



DEL FUEGO AL OXÍGENO

Una historia de la química

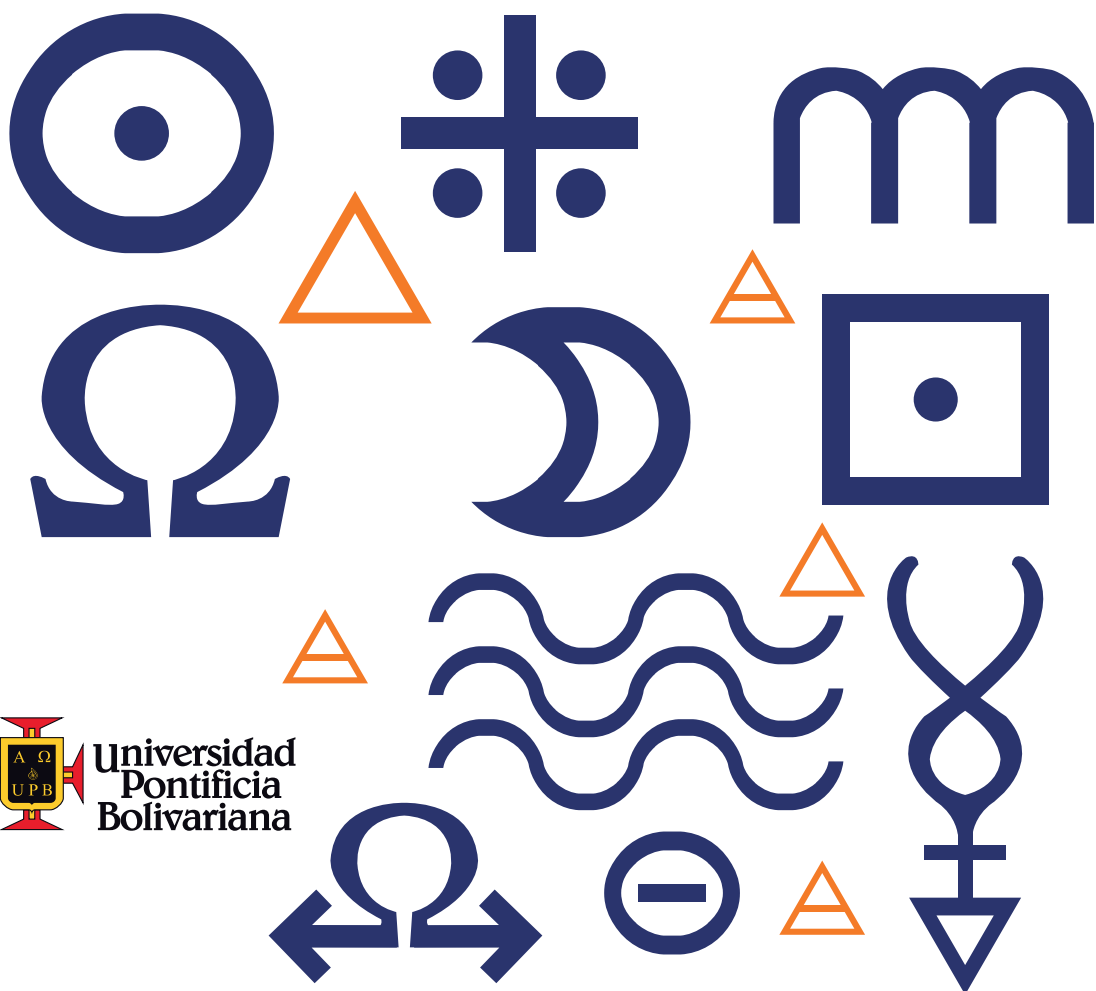
David Vélez Gómez

ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MONOGRAFÍAS
Y TESIS



Universidad
Pontificia
Bolivariana



David Vélez Gómez

Ingeniero Químico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Es un insaciable buscador de la unificación entre los saberes científicos y humanistas.

Actualmente esta cursando un máster en Química y farmacia de productos naturales en la Universidad de Salamanca (España) y el Instituto Politécnico de Braganza (Portugal).

Esta es su primera obra, surgida de un interés profundo por responderse algunas preguntas básicas sobre el origen de los conceptos químicos, preguntas que difícilmente se responden en el transcurso de la formación de un ingeniero.



DEL FUEGO AL OXÍGENO.

Una historia de la química

David Vélez Gómez

540.1
V436

Vélez Gómez, David, autor
Del fuego al oxígeno. Una historia de la química / David Vélez Gómez -- Medellín:
UPB, 2017.
147 páginas : 19 x 24 cm.
ISBN: 978-958-764-427-2 / ISBN: 978-958-764-428-9 (en línea)

1. Química – Historia – I. Título

UPB-CO / spa / RDA
SCDD 21 / Cutter-Sanborn

© David Vélez Gómez
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
Vigilada Mineducación

Del fuego al oxígeno. Una historia de la química

ISBN: 978-958-764-427-2
ISBN: 978-958-764-428-9 (en línea)
Primera edición, 2017
Escuela de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Química

Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Vicerrector Académico: Álvaro Gómez Fernández

Editor: Juan Carlos Rodas Montoya

Coordinadora de Producción: Ana Milena Gómez Correa

Diagramación: Ana Milena Gómez Correa

Corrección de Estilo: Dora Luz Muñoz Rincón

Ilustraciones: Rocío Tobón

Dirección Editorial
Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2017
E-mail: editorial@upb.edu.co
www.upb.edu.co
Telefax: (57)(4) 354 4565
A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 1497-14-09-16

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito, sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Dedicatoria

A mi padre, ejemplo de sabiduría y amor; en quien encontré el valor de las letras, compañeras de las noches y la soledad; quien sentía como un dolor de parto ver nacer de su espíritu sus pensamientos y escribir en sus libros su poesía, su alquimia.

A mi madre, artesana, ninfa, quien inspiró desde temprana edad a mi padre; quien personificando al dios cabra, la perseguía en sus letras e intentaba atraparla y descifrarla y, gracias al universo, no lo logró, para permitirle inspirarse en ella siempre. Mujer de manos y habilidades, complemento para el fuego del pensamiento, mujer que representa lo cotidiano en el amor al hogar. Gracias, porque llevas el doble papel ahora, donde immortalizas la labor de una madre.

A mi hermano, que en las diferencias he aprendido a crecer. Su naturaleza, muy cercana a la mía, nos ha hecho chocar continuamente, pero, ante todo, crecer. Fruto del mismo amor paternal, en quien veo potencialidades de vida y amor inmensas y cercanas, a lo que yo mismo soy.

Al universo, a todo aquello que no puedo nombrar, a lo sensible, a lo espiritual, al único milagro que lo abarca todo: la vida. Solo se hacen posibles los sueños en el abrazo de quien nos sueña, siempre he creído que dormitamos y olvidamos reconocernos universales.



Agradecimientos

A Beatriz Garcés, quien con su paciencia y dedicación trabajó de mi mano, en una tarea que escapaba a los intereses generales de la academia y que nunca dejó de creer en este proyecto.

A Víctor Hugo Gómez, porque acogió con cariño esta propuesta y resaltó el valor que tiene un trabajo integral desde la ingeniería.

A Fernando Jaramillo, a quien la naturaleza le ha permitido cultivar el conocimiento y el asombro por la vida, en el reposo del ocio, el que tanto elogiaba Séneca como el retiro de la vida, para dedicarse a la contemplación.

Y a todos aquellos que me motivaron, cuando yo mismo dudé de la valía de este trabajo y, ante todo, a quienes nunca interesó, porque sin ellos no hubiera habido vitalidad y rebeldía.



Tabla de contenido

Introducción.....	13
1. Contexto sobre el estudio de la historia de la química	15
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Estado del arte	17
2. Metodología para un curso de historia de la química.....	21
2.1 Reflexionando sobre el saber: la historia de la química...	21
2.2 La química como una ciencia de contexto.....	25
3. La prehistoria.....	31
3.1 La química presente desde los inicios del hombre	31
3.1.1 <i>Los minerales</i>	33
3.1.2 <i>Los metales</i>	34
3.1.3 <i>El origen de la palabra química: la alquimia.</i>	36
4. La antigüedad	37
4.1 El origen de la alquimia	37
4.1.1 <i>Los naturalistas</i>	38
4.1.2 <i>El atomismo</i>	40
4.1.3 <i>El legado árabe: la reinmersión</i> <i>de la alquimia en Occidente</i>	41
4.1.4 <i>La alquimia fue universal</i>	47
4.1.5 <i>La transmutación de los metales</i> <i>y el elixir de la vida</i>	49
4.1.6 <i>Alquimia vs. química</i>	53
4.1.7 <i>Alquimia moderna</i>	55



4.2	Sobre la simbología y su implicación en los procesos químicos.....	57
	<i>Obtención de cobre puro por medio de la calcinación.....</i>	<i>58</i>
	<i>Obtención de la sal de cobre por oxidación</i>	<i>61</i>
4.3	Alquimia y medicina: Paracelso	61
5.	Siglos XVII-XX: el flogisto y el nacimiento de la química moderna.....	69
5.1	El estudio de los gases y la superación de la teoría del flogisto.....	69
	<i>¿Qué es el fuego?</i>	<i>89</i>
6.	Siglos XVII-XX: la termodinámica	95
6.1	El origen de la termodinámica.....	95
	<i>Para finalizar: el concepto de entropía en la educación</i>	<i>103</i>
7.	Siglos XVII-XX: la teoría atómica	105
7.1	Las proporciones fijas y las proporciones múltiples	105
7.2	El papel de la electroquímica.....	120
7.3	La radioactividad.....	127
8.	Siglos XVII-XX: la química orgánica	133
8.1	La tardía aparición de la química orgánica.....	133
9.	Conclusiones.....	141
	Referencias bibliográficas.....	143



Listas

Tablas

Tabla 1. Los cuatro elementos según Aristóteles	39
Tabla 2. Simbología alquímica para designar los metales en la Antigüedad	43
Tabla 3. Simbología alquímica de los elementos naturales.....	43
Tabla 4. Algunas palabras de las lenguas romances heredadas de la cultura árabe.....	46
Tabla 5. Símbolos alquímicos de algunas sustancias, aparatos de laboratorio, operaciones y estados de agregación.	59

Figuras

Figura 1. Representación de los diferentes componentes del proceso de Carnot.....	99
Figura 2. Aparato desarrollado por Joule.....	99



Introducción



Este trabajo trata de los procesos de construcción conceptual, que fueron erigiendo la estructura racional y metodológica de la ciencia química; sosteniéndonos en que la historia permite establecer un diálogo entre un saber y el recorrido que hubo de llevar para ser admitido como verdad. Se parte de la forma como se construía el conocimiento en las viejas escuelas, donde los conceptos no eran arrojados como simples piedras ya labradas, sino como un esbozo sobre el cual, tanto el educando como el educador, darían forma al conocimiento. Este trabajo no pretende abordar la totalidad de la evolución histórica y epistemológica de la química, sino, más bien, señalar cómo algunos conceptos, refinados a partir de su comprensión antigua, dieron origen a diferentes ramas y aplicaciones de la química contemporánea, en un proceso de evolución de la comprensión del mundo sobre los fenómenos que lo acaecen.

El motivo para realizar este esfuerzo radica en una profunda necesidad personal de tor-



nar visible, en su contexto humano e histórico, lo que yace implícito en el lenguaje matemático —en las fórmulas—, en el cual se ha condensado todo el proceso de evolución histórica de la química. En un mundo como el de ahora, cuya velocidad impide detenernos en la contemplación y la comprensión de lo ya dado, por cierto. He aquí un espacio de reflexión para desempolvar de los libros, la historia, los hechos y los acontecimientos más relevantes, que, además, incluye sus autores y sus respectivas posturas, quienes forjaron todo el sistema práctico y normalizado, que se encuentra de forma literal y simplificada en la enseñanza universitaria, media y básica de las sociedades actuales.

