1869_periodic_table.svg</a>
63	4.1	<a href="https://webpace.yale.edu/chem125/125/history99/4RadicalsTypes/Analysis/Liebiganal.htm">https://webpace.yale.edu/chem125/125/history99/4RadicalsTypes/Analysis/Liebiganal.htm</a>
63	4.2	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kali-Apparat.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kali-Apparat.jpg</a>
64	4.3	<a href="https://www.acs.org/content/acs/en.html">https://www.acs.org/content/acs/en.html</a>
65	4.4	<a href="http://zachcp.org/blog/2015/the_unseen_world/">http://zachcp.org/blog/2015/the_unseen_world/</a>
66	4.5	<a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/Cannizzaro_Stanislaw.jpg">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/Cannizzaro_Stanislaw.jpg</a>
69	4.6	<a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Kramskoy_Mendeleev_01.jpg">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Kramskoy_Mendeleev_01.jpg</a>
71	4.7	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mendeleev_Table_1905.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mendeleev_Table_1905.png</a>
72	4.8 a)	<a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Portrait_of_Sir_William_Henry_Perkin_%281838_%E2%80%93_1907%29%2C_chemist_Wellcome_M0000153.jpg">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Portrait_of_Sir_William_Henry_Perkin_%281838_%E2%80%93_1907%29%2C_chemist_Wellcome_M0000153.jpg</a>
72	4.8 b)	<a href="https://valentinagurarie.files.wordpress.com/2015/01/1887_postcard_of_queen_victoria.jpg">https://valentinagurarie.files.wordpress.com/2015/01/1887_postcard_of_queen_victoria.jpg</a>
72	4.8 c)	<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Shades_of_magenta#/media/File:Magentalcon.png">https://en.wikipedia.org/wiki/Shades_of_magenta#/media/File:Magentalcon.png</a>
73	4.9	<a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_espectroscopia#/media/File:Kirchhoffs_first_spectroscope.jpg">https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_espectroscopia#/media/File:Kirchhoffs_first_spectroscope.jpg</a>
75	4.10	<a href="http://thefutureofthings.com/upload/image/personal-column/tony-travis/19th-century-high-tech/the-works-in-1858.jpg">http://thefutureofthings.com/upload/image/personal-column/tony-travis/19th-century-high-tech/the-works-in-1858.jpg</a>
78	Anuncio de Bayer	<a href="http://www.herbmuseum.ca/content/bayer-aspirin-heroin-advertisement">http://www.herbmuseum.ca/content/bayer-aspirin-heroin-advertisement</a>
78	Logotipo IUPAC	<a href="https://iupac.org/iupac-logos/">https://iupac.org/iupac-logos/</a>
82	5.1	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JJ_Thomson_Cathode_Ray_Tube_2.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JJ_Thomson_Cathode_Ray_Tube_2.png</a>
82	5.2	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J_J_Thomsons_cathode_ray_tube_with_magnet_coils,_1897._(9663807404).jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J_J_Thomsons_cathode_ray_tube_with_magnet_coils,_1897._(9663807404).jpg</a>
83	5.3	Aston, F. W., Mass-spectra and isotopes. London: Edward Arnold & Co, 1933
84	5.4	<a href="https://escritodesdelastripas.wordpress.com/2017/09/15/la-conciencia-de-fritz-haber/">https://escritodesdelastripas.wordpress.com/2017/09/15/la-conciencia-de-fritz-haber/</a>