Tal vez todo lo académico pueda tener miles de para qué, pero defendiendo la postura de que solo es aceptable aquel que nace de lo más profundo de nuestras curiosidades y asombros, este trabajo pretende que no se olvide que todo lo que ahora sabemos nos fue dado y que heredamos una enorme responsabilidad: retomarlo y asombrarnos ante él. Nuestra actualidad con su afán de especialización siempre pretende ir en línea recta, sin cuestionarse sobre cuáles

fueron los cimientos que nos permitieron desenvolvemos en un área específica; quizás un para qué interesarnos en esos fundamentos, no tenga una respuesta racional, pero sí está motivado en los principios fundadores de las universidades: *universitas* y *humanitas*, que nos legó la sociedad occidental del siglo XII. Recordemos que, tal como lo indica el filósofo Gonzalo Soto Posada, *universitas* hace referencia al gremio de personas involucradas en enseñar y aprender, mientras *humanitas* se refiere al cuidado y cultivo de saberes en función ético-estética: hacer de la vida una obra de arte.

El texto contiene una propuesta educativa para acercarse a los principales momentos históricos y a la evolución de los conceptos más importantes desde nuestro parecer, que forjaron el surgimiento de la ciencia química. Esta propuesta está dirigida a los estudiantes que inician o están próximos a iniciar sus estudios en carreras afines a la química; como la Ingeniería Química, que buscan hacer mucho más claros y comprensibles los conceptos que abordarán, en sus diferentes aplicaciones, en el transcurso de su formación.



Contexto sobre el estudio de la historia de la química

Planteamiento del problema

En los libros usados para la enseñanza y el aprendizaje de la química, los aspectos de tipo histórico se encuentran ausentes en su gran mayoría y cuando aparecen, no son tratados con la suficiente importancia, lo que sí ocurre en muchos otros países, donde se les atribuye un papel relevante (Solbes y Traber, 1996, pp. 103-112). Debido a esto, se han dejado de aprovechar los aportes de la investigación en la historia de la química para mejorar su comprensión, imagen y enseñanza (Gallego, Pérez, Uribe, Cuéllar y Amador, 2004, s.p.). Según diferentes investigaciones en el campo de la didáctica de las ciencias, se evidencia la reducida coherencia que existe entre la formación en química y una alfabetización científica, que permita a los estudiantes pensar e interpretar el mundo con teorías científicas (Camacho y Quintanilla, 2008, s.p.).



En el ámbito mundial, se ha encontrado en los últimos años una disminución sistemática y progresiva del número de estudiantes, que escogen alguna carrera profesional relacionada con la química, y del número de los que culminan sus estudios en esta área (Izquierdo, 2005, pp. 45-52). La deserción estudiantil en Colombia supera el 45 %, cifra que se mantiene en la mayoría de los países latinoamericanos, excepto Chile y Argentina, en los que las cifras son inferiores. Los mayores índices de deserción se presentan en los primeros semestres de universidad, es decir, en aquellos donde se siembran las bases para la formación profesional (Bertomeu y García, 2008, s.p.). La dinámica de la enseñanza y el aprendizaje es uno de los factores que propicia que el estudiante se interese por lo que estudia o, por el contrario, que lo abandone definitivamente.

En la enseñanza y aprendizaje de la química, la utilización de recursos históricos es escasa y se suele concretar en el uso explícito de algunos aspectos de la historia de la ciencia, como biografías, anécdotas, referencias a grandes inventos de la técnica y la historia de algunos conceptos o modelos (Institut de Batxillerat San Vicent Ferrer, s.f., s.p.). En la actualidad, existe poca coherencia entre la enseñanza de la ciencia y los retos que se plantean en los diferentes contextos de la sociedad (Carmacho y Quintanilla, 2008, s.p.), al no estar mediados los contenidos tratados en las aulas por procesos reflexivos y, además, se presentan de manera aislada a las necesidades e intereses del estudiante (Duschl, 1997, s.p.), dejando de lado la formación en algunas de las bases que fundamentan todo saber, principalmente, la historia, la

cual describe los pasos que dieron origen al establecimiento de la ciencia química.

En las distintas universidades de Latinoamérica, no es fácil encontrar cursos de Historia de la Química para programas de Ingeniería Química. Al realizar una revisión de los planes de estudio de las universidades más reconocidas en esta área, se encuentra que no hay ninguna que contenga un curso como este. En la Universidad de Buenos Aires (Argentina), por ejemplo, existe para el programa de Ingeniería Química, una asignatura denominada *Introducción al Pensamiento Científico*, que corresponde al primer semestre de estudios y que pese a tener relación con el desarrollo de la química, no es en sí un curso sobre su Historia (Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, 2010). Tampoco en Colombia se cuenta con este tipo de cursos en las universidades que, ofrecen el programa de Ingeniería Química, entre ellas, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Antioquia, la Universidad Industrial de Santander, la Universidad de la Sabana y la Universidad Pontificia Bolivariana. Aunque debe aclararse que cursos de este estilo sí existen en las carreras profesionales de Química Pura y Licenciatura en Química; por ejemplo, la Universidad de los Andes ofrece una serie de cursos con un enfoque histórico, entre ellos están: *Química, Leyes y Conceptos e Ideas Químicas en Historia de las Ideas* (Vargas, s.f., s.p.).

A diferencia de lo que sucede en las universidades latinoamericanas, en las europeas y norteamericanas (Oxford, Harvard, Sorbona, Barcelona, La Rioja, entre otras) viene acrecentándose el interés por la his-



toria de la química en los últimos años: se han ampliado sus campos de estudio, se ha ganado acogida en las distintas instituciones académicas, se han incrementado los trabajos doctorales referentes al tema y se ha abierto en el estudio de la historia una necesidad de reconciliar el conocimiento del origen de la ciencia (Bertomeu y García, 2008, s.p.). Sin embargo, no es menos cierta la creciente tendencia a la especialización de la educación profesional que afecta todas las áreas de estudio y que en la Ingeniería Química se manifiesta con el olvido de los albores de su historia, centrándose meramente en las nuevas tendencias de desarrollo tecnológico e industrial (Duschl, 1997, s.p.). Retornar a la enseñanza de la vieja historia, como lo hicieron muchos de los químicos del siglo XIX, es una tarea de las universidades que forman en ciencias e ingeniería, específicamente, aquellas que se relacionan directamente con la química, como es el caso de Ingeniería Química en la Universidad Pontificia Bolivariana.

La formación integral del estudiante es el fin de todo acto educativo, por ello, toda planeación curricular debe estar orientada en la enseñanza interdisciplinar y transdisciplinar, que busca abarcar los campos del conocimiento, tanto específicos para el área afín, como los saberes referentes a la educación ciudadana y ética del estudiante (Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Química, 2008). Al buscar contribuir a la formación de profesionales competentes y críticos, que comprendan y utilicen adecuadamente el conocimiento científico y guiados por los pilares de la Universidad Pontificia Bolivariana, se pretende diseñar un curso sobre la Historia

de la Química, que aporte a la didáctica de las ciencias y promueva la enseñanza y el aprendizaje de contenidos científicos y, además, integre el pensamiento, el lenguaje y la acción (Giere, 1992, s.p.).

Estado del arte

La historia de la química es un área de estudios presente en muchas universidades y centros de investigación de Europa y Estados Unidos. Desde que esta ciencia existe, se han escrito numerosas obras sobre su historia y fue el siglo XVIII en el que más se escribió sobre el tema. A finales de ese siglo y principios del siglo XIX, fueron publicados los primeros trabajos reconocidos, entre los más importantes se encuentra la *Geschichte der Chemie*, escrita por el naturalista y químico alemán Johann Friedrich Gemelin (1748–1804). En Francia, Ferdinand Hoefer (1811–1878) y Jean Baptiste Dumas (1800–1884) fueron los primeros en incursionar en este género; además de escribir un texto que narrara cronológicamente la evolución de la química, Hoefer diseñó un libro destinado a la enseñanza de la química a partir de las biografías de los más importantes químicos del pasado (Bertomeu y García, 2008, s.p.).

Desde finales del siglo XIX se empezaron a establecer numerosos cursos sobre la historia de la química, gracias a las múltiples publicaciones que comenzaron a aparecer. El desarrollo de textos sobre el estudio de los diferentes periodos de la historia de la química, especialmente los trabajos sobre la alquimia, los árabes y su conexión con



la medicina, hicieron posible la instauración de cursos en distintas universidades de Europa (Bertomeu y García, 2008, s.p.). Dentro de este marco de estudios se encuentran los trabajos sobre *Paracelso* de Franz Strunz (1875–1953), Julius Pagel (1851–1912) y Karl Sudhoff (1853–1958) y los estudios sobre la *alquimia* de Edmund O. von Lippman (1857–1940), Julius Ruska (1867–1949) y Paul Kraus (1904–1944), los cuales constituyen los pilares para la fundación de la revista de *Historia de la química* más importante en la Actualidad, *Ambix* (Bertomeu y García, 2008, s.p.).

En Estados Unidos los cursos sobre historia de la química empezaron a surgir desde la aparición de los trabajos de George Sarton (1884–1956), químico y matemático belga, quien es considerado el padre de la historia de la ciencia como un área académica (DeKosky y Allchin, 2008, s.p.). Antes de tener que exiliarse en Estados Unidos, comenzó la publicación de su revista *Isis* (1912), una revista de síntesis, que trataba los hechos, métodos, filosofías y evoluciones de la ciencia, publicación que buscaba revivir las diferentes épocas de la humanidad, además, situaba las diversas obras intelectuales de acuerdo a su contexto social y buscaba hacer comprender la ciencia desde su pasado. Sarton estaba buscando realizar un manual completo y sintético de la historia de la ciencia como base para la enseñanza (Peset, 2009, s.p.). Para lograr sus propósitos, contó con el apoyo de diversos químicos de la Universidad de Harvard, quienes venían impartiendo y desarrollando cursos sobre la historia de las ciencias. Esto fue de gran importancia para iniciar

en Estados Unidos todo un proyecto sobre la enseñanza de la ciencia, donde se toma como punto de partida la enseñanza de la Historia de la Química. En esta dirección, aparecieron inmensas obras sobre el tema desde la creación de la *American Chemical Society*, cuyas secciones *Chemical education* y *Historical chemistry* estaban dedicadas a los estudios históricos. De la misma forma ocurría con las publicaciones del *Journal of chemical education*, creado en 1923 por influencia del mismo Sarton (Bertomeu y García, 2008, s.p.).

Italia y Francia, también, comenzaron, desde hace más de un siglo, con el interés por educar en la historia de las ciencias, en especial en la historia de la química. En 1907 se dio la creación de la Sociedad Italiana de Historia Crítica de la Ciencia Médica y Natural (*A Società Italiana di Storia Critica delle Scienze Mediche et Naturali*), la cual, posteriormente, daría origen a una revista donde se publicarían los aportes y contribuciones que harían personajes como Aldo Mieli, profesor de Historia de la Química (Bertomeu y García, 2008, s.p.).

A partir del interés despertado en los años 20 y 30 del pasado siglo, sobre la arqueología y la antropología, y sobre las primeras culturas históricas de Egipto, Grecia, India y China; Partington, Mckie y Taylor vieron la necesidad de crear una sociedad para estudiar y analizar la historia de la química y fundan así la Sociedad para el Estudio de la Alquimia y la Química Temprana (*the Society for the Study of Alchemy & Early Chemistry*), que posteriormente daría origen a la revista *Ambix* (1937) (Alfonso, 2002, pp.



45-54). Esto generó profundas investigaciones y análisis de obras hasta entonces nunca leídas y nuevas interpretaciones sobre el origen de distintos conceptos y conocimientos químicos adquiridos, al servir como material para la enseñanza de la Historia de la Química. Actualmente, existen otras revistas con los mismos fines, cabe resaltar la revista *Chrysopoeia*, creada en 1987, dedicada exclusivamente a la línea de estudios sobre la alquimia, publicada en Milán y París, por una sociedad similar a la que rige la revista *Ambix*. En España y siguiendo los mismos lineamientos que la revista *Chrysopoeia*, existe *Azogue*, una revista electrónica dedicada a la publicación de textos sobre alquimia, y que no tiene costo alguno, si se desean consultar los artículos publicados (Guerrero, s.f., s.p.).

Básicamente, los textos para la enseñanza y el aprendizaje de la historia de la química son de origen europeo y norteamericano, sin embargo, estos modelos han servido para la creación de cursos y textos guías en otras partes del mundo, que en su mayoría no pasan de ser conferencias, cursos optativos o virtuales, creados en ocasiones por personas ajenas a las universidades y que se prestan solo como medios para el aprendizaje autónomo (Bertomeu y García, 2008, s.p.). Las obras más recientes publicadas en español sobre la historia de la química son las realizadas por Bensaude-Vicent y William H. Brock, que se utilizan como guía para la mayoría de los cursos dictados en las universidades europeas (Hedesan, s.f., s.p.). Se ha encontrado que alrededor de 17 libros constituyen las fuentes bibliográficas más relevantes para

la formación en la historia de la química, entre los cuales se pueden citar: *El hierro se volvió oro. Historia de la química* (1988), *The development of modern chemistry* (1964), *Ideas in chemistry. A History of the science* (1992), *Panorama histórico de la química* (1967), *Historia de los principios fundamentales de la química* (1959) (Bertomeu, s.f., s.p.).

En la actualidad, se han venido consolidando, principalmente en universidades europeas, cursos y grupos de investigación sobre la historia de la química. En las universidades de alrededor de 21 países europeos se tienen cursos sobre la Historia de la Química en sus currículos académicos. Por citar algunos ejemplos; en Alemania, la Universidad de Halle-Wittenberg y de Bremen tienen cursos dirigidos a la formación de docentes en química y cursos optativos para los estudiantes. En el Reino Unido, aunque no existen cursos específicos sobre la Historia de la Química, universidades como Cambridge y Oxford desarrollan cursos sobre la Historia de la Ciencia en general, que abarcan la química (Bertomeu, 2007, s.p.). Más de un quinto de las universidades españolas que ofrecen cursos de Química, incluyen cursos sobre la Historia de la Química. Cabe resaltar las universidades de Barcelona, La Coruña, La Rioja, Valencia y algunas otras que incluyen en sus cursos sobre la historia de la ciencia temas de historia sobre la química, como la Universidad de Zaragoza (Bertomeu y García, 2008, s.p.).

En lo que respecta a las universidades latinoamericanas, especialmente, a las



universidades que ofrecen el programa de Ingeniería Química, la enseñanza de la Historia de la Química no aparece en los planes de estudio profesionales. Existen cursos que tratan sobre estos temas, pero, generalmente, se ofrecen en las facultades de Química Pura y Licenciatura en Química.



Metodología para un curso de Historia de la Química

Reflexionando sobre el saber: la historia de la química

Si observamos la historia de la ciencia, vemos cómo la instauración del pensamiento científico no pudo darse de forma "ahistórica". La historia de la ciencia está repleta de anécdotas que narran el surgimiento del conocimiento científico, a partir de la resolución de paradigmas, creencias superadas, descubrimientos accidentales y errores experimentales, que derivaron en el enrutamiento correcto, para darse uno tras otro y, en ocasiones, de forma no lineal, los acontecimientos que irían a forjar el proceso de formación científica. Tratar de entender el surgimiento de algún conocimiento científico, situándonos en una época determinada y bajo una sola perspectiva, se hace imposible. Para comprender el proceso de construcción científica, debe tenerse en cuenta el contexto social en el cual se desarrolló, bajo cuáles ideas se fundamentó, sobre qué



hombros de gigantes, para hablar al estilo de Newton, se tuvieron que parar algunos de los personajes para dar origen a algún modelo, teoría, concepto, entre otros.

El curso Historia de la Química está enfocado a responder las preguntas que comúnmente surgen en el estudiante y que, raramente, son manifiestas frente al educador, ya sea, por ese común denominador que se llama "miedo al ridículo" o por la imposibilidad del mismo profesor en responderlas. Respecto a la primera razón, Estanislao Zuleta en su libro *Educación y democracia* atribuye el origen de ese "miedo a preguntar", a las marcadas diferencias que existen en el conocimiento entre el estudiante y el profesor, instauradas y resaltadas en el modelo educativo altamente jerárquico, que reinó en nuestro contexto por muchos años, donde quien dicta la clase es el único que posee el conocimiento y que por tener aquel rango distintivo diferenciador, dado por unos cuantos títulos, generan en el estudiante, deseoso de aprender, un temor por terminar haciendo alguna pregunta vacua o insignificante y así, el verdadero valor de enseñar se va perdiendo, el valor de la enseñanza donde el profesor y el alumno están en el mismo nivel; uno dirige, pero el otro no es meramente un receptor pasivo, sino aquel que puede interactuar tornando la enseñanza dinámica. Solo basta observar la relevante trascendencia de la cultura griega y su estilo de enseñanza, basada en el diálogo, para entender a qué me refiero.

El problema que se busca solucionar con el curso es la carencia de la utilización de recursos históricos, para la enseñanza de la química, que se suele concretar en el uso

explícito de algunos aspectos de la historia de la ciencia, como biografías, anécdotas, referencias a grandes inventos de la técnica y la historia de algunos conceptos o modelos (Institut de Batxillerat San Vicent Ferrer, s.f.). En la actualidad existe poca coherencia entre la enseñanza de la ciencia y los retos que se plantean en los diferentes contextos de la sociedad (Camacho y Quintanilla, 2008, s.p.), donde no están mediados los contenidos tratados en las aulas por procesos reflexivos y, por lo tanto, se presentan de manera aislada a las necesidades del estudiante (Duschl, 1997, s.p.), lo que deja de lado la enseñanza de algunas de las bases que fundamentan todo saber, principalmente, la historia, la cual describe los pasos que dieron origen al establecimiento de la ciencia química.

El reconocido economista y ambientalista chileno, Artur Manfred Max-Neef, en una conferencia sobre la importancia de la transdisciplina (Max-Neef, s.f., s.p.), organizó los saberes en una pirámide estructural, bajo la respuesta que da cada uno de ellos a preguntas que fundamentan su nivel de practicidad. La base de la pirámide la conforman los saberes que responden a lo que hay en el mundo, a lo que existe, aquí se encuentran, entonces, la física y la química. El segundo nivel de la pirámide responde a la pregunta por el qué podemos hacer con lo que existe en el mundo, en este grupo están las ciencias aplicadas, tales como la ingeniería y la arquitectura. El tercer escalón corresponde al diseño, la planeación, las políticas, el derecho, entre otras; las cuales resuelven la pregunta sobre qué queremos hacer. Por último, en la cúspide de la pirámide se sitúan la filosofía y la éti-



ca, que dan cuenta de lo que debemos hacer y cómo lo debemos hacer. La educación debe tender a integrar en la mayor medida los saberes (interdisciplinariedad), claro está, donde se debe hacer mayor énfasis en el saber específico a enseñar, pero sin olvidar que el ser humano es una compleja construcción social e histórica. La capacidad de relacionar los distintos saberes, hace de quien enseña, una persona, que conoce de reconceptualización del saber, que humaniza la ciencia, tan desprovista del ingrediente interdisciplinario en los últimos tiempos. Por otro lado, una educación meramente interdisciplinar podría caer en un estilo de saber como conjunto, donde los contenidos son diversos y variados, pero que no pasan de ser recopilaciones y datos arrojados al vacío, sin quién intervenga en el proceso de formación, para que sean tomados y se tornen elementos de reflexión. Es aquí, donde entra el papel de la transdisciplinariedad, la relación de los saberes con el contexto social, dar respuesta a la necesidad del momento y al grado de utilidad del conocimiento, es decir, pensar el saber recontextualizándolo. Reconceptualizar es volver desde los cimientos, para trascender en el saber y, una vez estando ahí, recontextualizarlo bajo la reflexión sobre lo que nos rodea.

La Universidad Pontificia Bolivariana tiene el programa de Ingeniería Química, en el cual, en los primeros semestres se imparte una educación básica, se introducen los fundamentos teóricos de la química general y así se va avanzando, hasta llegar a la enseñanza de la química analítica. Los conocimientos adquiridos se tornan cuantiosos y se sabe que abordar específicamen-

te el origen y desarrollo de cada uno de ellos, se hace imposible, pero más allá de no abordar los conceptos y modelos desde una visión histórica, tampoco se hace alusión alguna a los fundamentos básicos, como meros conceptos de lo que suscitó el surgimiento y el desarrollo de alguna teoría o ley científica. Y es así, donde en muchos casos los conocimientos son arrojados al estudiante como un tipo de receta; fórmulas, leyes, equivalencias y conceptos, entre otros y, rara vez, el estudiante comprende de qué le están hablando, hasta no ver resuelto el primer ejercicio.

Fundamentar la química necesaria para la formación de un ingeniero químico, meramente por medio de la enseñanza de la historia, no es posible. Los conceptos y teorías se hacen necesarios, en algunos casos escapan a los intereses de un curso de pregrado y, en otros casos, son tan especializados que escapan a la química en sí. Pero el valor de la enseñanza de la química, desde su historia, radica en que el estudiante, en sus primeros momentos de formación, puede adquirir competencias, entiéndase por estas un conjunto de habilidades y destrezas que le permitirían al estudiante argumentar por qué una teoría tuvo más éxito que otra, qué factores influyeron para que evolucionara dicho conocimiento, en qué influyó el conocimiento en el contexto en el cual se desarrolló, cuáles eran los medios con los cuales se enfrentaban los químicos a los problemas teóricos y experimentales en aquel entonces, qué instrumentos hicieron posible el desarrollo y consolidación de ciertos descubrimientos, teorías, conceptos, y cómo evolucionaron hasta la actualidad y, si es el



caso, cuáles de ellos se usan aún en la actualidad. En general, se daría una posibilidad de aprehensión de los conceptos básicos, que más adelante le serán expuestos como lenguaje matemático, pero que por sí solo ese lenguaje no le daría herramientas para darlo a entender en un contexto vivencial y práctico.

El curso no solamente está dirigido para estudiantes de Ingeniería Química, aunque el origen de la necesidad a suplir está basado en mi experiencia como estudiante de dicha carrera, no solo se puede pensar este curso como una herramienta que fortalezca la aprehensión de los conceptos básicos para el ingeniero, sino, también, como un espacio donde se promueva el gusto por el saber, la necesidad intrínseca que algunos tenemos por el conocimiento, por adentrarnos en espacios, que en la actualidad carecen para muchos de valor, pero que si reflexionamos un poco, busca romper con esas premisas del "me conviene" social o de los postulados de una educación positivista solamente orientada a la técnica, donde se humaniza el saber, lo que tanta falta le hace, en especial, a las ciencias.