86	5.5	<a href="https://www.sciencehistory.org/historical-profile/gilbert-newton-lewis">https://www.sciencehistory.org/historical-profile/gilbert-newton-lewis</a>
93	5.6	<a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_de_Haber#/media/File:Haber-Bosch-es.svg">https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_de_Haber#/media/File:Haber-Bosch-es.svg</a>
96	Autógrafo	Foto tomada por el autor
96	Pastillas	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combined_oral_contraceptive_pill.JPG">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Combined_oral_contraceptive_pill.JPG</a>
101	6.3	<a href="https://www.researchgate.net/figure/Figura-224-Principales-componentes-de-un-equipo-para-medidas-de-resonancia-magnetica_fig9_275044948">https://www.researchgate.net/figure/Figura-224-Principales-componentes-de-un-equipo-para-medidas-de-resonancia-magnetica_fig9_275044948</a>
103	6.7	<a href="https://www.si.edu/es/object/siris_arc_289407">https://www.si.edu/es/object/siris_arc_289407</a>
105	6.8	<a href="https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Robert_Burns_Woodward_in_1965.jpg">https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Robert_Burns_Woodward_in_1965.jpg</a>
111	6.9	<a href="https://insider.si.edu/2012/06/the-age-of-plastic-symposium-june-7-8-2012/">https://insider.si.edu/2012/06/the-age-of-plastic-symposium-june-7-8-2012/</a>
113	6.10	<a href="http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/proteins/copyright.html">http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/proteins/copyright.html</a>
116	Agujero en la capa de ozono	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agujero_en_la_capa_de_ozono_2008.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agujero_en_la_capa_de_ozono_2008.jpg</a>
121	7.2	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_capture_detector_pp_2012027001.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_capture_detector_pp_2012027001.jpg</a> y <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_capture_detector">https://en.wikipedia.org/wiki/Electron_capture_detector</a>
123	7.3 a)	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ScanningTunnelingMicroscope_schematic.png">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ScanningTunnelingMicroscope_schematic.png</a>
123	7.3 b)	<a href="https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/6987082325/in/photostream/">https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/6987082325/in/photostream/</a>
123	7.4	<a href="http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/chm729/STMPage/stmconc.htm">http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/chm729/STMPage/stmconc.htm</a> y <a href="http://cienciaxxi.es/blog/?p=5865">http://cienciaxxi.es/blog/?p=5865</a>
124	7.5	<a href="http://www.blogodisea.com/cual-tiempo-mas-largo-corto-registrados.html">http://www.blogodisea.com/cual-tiempo-mas-largo-corto-registrados.html</a>
125	7.6	<a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ahmed_Zewail_(2010).jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ahmed_Zewail_(2010).jpg</a>
127	7.8	<a href="https://es.wikipedia.org/wiki/James_Lovelock#/media/File:James_Lovelock_in_2005.jpg">https://es.wikipedia.org/wiki/James_Lovelock#/media/File:James_Lovelock_in_2005.jpg</a>
134	Kanji	<a href="http://gwenaelm.free.fr/Sites_eleves/3C/Chap4/ch4_la_conduction_electronique.html">http://gwenaelm.free.fr/Sites_eleves/3C/Chap4/ch4_la_conduction_electronique.html</a>



*Química General. Una Aproximación Histórica*  
es una obra editada por la Facultad de Química.

La publicación de esta obra fue posible gracias al apoyo  
de la Coordinación de Comunicación,  
a través del Departamento Editorial.

Se utilizaron en la composición las familias tipográficas  
Candara, Chalkboard SE, Futura Md BT y Century Schoolbook.

El cuidado de la edición estuvo a cargo de  
Lic. Brenda Álvarez Carreño  
Diseño de portada: DG Norma Castillo Velázquez.

**Publicación autorizada por el Comité Editorial  
de la Facultad de Química.**

Septiembre de 2018





## Sobre la portada

La serpiente o el dragón que se come su propia cola, el Ouroboros, es un antiguo símbolo del eterno retorno, de la naturaleza cíclica y eterna del mundo. En la alquimia representa el cambio, la construcción y la destrucción de la sustancia. Que el Ouroboros sea de fuego marca el inicio de la Química como disciplina independiente y características que hoy aceptaríamos como científicas. Entender las causas del fuego fue una de las tareas por las que se caracterizó la primera revolución química. Finalmente, el color verde corresponde al surgimiento de la Química Verde y su declaración de responsabilidad social acaecido al final de esta disciplina, en la quinta revolución química.