El curso pertenece al Ciclo Disciplinar, debido a que en este se dan las bases para la construcción del saber, se forma en los conceptos, se introducen las materias básicas, se enseña desde lo ejemplificado, lo simple, para ir construyendo un conocimiento más riguroso y complejo. En la ingeniería, las materias básicas dan cuenta de los fundamentos de las materias posteriores, así, para comprender los fenómenos de transporte, la termodinámica, la mecánica de fluidos, la electroquímica, el diseño de re-

actores químicos, entre otros, se hace necesario saber que estas materias aplicadas están fundamentadas en conceptos adquiridos previamente: el concepto de velocidad, equilibrio, reacción, cinética química, reacción química, estequiometría, energía, calor y todos los demás conceptos que, podrían citarse de acuerdo con la ciencia en cuestión. La pregunta, entonces, sería: ¿dónde radica la importancia de la enseñanza de la historia de la química?, básicamente, la importancia de la historia de la ciencia radica en que todas las áreas básicas, que buscan la introducción del conocimiento y la aprehensión del mismo, están sostenidas por los fundamentos históricos, entre ellos, los contextos, los sucesos, las teorías, los paradigmas resueltos, los errores, los experimentos, la evolución y herencia del conocimiento, entre otros. Y que pasan a una simplificación teórica, que da razón y sustenta todo lo histórico. Pues bien, la pretensión de resumirlo todo, de compendiarlo en una expresión matemática o lógica, de esquematizarlo en un modelo o teoría, puede en ocasiones no ser en vano y fácilmente permitir al estudiante la comprensión de los conceptos, claro está, se hace más fácil en las materias superiores, es decir, las del Ciclo Profesional, ahí el estudiante posee los conocimientos de los conceptos básicos y, resueltamente, puede comprender en forma simplificada un nuevo conocimiento aplicado, pues ya conoce el lenguaje científico, sabe de qué le están hablando, está familiarizado desde hace tiempo con lo que le enseñan y puede fácilmente relacionar el nuevo aprendizaje con lo anteriormente aprehendido. Pero cuando se piensa en esto, en los estudiantes de primeros semestres no ocurre lo mismo, así se tenga la preten-



sión de que mediante el reduccionismo matemático se logre la adquisición del saber, esto no ocurre. La historia es entonces una herramienta dinámica que aporta, para que el saber se integre con el aprendizaje, pues bien, las prácticas de laboratorio afianzan y familiarizan los conceptos con lo evidenciable y corroborable, los idiomas se aprenden hablando y, más aún, en un contexto social donde se vivan; la música armoniza el saber y no es en vano los resultados científicos que atribuyen al estudio bajo la música clásica, mayores índices de comprensión frente a un tema estudiado; y, así, la historia juega un papel similar, porque muestra, aclara, da luz de lo que se enseña, contiene en sí el fundamento de lo que se enseña y permite una construcción desde sus orígenes de lo que se entiende por ciencia y no hace de la ciencia una cuestión de credo religioso, donde el estudiante cierra sus ojos y se dedica a escuchar y memorizar, la historia dinamiza el saber.

La química como una ciencia de contexto

La química representa un complejo científico y técnico que ha transformado las condiciones materiales de nuestras vidas. El estudio de la química no está entre los primeros intereses de la academia en la formación profesional, mientras que otras áreas como la biotecnología, la bioquímica o la nanotecnología han tomado fuerza y su espacio intelectual e institucional se ve financiado desde diversos flancos (Nieto-Galán, 2010, s.p).

En la percepción cotidiana de las personas, la química está relacionada con la contaminación, adulteración o destrucción de la naturaleza, pero, también, con las industrias que abastecen los servicios y productos, que hacen parte de la vida. El adjetivo “químico” es considerado como algo de dudosa confianza, que deriva, actualmente, en un auge por los productos naturales, que se perciben como si fueran algo diferente a los productos químicos. Lo que se ignora, es que la fabricación de cremas cosméticas o bebidas saborizadas, entre otros, se lleva a cabo a partir de materias primas puras o extractos naturales, pero es la química la que permite que estos materiales se transformen en productos útiles. La responsabilidad frente a la percepción social de un conocimiento se fundamenta en quienes hacen uso de él en el ejercicio de un oficio, evitar que se desconozcan o se ignoren los efectos ambientales, o de salud, de algunos productos químicos, es responsabilidad de los profesionales relacionados con la química, para enfrentar esta responsabilidad la educación del profesional debe ser transdisciplinar. La ciencia, cuando pierde su inocencia, la capacidad de asombro de quien investiga frente a los hechos, se transforma en técnica desprovista de valor humano, cuyo fin último es el lucro y no el mejoramiento de la calidad de vida de la humanidad.

La pérdida de historicidad en la química, hoy en día, está ligada a la necesidad de especialización constante, demandada por una sociedad productiva en crecimiento material, que no deja espacio para una reflexión humanista. Nuestra sociedad vive actualmente la ruptura entre las ciencias



y las humanidades, pues desliga el contenido entre ambas, aunque esa no es la única causa de este fenómeno (Nieto-Galán, 2010, s.p.).

Una de las causas principales de la carencia de historicidad en la química en el ámbito académico en el que se forman los futuros profesionales, es la abundancia en los temas que deben ser abordados en el transcurso del p \acute{e} nsum acad \acute{e} mico. Los contenidos actuales no se ligan a las teorías pasadas, aunque de ellas tuvieron que haber evolucionado, sino que se entregan sintetizados en el logro matemático de una expresión o correlación numérica.

Por otro lado, los libros de química van directo a los ejercicios, al dejar la conceptualización del tema carente de fundamento; mientras que el pensamiento de Adam Smith continúa siendo una lectura obligada para los estudiantes de Economía; y la filosofía de Jacques Rousseau, el pensamiento de Maquiavelo, incluso la República de Platón, para los iniciados en Ciencias Políticas o Derecho; en Química carecen de importancia los textos, como también, las teorías anteriores, por ejemplo, no se retorna al concepto de Flogisto como explicación inicial de los procesos de combustión. Los químicos del pasado no cuentan más que con pequeños espacios en los libros de química, para exponer sus vidas y sus logros, porque el contenido se enfoca a las teorías actuales (Nieto-Galán, 2010, s.p.).

Lo anterior posiblemente tuvo su origen con las propuestas del célebre químico del siglo XVIII; Antoine Lavoisier, quien

dejó claro que la química debía abogar por un pensamiento sistemático y único, y que debían abandonarse los lenguajes simbólicos tradicionales de la alquimia, que, hasta entonces, prevalecían en el pensamiento químico (Nieto-Galán, 2010, s.p.).

De esta forma, la química tomaría un carácter científico y los hombres de ciencia venideros la construirían desde un marco teórico común, lo que permitió llevar el desarrollo de la química por un camino conjunto y comprensible para todos. Desde este punto de vista, el bagaje histórico de esta ciencia debía abandonarse y limitarse a lo que se circunscribiera en el nuevo lenguaje científico.

A pesar de esto, en el siglo XIX, muchos químicos cultivaron el género literario de la historia de la química, diferenciándose de la propuesta de Lavoisier. Eran los profesionales de las nuevas facultades de ciencias, los que más contribuyeron a escribir esas historias de la química, a menudo teñidas de pensamiento positivista, que presentaba a esa joven ciencia como resultado de la victoria de una nueva cultura experimental, sobre las viejas tradiciones alquímicas (Nieto-Galán, 2010, s.p.). No obstante, estos esfuerzos y los que siguieron haciendo algunos científicos e intelectuales desde ese entonces, la historia de la química no se incorporó como un aprendizaje esencial en los currículos de las facultades, que preparan a los futuros profesionales en esta disciplina (Nieto-Galán, 2010, s.p.).

Entre aquellos que se han interesado por el origen de este saber, la búsqueda de la



identidad de la química se ha convertido en la tarea de muchos hombres formados en historia de la ciencia. Tal vez uno de los problemas más importantes en la búsqueda de esta identidad, es la dificultad que se ha tenido para lograr el reconocimiento de la alquimia como algo más que una filosofía natural. El periodo de la historia que se ha llamado alquimia, abarca más de 2 000 años, tiempo comparativamente relevante, frente a los 200 años que tiene la química moderna, nacida a partir de la superación de la teoría del flogisto para explicar la combustión, se presenta como un contexto de ideas y teorías difíciles de asimilar, frente a nuestra concepción actual de la materia. El pensamiento alquímico se ha vinculado a un tipo de *pseudociencia*; la búsqueda de la piedra filosofal, los elixires de la vida, la transmutación de los metales, la concepción del hombre como un microcosmos, por la cual se hacía posible la curación de todo tipo de enfermedades, al descubrirse cómo funcionaban los procesos materiales de la tierra y cómo interferían en el hombre las constelaciones, son temas que, a la luz de la razón, escapan de todo valor científico y práctico.

Pero no todo el pensamiento alquímico tenía un carácter esotérico, misterioso e impenetrable; en aquel periodo de la historia, también se dieron desarrollos experimentales, aunque influenciados, en gran medida, por ideas esotéricas. Fueron los alquimistas quienes nos heredaron sus conocimientos en operaciones como la destilación, calefacción, baños maría, oxidaciones y reducciones de compuestos químicos, purificaciones, calcinaciones, amalgamamiento de metales, decantacio-

nes, cristalizaciones, solidificaciones, entre otros; procesos que una vez perfeccionados sostienen todo el sistema productivo de la industria química en la actualidad.

La posibilidad de transformación de la materia siempre ha acompañado la visión del hombre, su relación con la naturaleza le ha permitido observar que, todo lo que lo rodea permanece en un constante cambio, que fluye, esto se manifiesta en los fenómenos naturales. Desde una mirada alquímica, el mundo cambia, se transforma y muta. De igual forma, si el universo está en constante movimiento y permite el nacimiento de la luz y la oscuridad en ciclos sucesivos e inagotables y la Tierra cambia en sus constantes fenómenos naturales; el hombre debe ser entendido como un pequeño cosmos, en el cual análogamente se dan transformaciones y cambios. Los procesos de transformación de la materia deberían ser análogos entre universo, Tierra y hombre, y una vez se experimente con la naturaleza, se encuentre la manera de aislar y purificar sustancias, en el hombre debería pasar algo similar, al llevar a cabo en él procesos simbólicos de sublimación o destilación, en los cuales las impurezas desaparezcan y dejen ver a la luz, aquello puro de la naturaleza humana. El concepto áurico de los alquimistas, del oro como elemento valioso y puro, al extrapolarse al hombre, podría comprenderse como una búsqueda interior del estado áurico del ser humano. Aunque el concepto alquímico de purificación aplicado al ser humano contiene más de esoterismo que, de ciencia experimental, la noción misma de purificación permitió comprender que la naturaleza puede manipularse y utilizarse, para



obtener sustancias puras, de mayor valor que el compuesto en el cual se hallaron incorporadas.

Los conceptos de separación y purificación, centrales en el pensamiento químico, tiene una historia larga. La destilación es uno de los procesos industriales más empleados hoy en día. Su valor utilitario abarca desde la obtención de alcohol para la fabricación de bebidas, hasta la obtención de reactivos derivados del petróleo, fundamentales para la producción de plásticos, combustibles, productos para procesos textiles, curtiembres, entre otros. El conocimiento de este proceso de purificación no nació con la química moderna, fue resultado de una sucesión de usos históricos, a través de los cuales se logró desarrollar y perfeccionar un saber sobre una técnica que, en sus inicios, fue meramente empírica. Desde los griegos con sus alambiques de destilación, hasta los aparatos más sofisticados desarrollados por los árabes en la Edad Media, se encuentran testimonios del interés histórico, que ha tenido el hombre por separar y purificar.

Mucho antes de nuestra química moderna, los diferentes tratados de alquimia contenían recetas, ideas, experimentos y propuestas, para lograr la transmutación de los metales, la extracción y purificación de los mismos, entre otros. Como se observa, los orígenes de nuestra ciencia datan de tiempos lejanos y nuestras artes más sofisticadas, como la fabricación de la cerámica y del vidrio, el teñido de prendas o cerámicas, la metalurgia, la minería, el curtido de pieles, la pirotecnia, la medicina y demás, están basadas en un inicio alquímico.

El arte alquímico rodeaba de mucho misterio y recelo a los descubrimientos e ideas propuestas para la extracción o purificación de sustancias. Por un lado, porque este estuvo amenazado por diversos poderes; por ejemplo: en el tiempo donde gobernaba el emperador Diocleciano en Roma (siglo III d. C.), el poder religioso del Estado la consideraba blasfema y temía que los hombres se atribuyeran el poder de Dios para dominar la materia y transformarla. Por otro lado, existían muchos farsantes que simulaban dominar las ciencias alquímicas y tan solo se lucraban de ello. Por estas razones y algunas otras, se desarrolló un lenguaje secreto, analógico y misterioso, para evitar que los tratados alquimistas llegasen a las manos equivocadas y fuesen mal interpretados. Por ejemplo: en la Antigüedad se conocían tan solo siete metales —oro, plata, mercurio, cobre, hierro, estaño, plomo—, pero a la hora de nombrarlos en sus diferentes compuestos o procesos de manipulación, los alquimistas empleaban un lenguaje alusivo a los siete planetas, conocidos hasta entonces —Sol, Luna, Mercurio, Marte, Venus, Júpiter, Saturno, respectivamente.

La importancia que puede llegar a tener un arte o una ciencia depende del lenguaje que desarrolle; el lenguaje limita y circunscribe el marco científico. Para la química, a partir de Lavoisier se comienza a desarrollar un método científico, un lenguaje no abstracto, un código entendible para la comunidad científica, que deja de lado la flexibilidad del lenguaje alquímico. La nueva nomenclatura de la química moderna crea su espacio propio, su autonomía intelectual. "Su ambición lingüística ha permitido



describir y hablar de complejas moléculas que nadie ha visto con los sentidos y crear una nomenclatura genuina que ha reforzado su identidad disciplinaria a lo largo de la historia” (Nieto-Galán, 2010, s.p.).

En conclusión, la química contemporánea ha bebido de estas dos fuentes; la química moderna y la alquimia, que, aunque difieran de su concepción de la materia en términos positivistas, tienen como sostén la misma inquietud sobre los principios de la constitución de la materia. La química, en cualquiera de sus facetas, es la búsqueda de las causas últimas que expliquen por qué ciertas sustancias reaccionan con otras, qué leyes rigen las determinadas reacciones que se dan y cómo pueden separarse las sustancias, unas de otras.



La prehistoria

La química presente desde los inicios del hombre

El ser humano primitivo solo conoció la existencia de los cuatro elementos como base para todo su pensamiento científico; descubrió el **fuego**, al ver cómo se encendía una rama de un árbol por causa de un rayo o porque se encontró frente a la erupción de un volcán. Conoció la **tierra**, porque se encontraba parado en ella y de ella se proveía para su existencia. Percibió el **agua** y el **aire**, y sabía sus poderes: el poder de las fuerzas naturales; lluvias, rayos, tormentas, erupciones volcánicas, sequías, entre otros. Estos poderes se le fueron tornando sobrenaturales, al reconocer en ellos fuerzas devastadoras e incontrolables. En medio de un contexto como este, el hombre primitivo, en algún momento de la historia, debió detenerse para observar y reflexionar sobre las propiedades de algunos minerales, que para él no eran ni la pirita, ni

la galena o el cinabrio, sino, simplemente, piedras, que comenzaría a utilizar como herramientas. Sería mucho después, cuando alguien entendería que estos minerales estaban compuestos de distintas sustancias; que la galena es plomo y azufre, que el cinabrio es un compuesto de mercurio y azufre y que la pirita es hierro con azufre y, así, que estas distintas "piedras" estaban compuestas de algún metal y, ¡azufre!

El azufre es un metaloide quebradizo de sabor insípido, que funde a bajas temperaturas y que desprende anhídrido sulfuroso cuando arde en el azul de su llama y, ante todo, abunda en la naturaleza. Este último hecho no se les escapó posteriormente a los hombres, que veían cómo la mayoría de los minerales tenían en su composición gran porcentaje de esta sustancia. La importancia del azufre en las distintas recetas no se dio a esperar y, como suele ocurrir en la historia de la ciencia, fue fundamental su uso, para que en medio de resultados no esperados se dieran descubrimientos asombrosos, entre ellos; la pólvora, al mezclar azufre con sodio y carbón. De igual forma fueron muchos los descubrimientos que se dieron accidentalmente, entre ellos cabe también resaltar el descubrimiento del mercurio.

Los hombres primitivos, con el paso de los tiempos, comenzaron a utilizar instrumentos para servirse de la naturaleza frente a las condiciones que presentaba el ambiente; el fémur de un animal o una piedra servían como garrotes y, con el tiempo, estos pedazos de piedra se convertirían en armas sofisticadas para la caza. Generalmente, aprovechaban todo lo que los ro-

deaba para hacer uso práctico según las condiciones que iban presentándose, pero siempre la piedra seguía siendo piedra y el fémur seguía siendo fémur, a pesar del uso, es decir, las cosas rara vez cambiaban su forma. Sin embargo, la repentina aparición de un rayo o el desbordamiento de un río derivaban en manifestaciones, en las cuales el cambio estaba presente. La carne de algún animal cazado podría presentar algún olor con el tiempo y su apariencia podía cambiar. Estos hechos tuvieron que causar en el hombre primitivo alguna extrañeza y permitieron que se percataran que estos cambios aparentemente repentinos estaban ligados a la naturaleza de las cosas. Es por esta razón, que más allá de pensar la química como un conocimiento que nació, sistemático y organizado, exclusivamente, desde el pensamiento humano; se puede entender como un conocimiento que se fue elaborando poco a poco, gracias a la observación de la materia y sus cambios, realizada desde tiempos muy antiguos por nuestros ancestros, quienes pudieron percibir estas transformaciones desde sus primeros desarrollos, como la rueda, la fabricación de instrumentos de piedra para la caza, el descubrimiento del fuego y la agricultura.

El contacto con la naturaleza y la utilización de los elementos que de ella podían ser extraídos, fue creando una simbología entre naturaleza y el hombre, que posteriormente, fue desarrollándose en cada cultura particular como mitología. Tomemos, por ejemplo, la extracción de los metales, aquellos elementos que el hombre fue descubriendo ocultos en los suelos y que permitieron desarrollar herramientas



que facilitaron el avance de culturas enteras. A medida que la naturaleza proveía, el hombre se encontraba frente a una serie de acontecimientos nuevos, que daban origen a la cultura y a las costumbres. Los metales crecían de la tierra, de la misma manera que el carbón, las piedras, los árboles, entre otros, como si ella fuese fértil, al igual que el útero que alberga un embrión humano; la naturaleza fue tomando carácter de dadora de vida, de madre, de totalidad, porque no podía pensarse en algo que pudiese existir por fuera de la creación de la misma naturaleza.

Sin el concepto moderno que se tiene de reacción química, los hombres prehistóricos hacían uso de una de las reacciones más importantes: la obtención del fuego. Paralelamente, con el fuego se desarrolló la metalurgia, la pintura y la gastronomía; los metales podían obtenerse mediante el calor; los minerales coloreados podían extraerse de igual forma y ser usados como tintes para representar de manera rupestre algún simbolismo ritual; y la comida se transformó, pues se tornó diferente en su aspecto, cualidades y sabor.

Los minerales

No es correcto situar el origen de técnicas y artes con el comienzo de la química como ciencia teórica. Siempre existió un instinto práctico en los hombres, que les permitió usar los materiales que los rodeaban y encontrarles un uso. El fuego, entre sus múltiples vinculaciones con los orígenes de las distintas artes antiguas, está ligado fuertemente con la alfarería; por alguna razón, se

debió descubrir que se podía endurecer la tierra con agua y que, además, esta podía ser moldeada a medida que se exponía al fuego, lo que dio origen a una serie de objetos que tuvieron una importancia elemental en las diferentes culturas. En aquellas vasijas de barro y demás objetos, no solo ornamentales, se plasmaron dibujos que permiten entender que el uso de los colorantes es tan antiguo como los orígenes del hombre. Existen evidencias de los años 5000-7000 a. C., que muestran cómo la agricultura ya era una práctica y técnica utilizada por los hombres, incluso, en el viejo mundo; la yuca amarga, un miembro exclusivo de las euforbiáceas, más nutritivo que la yuca dulce, con alto contenido de ácido cianhídrico, era un alimento cultivado por los indios americanos y mediante métodos de evaporación primitivos, lograban extraer este componente de la cáscara de la yuca, convirtiéndolo en azúcares para volver agradables otros alimentos (Furst, 2002, s.p.). Este hecho evidencia cómo el hombre, sin un conocimiento científico, logró reconocer las utilidades de la transformación de la materia y obtener, como en el caso del ácido cianhídrico de la yuca amarga, sustancias dulces de un componente que, en esencia, es veneno.

La construcción de hornos, que permitieron obtener temperaturas superiores a las que proporcionaba una fogata, hizo posible que el descubrimiento y uso del vidrio se diera de forma conjunta con la alfarería; el vidrio se desarrolló en Egipto y Mesopotamia, cerca del año 4000 a. C. (Ríos, 2011, s.p.). El vidrio se obtenía fundiendo piezas de cuarzo con el *natrón* (carbonato de calcio), que se encontraba en los lagos de Egipto. El conocimiento de los materia-



les naturales posibilitó que se comenzara a dar un uso específico a ciertos objetos y, detrás de ellos, desarrollarse una ciencia de materiales. Por ejemplo, el mismo nitrógeno que se empleaba para fabricar vidrio, también se utilizaba para elaborar cremas de dientes, ropa, productos para el proceso de momificación. Actualmente, el carbonato de calcio tiene un uso industrial relevante, pues se emplea ampliamente en la industria de limpieza y de elaboración de cremas dentales.

Los minerales coloreados que se encontraban en la naturaleza, también empezaron a ser considerados con atención, se extraían y se empleaban para teñir superficies metálicas, objetos de cerámica y el vidrio. Incluso, más adelante, en el periodo denominado alquimia, estos extractos vegetales, animales y minerales se empleaban para falsificar el oro; pues se coloreaban aleaciones de metales, para que se tornaran amarillas y se pudieran vender a precio de oro puro. Uno de los colorantes más famosos era el púrpura de Tiro, que se extraía de las glándulas de pequeños moluscos marinos, la escasez y difícil obtención de este colorante, hizo que solo pudiera ser utilizado por quienes tuvieran suficientes recursos para fabricar alguna prenda con este color, por lo que se convirtió en símbolo de realeza. Nosotros no debemos desconocer la deuda en cuestiones técnicas, que nos legaron nuestros antepasados, incluso, actualmente, uno de los colorantes más empleados en la industria textil, por no decir que el más importante, es el índigo, que ya era extraído y manipulado por los antiguos egipcios, al igual que otros colorantes de uso actual, como el escarlata que extraían

de los insectos. El uso de sales metálicas, como las de cobre, para el proceso de tintería fue comenzado en aquellos tiempos, actualmente permanece como una técnica perfeccionada y útil; hoy en día, denominamos a estas sales como *mordientes* o sustancias para fijar el color en los textiles.

Los metales

Los primeros materiales que el hombre primitivo conoció, se encontraban en todas partes; madera, piedra, huesos, pieles, entre otros, pero, fue la piedra, conformada por minerales, el material que permitió documentar la historia y entregar un registro que permitiera conocer cómo era la vida y las costumbres en las épocas antiguas. El conocimiento de los metales tardó en darse, su descubrimiento y el aprendizaje de su manipulación cambiaron la vida de los pueblos. La historia del descubrimiento de los metales se cree que inició alrededor del 8000 a. C., en el Medio Oriente. Los primeros metales utilizados y conocidos fueron el cobre y el oro, esto debido a que se encuentran libres en la naturaleza y no forman sales minerales.

Los colores llamativos de los metales hicieron que no pasaran desapercibidos para el hombre primitivo, al observar el suelo que pisaba y, con seguridad, el primer uso que se le dio a estos elementos fue el de instrumentos ornamentales. El cómo sucedió el descubrimiento de los metales es algo que debe ser supuesto; carecemos de datos históricos concretos. Suponemos que debió darse mientras se calentaba un lecho de piedras, en el que había minerales. Una vez



carbonizado el lecho destacarían pequeñas piedras brillantes, que no pasaron desapercibidas para la atención del hombre primitivo. El cobre parece ser el primer metal que fue descubierto, debido a que su utilización es la que posee registros más antiguos; su extracción y transformación se convirtió en una ciencia, cuyos métodos de obtención datan de antes del 5000 a. C.

Existe evidencia de cerca del 3000 a. C. de mezclas entre cobre y estaño, lo que permite dar por sentado que, entonces, ya se conocía la posibilidad de combinar diferentes metales, para obtener materiales cuyas propiedades variaban de las de los originales. La combinación o mezcla de un metal con carbón mineral o con otros metales recibe el nombre de *aleación*.

A medida que se descubrían las propiedades de maleabilidad, dureza y más, fueron utilizándose los metales y sus aleaciones para reemplazar las viejas armas de piedra y las construcciones artísticas de barro. El valor funcional de la piedra fue sustituyéndose por las múltiples ventajas de los metales. La posibilidad de moldear y deformar el cobre, permitió desarrollar herramientas que cortaran y proporcionaran un filo similar al que tenía la piedra, pero con la diferencia, que no se mellaban. La posibilidad de restaurar las propiedades cortantes de los metales por medio del afilado, favorecía el tiempo de vida útil de las herramientas metálicas, mientras que los instrumentos de piedra perdían fácilmente sus características.

La historia del ser humano está ligada a las guerras que han acontecido, pues estas

daban origen al establecimiento de nuevas costumbres impuestas en los vencidos, por el bando victorioso. Los metales tuvieron un papel fundamental en el armamento de aquellas guerras, al otorgar ventajas a aquellas civilizaciones o pueblos, cuyas armas estuvieran fabricadas a partir de materiales más resistentes que los de sus oponentes. La guerra de Troya, desatada entre aqueos y troyanos, data del período, donde el uso del bronce estaba en su apogeo y quienes trabajaban en la fabricación de herramientas y armas a base de esta aleación de cobre y estaño, gozaban de un prestigio entre los hombres; eran considerados herederos del arte de la fragua y su oficio fue bien remunerado, hasta el punto de divinizarlos en la personificación del dios herrero Hefaidtos, de quién se dice que forjó la armadura que portó Aquiles en aquella guerra (fabricada de bronce).

Si por alguna circunstancia, el descubrimiento del hierro y el perfeccionamiento del arte para manipularlo y fabricar herramientas, se hubiera dado en alguno de los bandos de la guerra de Troya, con toda seguridad, aquel ejército que tuviera sus armaduras forjadas de este metal gozaría de una ventaja abrumadora sobre su oponente. La masificación del hierro no ocurrió sino muchos años después, puesto que, a diferencia del cobre, los lugares donde podía encontrarse eran más escasos y los métodos de extracción necesitaban de temperaturas elevadas, debido a que se encontraba en forma de compuestos salinos. El fuego de leña no suple las necesidades de calor para poder extraerlo, tuvo que pasar mucho tiempo, hasta que se utilizara carbón mineral, cuyo uso demanda



una mayor presencia de aire para que arda. Cerca del año 1500 a. C. fue perfeccionado el arte de extraer el hierro, ocurrió en Asia Menor, a manos de una tribu llamada los hititas. Aunque el hierro forjado no presenta por sí solo propiedades de alta dureza, el calentamiento con carbón mineral dotaba al hierro de dichas propiedades; actualmente, denominamos a este compuesto de hierro y carbón, acero. Cualquier ejército dotado de armaduras de hierro tenía formidables ventajas frente a un ejército con armaduras forjadas de bronce, es así como la masificación de este metal en la manufactura de herramientas marca un punto crucial en la vida del hombre antiguo.

El origen de la palabra química: la alquimia.

La palabra química es una adaptación europea del vocablo alquimia. El origen de la palabra alquimia no es totalmente conocido, hay quienes dicen que deriva del árabe *al-kimiya*, que a su vez proviene de la palabra egipcia *kême*, *kemi* o *kemet*, que significa "tierra negra" (Asimov, 1975, s.p.), esto tiene sentido si se asocia con el color de las tierras que se bañan del río Nilo en Egipto, lugar al que se le atribuye el origen de la química. Existen otras versiones que atribuyen el origen de la palabra al griego *chymia*, que significa fundir o derretir (Guirao, s.f., s.p.).

De acuerdo con cierta teoría, la palabra *Khemeia* deriva del nombre que los egipcios daban a su propio país: *Kham*, de ahí que la palabra química podría significar: "el arte egipcio". Una segunda teoría indi-

ca que la palabra *Khemeia* deriva del griego *Khumos*, que significa: "el jugo de una planta" o "mezcla de líquidos", de ahí que, al hacer la misma interpretación anterior, la palabra química signifique: "el arte de extraer jugos" o esté asociado con la fundición de los metales para hacer aleaciones. Se ha dicho también que el nombre viene de *Chema*, una obra alquimista (Gebelein, 2002, s.p.).

Como se puede observar, los antecedentes de la palabra química no están bien definidos, pero al fin de cuentas, el origen de la palabra está relacionado con algún arte para transformar la materia o con un lugar geográfico, en el que se realizaban estos hechos. Lo que sí se sabe ciertamente, fue que los árabes fueron quienes introdujeron el prefijo *al*, que traduce "la", a la palabra *Khemeia* y que fue Robert Boyle en 1661, quien eliminó este prefijo en su obra *The sceptical chymist (El químico escéptico)* (Gebelein, 2002, s.p.), (Boyle, 1661, s.p.).

Nota: La palabra *química* hasta 1803 se escribía *Chímica*, en la que el acento circunflejo indicaba que se debía pronunciar, no como "chi", sino como "qui".

El origen de la química no es tanto un proyecto intelectual, organizado, planeado y dirigido desde la razón, orientado a comprender teóricamente la naturaleza del mundo; el origen de esta ciencia puede entenderse como un desarrollo guiado por lo empírico, que se presentó a partir de la observación de los cambios de la materia y la reflexión del ser humano sobre ellos, para tratar de comprenderlos y aprovecharlos para facilitar la vida humana.

La Antigüedad

El origen de la alquimia

El hombre antiguo, a diferencia del hombre moderno, estaba más interesado en el porqué de las cosas, que en su aplicación. Los fenómenos naturales daban viva muestra de la transformación, la materia orgánica se descomponía y su forma conocida desaparecía para tomar otra. Los elementos (agua, tierra, fuego y aire) estaban presentes en toda la naturaleza e interactuaban con ella, al permitir o colaborar en dichas transformaciones. Incluso, el descubrimiento de bebidas como el vino, la tinta, la pólvora, los metales, entre otros, involucraron un cambio de la composición estructural de la materia en la cual se encontraban, y los procesos de purificación, síntesis, reducción, oxidación y extracción, que fueron conocidos y perfeccionados por los antiguos, surgieron bajo el principio de que la materia cambiaba.



Los naturalistas

La pregunta sobre el porqué la materia cambia, se erigió como un pilar del pensamiento antiguo y las primeras respuestas que se dieron tenían un carácter naturalista; el cambio se le atribuía al origen de las cosas, a algún principio o componente natural. Tales de Mileto (640-546 a. C.) es considerado el primer pensador que intentó dar respuesta a esta cuestión, aunque con seguridad existieron ideas anteriores a él, la profundidad con la cual responde a la pregunta sobre el origen de las cosas, le ha valido el título de Primer Filósofo de la Naturaleza (Asimov, 1975, s.p.).

Los usos y extracción de los metales ya eran bien conocidos en la época de Tales de Mileto, la obtención de los diferentes metales, su purificación y manipulación era un ejemplo contundente, de que la materia permitía elaborar diferentes componentes, que variaban en sus características y cualidades. El cobre, metal de color rojizo, se extraía de un compuesto de color azulado, cabía entonces preguntarse si aquello que se consideraba cobre, ya estaba inmerso en el compuesto terroso azul o se formaba a partir de la transformación que originaba un cambio de color y, por ende, de las propiedades mecánicas. Tales de Mileto, se introdujo profundamente en la reflexión sobre el cambio y las diferentes formas que tomaba la materia y propuso que lo único que diferenciaba una cosa de otra, era el aspecto que una materia básica tomaba, materia que era, entonces, el origen de todo cuanto existe. Propuso que el agua era aquella materia que daba origen a las

demás. Este razonamiento puede entenderse fácilmente si se analiza el contexto en el cual vivió Tales; aquello que encontraba en mayor proporción en su contexto era el agua, recuérdese, que él vivía en una isla, la isla de Mileto.

El concepto de la existencia del elemento constitutivo de la materia fue retomado por pensadores posteriores a Tales, cada uno de ellos defendiendo la misma idea desde un elemento diferente. Anaxímenes (570 a. C.) propuso el aire, a partir del cual se formaba el agua y la tierra (por un proceso semejante a lo que hoy se conoce como condensación), este elemento permitía la concepción de la vida, de él dependían los seres vivos y, además, ocupaba el espacio que aparentemente está vacío (vale aclarar que para los griegos no existía el vacío).

Heráclito de Éfeso (540-475 a. C.) propuso el fuego como el fundamento de las transformaciones. Era claro que el fuego permitía la separación y obtención de los metales, a partir de las sales en las que se encontraban mezclados, y que sin este elemento no era posible la obtención del cobre rojo a partir de la sal azul, también era el fuego el que permitía las aleaciones, como en el caso del acero, formado a partir del hierro y el carbón. La propuesta de un elemento constitutivo se basaba en la observación de los cambios y la materia existente, y la defensa de cada uno de los cuatro elementos como principio generador de las múltiples formas de la materia tenía un sentido lógico, bajo lo que era posible observar y corroborar, pero no siempre la lógica conduce a la verdad.



La propuesta de que la tierra, por sí misma, fuera el componente constitutivo de la materia no existió entre los pensadores griegos (Brock, 1998, s.p.). Empédocles (490-430 a. C.), discípulo de Pitágoras, propuso que los cuatro elementos, incluyendo la tierra, daban origen a todas las formas materiales y que lo único que las diferenciaba era la proporción en que las conformaban cada uno de estos cuatro elementos. Existe un ejemplo antiguo, donde se demostraba que era indiscutible el hecho de que todos los cuerpos de la naturaleza estaban formados por los cuatro elementos: al quemar una rama de un árbol o un trozo de madera, se podía observar la presencia de cada uno de ellos. El humo que se liberaba era el aire; en la superficie del objeto hervía un líquido, el cual era el agua; la presencia de luz y calor en forma de llama era el fuego; y el residuo que quedaba después de quemar el trozo de material era la tierra, la cual no arde y, por ende, no estaba compuesta de ninguno de los otros tres elementos (Brock, 1998, s.p.).

El origen de todas las formas de la materia se explicaba por la interrelación de los cuatro elementos naturales, pero, ¿de dónde provenían, entonces, los cuatro elementos?

A esta cuestión, Aristóteles respondió diciendo que, la existencia de cuatro propiedades: calor, frío, humedad y sequedad daba origen a los elementos, que cambiaban su naturaleza al entrar a formar un compuesto, como se observa en la Tabla 1, nótese que en estas cuatro propiedades se encuentran dos pares de propiedades opuestas: calor –fuego y humedad– sequedad.

Las ideas aristotélicas de los cuatro elementos tuvieron una resonancia enorme, al perdurar como fundamento de la medicina antigua y medieval; el cuerpo humano era descrito a partir de ellos en la medicina de Hipócrates (teoría de los humores).

Aristóteles, además de los cuatro elementos, propuso la existencia de un quinto elemento: El éter. El concepto de cambio y transformación fue tomado desde la experiencia sensible del mundo; las cosas mudaban, los seres nacían y morían, los compuestos se podían transformar mediante procesos, entre otros. Pero en el cielo fijo, se encontraban los cuerpos celestes, las estrellas y los planetas (solo se conocían siete planetas en la Antigüedad: Sol, Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno y Luna), cuerpos que, a diferencia de

Tabla 1. Los cuatro elementos según Aristóteles

Propiedades	Elemento
Calor y sequedad	Fuego
Calor y humedad	Aire
Frío y sequedad	Tierra
Frío y humedad	Agua



los seres terrestres, no cambiaban; mantenían un recorrido armónico y constante, parecían inalterables, eran considerados inmutables e incorruptibles. Bajo este pensamiento, no podía considerarse que los mismos procesos de transformación de las cosas y de los seres de la tierra, ocurrieran para los cuerpos celestes; su naturaleza debía ser distinta, perfecta, inalterable. Al hacer uso del pensamiento matemático, Aristóteles sostuvo que estaban formados por un quinto elemento, en forma esférica, que denominó éter: *Aquello que no cambia*.

El atomismo

Si se lograra reducir un trozo de cualquier material hasta una parte tan pequeña, que ya no pudiera seguir siendo dividida, ¿qué obtendríamos? Tal vez un razonamiento similar a este fue la vía que permitió formular la existencia de un trozo de materia tan minúsculo, indivisible y estructural como el átomo, invisible a la percepción humana (Asimov, 1975, s.p.). Leucipo (450 a. C.), un filósofo jonio, fue quien propuso la existencia de estas partículas indivisibles y, posteriormente, su discípulo Demócrito (470-380 a. C.) fue quien las denominó átomos. Ahora la materia debía entenderse como las múltiples posibilidades en que podían combinarse los átomos; y las formas y características que tomase, estaban determinadas por el tipo y tamaño de aquellas partículas invisibles. A su vez, el concepto de vacío se hizo posible, debido a que al concebir que la materia estaba conformada por partes, debía poderse explicar qué era lo que mediaba entre ellas. En un primer acercamiento a esta cuestión, des-

de la teoría naturalista, se atribuía esa mediación al aire, pero el atomismo afirmaba que aquello que separaba un corpúsculo de otro era espacio vacío. Es increíble que meramente con el uso del pensamiento y careciendo del método empírico científico, estos hombres se hayan acercado tanto a la concepción moderna de la materia. Aunque, actualmente, se sabe que el átomo no es indivisible, sino que en él se encuentran una serie de partículas más pequeñas que lo componen, su nombre permaneció intacto en el desarrollo del pensamiento científico, aunque la definición de la palabra indique que es lo más pequeño e indivisible (átomo = a: "sin", tomos: "parte").

El pensamiento atomista fue olvidado en occidente por más de 2000 años, porque se mantuvo una explicación del mundo a partir de una causa inmaterial, inmutable, omnipresente y perfecta, comúnmente asociada con lo divino. Aunque algunas escuelas helenistas, como el caso de los epicúreos, recogieron parte de las posturas atomistas y las vincularon a sus enseñanzas. Lucrecio Caro (95-55 a. C.) escribió un poema titulado *Sobre la naturaleza*, en el cual plasma el pensamiento atomista, que una vez inventada la imprenta en el siglo XIV, permitió difundir la concepción material de la naturaleza. El atomismo tenía las llaves de entrada a la puerta de la química moderna, el retraso en el desarrollo del modelo atómico estuvo marcado por no poder reconciliar la filosofía y la experimentación. Lograr mantener vivo el pensamiento atomista antiguo, por ejemplo, mediante el legado de Lucrecio, permitió que posteriormente, un hombre como Robert Brown en 1827 describiera cuantitativa-



mente, en términos de moléculas, el movimiento aleatorio de partículas microscópicas en un gas como consecuencia de la agitación atómica (movimiento browniano) y permitió que más tarde, Albert Einstein demostrara la existencia de los átomos de manera definitiva. Lucrecio, al hacer uso del principal elemento para la ciencia: el asombro, no pasó inadvertido frente a las motas de polvo que se podían observar en los rayos de luz que atravesaban por un orificio, una rendija o que penetraban un lugar oscuro. Comenzó, entonces, una reflexión sobre estas partículas de polvo y empezó a considerar la materia como un conjunto de átomos, planteó que las causas de los movimientos subyacentes de la materia estaban ocultas a nuestra vista. El movimiento de las partículas de polvo, que sí logramos percibir, se debe a impactos entre los diferentes átomos que las hacen cambiar de dirección aleatoriamente; el nacimiento espontáneo del movimiento en el átomo sube de nivel y llega a una escala microscópica, donde sí se logra percibir dicho movimiento (Selva, 2008, s.p.). Actualmente, el movimiento browniano tiene un interés particular, porque con él se logra describir estadísticamente las fluctuaciones que tienen los sistemas de equilibrio, al ocasionar limitaciones en la medición exacta de propiedades físicas de los sistemas.

El legado árabe: la reinmersión de la alquimia en Occidente.

En tiempos de Aristóteles y al mando de uno de sus discípulos, Alejandro Magno de Macedonia, el Imperio persa fue conquistado. En el año 337 a. C., Macedonia se

encontraba en una situación política favorable, gozaba de un reconocimiento y respeto por parte de las ciudades griegas, y en una arremetida por conquistar el Imperio persa, se crea la liga de Corinto, con Macedonia en el frente. La muerte de Filipo II, rey de los macedonios, en este contexto político, puso en la balanza la hegemonía de este pueblo, de manera que, algunas ciudades griegas como Tebas, Atenas y Esparta intentaron aprovecharse de la situación. El sucesor de Filipo II, Alejandro, emprendió el restablecimiento del poder de Macedonia; una vez estabilizado el conflicto con los griegos, se embarca en la campaña hacia Persia, que lo llevó a una serie de victorias por más de 13 años, al lograr conquistar a Persia y llegar hasta la India. En el año 323 a. C., Alejandro muere, sin lograr retornar a casa y su imperio debió dividirse y ser manejado por sus generales.

Ptolomeo, el general más querido por Alejandro, tomó el poder de Egipto y se encargó de continuar el sueño de su amigo, de convertir la ciudad que llevó su nombre en la capital del imperio, la cultura y el conocimiento. La educación que recibió Alejandro inculcó en él un ansia de conocimientos y pasiones por descubrir el mundo, sin conocer fronteras, se atrevió a mezclar culturas que, hasta entonces, permanecían aisladas unas de otras, al atravesar tradiciones y costumbres de manera simbólica e intentar simbolizar la necesidad de unir Oriente con Occidente. Él mismo hacía parte de esos gestos de integración cultural, casándose con la hija de Darío, el rey persa.

Alejadría se convirtió en una ciudad cosmopolita y la dinastía que comenzó con el



general Ptolomeo siempre sostuvo el ideal de convertir la ciudad en el centro donde convergieran las diferentes culturas. Al hacer énfasis en la grandeza que representaba, se construyó una biblioteca que ostentaba guardar el conocimiento de siglos de las diferentes culturas, allí se establecieron los legados de la ciencia y la cultura, en un número considerable de papiros. Una vez el dominio romano, de corte cristiano, se tomó la ciudad de Alejandría, no dio tregua para que los conflictos entre paganos y cristianos se agudizaran. Declarado el cristianismo como religión del Imperio romano en el año 313 d. C., los cultos paganos tuvieron que comenzar a esconderse por temor a la persecución cristiana. La inmersión del cristianismo en Alejandría bajo la escuela catequética, intensificó los conflictos entre los paganos y cristianos. En el año 391, Teodosio prohíbe los cultos paganos y los templos empezaron a ser destruidos. En esa sucesión de episodios, en el año 415, ocurrió el asesinato de Hipatia de Alejandría, la última intelectual pagana y con ella se va la biblioteca, que una vez construyó la dinastía Ptolomeo como símbolo del sueño alejandrino del conocimiento e integración de las ciencias y las artes de la humanidad.

La Conquista de Egipto por parte de la cultura griega fue fundamental para el proceso histórico de la química. Los egipcios con su arte práctico y los griegos con su conocimiento estructurado y sistemático dieron un giro a la *Khemeia* originaria. Los conocimientos egipcios no solo estaban untados de un carácter religioso, con sus artes enfocadas al embalsamamiento de los muertos o elaboración de jugos de extractos naturales, sino que ciencia y religión trabajaban

de la mano, división que existía de forma conflictiva en Grecia. Al mezclarse las culturas, el curso místico y esotérico del arte de la *Khemeia* se adhirió a la cultura griega. Hasta en los propios dioses se empezaron a encontrar similitudes entre ambas culturas. Si en algún momento se consideró al egipcio como un místico que hacía uso de las fuerzas sobrenaturales, para obtener de ellas poderes que le permitieran alterar las sustancias; los griegos comenzaron a tratar de forma parecida a quienes lograban extraer componentes con propiedades inusuales de la materia común, transformar el color de las sustancias, liberar vapores al mezclar dos líquidos; a aquellos que conocían los secretos de la naturaleza los llamaron "magos" o "brujos". Para los egipcios existía una representación mítica denominada *Thot*, encargado de dirigir a los demás, de ser sabio conductor en las decisiones que el gobernante debía tomar, era un tipo de mensajero al estilo del dios *Hermes* para los griegos, los dos guardaban ese misterio de la naturaleza que transmitían en forma de mensajes y que solo pocos hombres lograban comprender y dominar, eran portadores de la sabiduría, mensajeros del conocimiento (Asimov, 1975, s.p.).

El lenguaje alquímico se tornó secreto y simbólico, para evitar que estafadores y timadores bebieran de dichos conocimientos, igualmente, la persecución que tuvo la *Khemeia* por parte del Imperio romano favoreció, que las circunstancias se tornaran difíciles y fuese necesario crear un lenguaje apropiado, para que solo aquellos que conocieran del arte pudieran entenderlo y aplicarlo, sin correr riesgo de ser perseguidos (Brock, 1998, s.p.).



Uno de los ejemplos más importantes es el lenguaje usado para referirse a los siete metales conocidos en la Antigüedad, donde se hace alusión a los siete planetas igualmente conocidos, como se observa en la Tabla 2. Los compuestos que estaban formados por algunos de estos metales, solían llevar la palabra del astro al cual hacían referencia y, por muchos años, cuando la *Khemeia* pudo ejercerse sin ningún temor, muchos compuestos heredaron los antiguos nombres, para ser instaurados en el conocimiento general de las prácticas químicas. Por ejemplo, para denominar el

nitrate de plata, se recurría a la terminología *Cáustico Lunar*. De igual forma, los elementos agua, tierra, fuego y aire eran considerados en el lenguaje simbólico (como se observa en la Tabla 3) y algunos compuestos eran designados bajo las características aristotélicas de húmedo, seco, frío y caliente. Por ejemplo, una vez fueron desarrollados los primeros alambiques y se fue perfeccionado el arte de la destilación, después del siglo X, los alquimistas usaban el término *aqua vitae* y *aqua ardens*, para referirse al alcohol de 60º alcohólicos y 90º alcohólicos, respectivamente.

Tabla 2. Simbología alquímica para designar los metales en la Antigüedad

Planeta	Símbolo	Metal
Sol	☉	Oro
Luna	☾	Plata
Mercurio	☿	Mercurio
Venus	♀	Cobre
Marte	♂	Hierro
Júpiter	♃	Estaño
Saturno	♄	Plomo

Tabla 3. Simbología alquímica de los elementos naturales

Elemento	Símbolo	Característica
Agua	▽	Frío y húmedo
Tierra	∇	Frío y seco
Fuego	△	Cálido y seco
Aire	△	Cálido y húmedo



Este hecho muestra cómo los compuestos descubiertos que comenzaron a tener una relevancia considerable en las prácticas alquímicas, eran llamados según sus afinidades con los elementos o los metales conocidos, incluso, los nombres de los días de la semana fueron dados a partir de los siete planetas conocidos en la Antigüedad.

Debido a que en aquellos tiempos no existía el conocimiento de los diferentes grupos de funciones químicas, como actualmente denominamos al conjunto de compuestos orgánicos e inorgánicos, era sencillo ligar las características del agua a aquella sustancia que tuviera propiedades medicinales, embriagantes e, incluso, que fuera considerada como capaz de prolongar la vida; esto sucedía con el alcohol, que era aparentemente agua, pero ardía fácilmente, podía transformarse, generaba calor, sanaba heridas y podía curar de males emocionales y físicos.

Desde los comienzos, la búsqueda del cambio de un metal en otro fue un punto de estudio entre los alquimistas, particularmente, transmutar el plomo o el hierro en oro. El legado antiguo de las escuelas griegas naturalistas sostenía que la materia estaba formada a partir de un elemento primordial; si las múltiples formas no son más que las manifestaciones de una materia esencial, la idea atomista podía aceptarse como cierta: la materia se organizaba a partir de conjuntos de partículas indivisibles denominadas átomos, que podían mezclarse y ordenarse, y dar origen a todo lo conocible. El átomo debía ser entonces el *Arché*, el principio de todas las cosas.

Para una visión del mundo antiguo, el cambio se presentaba espontáneamente en toda la naturaleza; el agua parecía que hervía en los océanos y se fugaba en forma de aire, la tierra parecía que se formaba cuando el aire se condensaba en agua al llover y caía. Las primeras explicaciones del mundo no podían tener una valoración científica como actualmente ocurre, la experiencia y la observación eran todo con lo que contaban los hombres. ¿Por qué considerar, entonces, imposible la transformación de la materia en cualquier otra cosa? Debería existir un método oculto en la naturaleza, que permitiera llevar a cabo la transformación de un metal en oro, la cuestión era descubrirlo y en eso se centraron la mayoría de los alquimistas.

Al escuchar pronunciar la palabra *alquimia* o hablar sobre la posibilidad de transformar cualquier metal en oro, se generaría una sonrisa de parte de los químicos modernos, pero realmente, debido a los avances de la física y la química, hasta la actualidad, se ha podido lograr superar ese tabú que existía en el campo científico, hasta el punto de considerar el preámbulo alquímico pieza fundamental para elaborar el rompecabezas que describe el desarrollo de la historia de la química (Guirao, s.f., s.p.). Si hoy en día sabemos que lo que define a un elemento químico y lo diferencia de otro es el número de protones que alberga en su núcleo, tan solo tres protones hacen que el plomo diste del oro (Pb, $Z=82$; Au, $Z=79$, siendo Z : número atómico). El desarrollo de la tabla periódica estaba muy lejos aún, los alquimistas se basaban en que era posible lograr un cambio de propiedades físicas, como el color, para atre-



verse a formular la posible transmutación de los metales. Por ejemplo, para el caso del hierro, metal de color rojizo cuando se encuentra formando sales, podían obtener un metal gris por medio de calor, cuyas propiedades son realmente diferentes a las que tenía inicialmente la sal de hierro en sus menas. De esta forma, no era impensable convertir cualquier material en otro, solo era cuestión de modificar las propiedades físicas que los caracterizaban.

La búsqueda se centró en los métodos de experimentación correctos para llevar a cabo la transmutación de un metal a oro, metal preciado, pues se encuentra puro en la naturaleza y se mantenía inalterable frente al calor, principal causante de las mutaciones. Se tuvo como punto de partida seleccionar, entre los materiales conocidos, cuáles se acercaban a las propiedades del oro, ya fuera por su aspecto físico o su significado hermético. La obtención de un material de un color aparentemente amarillento podía significar el logro de la alquimia; de esta forma, metales como el latón, obtenido por medio de una aleación entre cobre y zinc, llegó a ser considerado como oro.

En el siglo VII, la cultura árabe comenzó a expandirse fuera de la península donde había permanecido aislada. Cuando conquistaban territorios en toda Europa, se toparon con el legado greco-egipcio, que había logrado permanecer intacto gracias a los Nestoicos (Asimov, 1975, s.p.). El curso que tomara el arte de la *khemeia* con los árabes, le permitió salir del oscurantismo, en el cual permaneció por tanto tiempo, bajo la dominación romana. La palabra

khemeia se convirtió en *al-kimiya*, que para los europeos se convirtió en alquimia. En el desarrollo de este trabajo se ha escrito indistintamente *alquimia* o *khemeia*, realmente, porque hacen alusión a lo mismo: El arte y la práctica de la transformación de la materia, el cual abarca desde el 300 a. C. hasta el 1600 d. C.

El legado árabe a la cultura occidental europea es enorme, desde la terminología hasta el perfeccionamiento de técnicas de purificación y extracción. En la Tabla 5, pueden observarse algunas palabras de origen árabe, que enriquecieron nuestro idioma. Aquella cultura acogió con asombro y se empeñó en trabajar los saberes heredados de los griegos y los egipcios, para conducir por un camino de desarrollo y progreso el arte de la alquimia, muchos de los instrumentos de laboratorio actuales tienen sus principios en los desarrollos de los aparatos árabes utilizados para la extracción y elaboración de sustancias con fines medicinales. Entre los desarrollos que deben atribuirse a los árabes están: la obtención de los métodos para extraer carbonato de plomo, ácido acético, cloruro de amonio y ácido nítrico. La transmutación de los metales también fue un tema de interés de los alquimistas árabes (Guirao, s.f., s.p.).

Entre los hombres más importantes en la alquimia árabe se encuentra Ibn-Hayyan (760-815 d. C.), reconocido por sus métodos de síntesis y descubridor de algunos de los compuestos más importantes en la Antigüedad, como, por ejemplo, el ácido acético. La ciencia árabe logró adoptar y difundir los conocimientos de las culturas conquistadas, la religión musulmana



Tabla 4. Algunas palabras de las lenguas romances heredadas de la cultura árabe

Letra	Palabra	Letra	Palabra
a	Alcohol	m	Marfil
b	Boráx	n	Nafta
c	Circón	o	Ojalá
d	Destilación	p	Paraíso
e	Elixir	q	Quiosco
f	Fideo	r	Res
g	Garrafa	s	Sandía
h	Hachís	t	Talco
i	Islam	u	Ulema
j	Jarra	v	Valija
k	Kermes	y	Yemení
l	Latón	z	Zanahoria

por su carácter dominante no veía ningún riesgo en acoger los saberes alquímicos y su fe no se sentía amenazada, como sí ocurría con la religión cristiana. Los árabes eran prácticos y la ciencia era considerada como la observación de la naturaleza y su utilización para mejorar la vida (Pontificia Universidad Javeriana (s.f.) [40]).

La alquimia es considerada la precursora de la química. Cuando se alude a aquel término se hace referencia a la transmutación de los metales básicos en oro, pero en realidad la alquimia fue mucho más compleja que esto. En el periodo en el que se desarrolla la alquimia se dieron diversos avances en métodos de síntesis y purificación de compuestos químicos, descubrimientos de algunos elementos de la tabla periódica y una aplicación de estos conocimientos en el campo de la medicina, el arte y la arqui-

tectura, que permitieron esbozar la línea histórica que dio origen a la química moderna, mediante el método científico.

Pero también existió un carácter esotérico o espiritual en los procesos alquímicos, para alcanzar análogamente la purificación del ser humano. Mediante la observación de los cambios en la naturaleza o la obtención de elementos puros a partir de compuestos, se logró concebir como posible el proceso de purificación a una escala humana: El hombre se consideraba como un pequeño microcosmos, en el cual podían acontecer los mismos fenómenos de transformación que ocurrían en el macrocosmos y la naturaleza; por ejemplo, la búsqueda del oro fue asimilada como la búsqueda del estado áurico del ser humano: si se lograra encontrar el método para obtener oro, se encontraría aquella sus-



tancia denominada por los árabes como *elixir* y, podría tener, en los humanos, las propiedades de otorgar la inmortalidad, de curar todas las enfermedades (panacea) y de obtener la eterna juventud.

La alquimia fue universal

Situar un lugar geográfico y una época exacta para datar los orígenes de la alquimia, aunque hayamos mencionado que el origen de la palabra proviene de Egipto, no estaría acorde con lo que muestra la historia. En diversas culturas se encuentran avances y descubrimientos en periodos que nada tienen que ver unos con otros sobre la obtención de compuestos, perfeccionamiento de técnicas de fabricación, síntesis, purificación, elaboración de bebidas fermentadas, entre otros, incluso, algunas de ellas surgiendo en épocas distintas y siendo consideradas como un avance innovador. Por esta razón, es que diversos historiadores opinan que la alquimia surgió en varias, por no decir en todas, las culturas antiguas, en diferentes momentos (Brock, 1998, s.p.).

Algunos de los conceptos de la alquimia surgieron en muchas de las diferentes culturas antiguas, mientras que otros solo se desarrollaron en culturas particulares. Por ejemplo, el arte de la extracción y la manipulación de los metales, no solo fue esclarecido por las culturas de Europa occidental, sino, también, en Siberia, Indonesia y África, y las mitologías que surgieron a partir del arte de la extracción de los metales, guardan paralelos significativos en el simbolismo mítico de estas culturas:

la presencia de los metales se explicaba a partir de la gestación, la tierra madre generaba los metales y ellos crecían en ella como si se alimentasen de un vientre. El trabajo de obtención y purificación se parecía al trabajo de parto (Brock, 1998, s.p.).

La cultura china tenía en su filosofía las ideas y prácticas alquímicas de la *aurifacción* y la concepción del universo, según los taoístas se basaba en términos de contrarios; el Yin (femenino, negativo, frío y oscuro) y el Yang (masculino, positivo, caliente y luminoso) (Brock, 1998, s.p.). Entre la lucha de contrarios se originaban los elementos, que no eran cuatro como para los griegos, sino cinco, excluyendo al aire e incorporando al reino metal y a la madera en el pentagrama chino. La concepción aristotélica de que los elementos se originaban debido a la mezcla entre dos pares de características opuestas (frío y caliente, húmedo y seco), guarda alguna semejanza entre la visión del mundo como una lucha de características contrarias (Brock, 1998, s.p.).

En un primer acercamiento con los orígenes de la *khemeia* se había resaltado el arte de extracción de jugos de los egipcios, la preparación de bebidas a partir de los principios químicos naturales. Aunque debió pasar un largo tiempo para que los árabes conquistaran Europa y el conocimiento, que había surgido en el cruce entre las cultura griega y egipcia, retornara al camino de la ciencia, el concepto de *elixir*, que comienza a tener importancia con los árabes, ya había sido trabajado desde una concepción oriental del mundo por los taoístas. La idea de la armonía del universo



estuvo ligada a los principios alquímicos; los griegos con su filosofía de los opuestos, al igual que los chinos, consideraban la forma de obtener el equilibrio y la perfección que se evidencian en la naturaleza, de esta forma podría entonces curarse cualquier enfermedad, retornar a un estado armonizado, dado que la enfermedad no era más que un desequilibrio entre los estados Yin y Yang. La elaboración de elixires a partir de la extracción de componentes de las plantas o raíces estaba relacionada con la energía que podía tener la naturaleza de la materia en cuestión. Sustancias ricas en Yang como el cinabrio rojo (sulfuro de mercurio), el oro, el azufre y sus sales podían generar la restauración del equilibrio. De esta forma, las prácticas alquímicas chinas estaban unidas a la búsqueda del orden, de la armonización, de esto se derivó el descubrimiento de la pólvora, mediante una reacción basada entre sustancias ricas en Yin y Yang, respectivamente: el salitre (mezcla entre nitrato de sodio y nitrato de potasio) y el azufre (Brock, 1998, s.p.).

El oro era el símbolo de la perfección y la búsqueda, por obtenerlo a partir de metales más sencillos, fue el motor de la alquimia. Pero, cuándo y cómo comenzó este metal a ser considerado superior a los demás, es una pregunta abierta, pues bien, se ha dicho que la alquimia greco-egipcia se interesó en desarrollar métodos para su obtención y para vincularlo con la búsqueda de la panacea griega. El hecho de que el oro también estuvo en la mirada de la alquimia china, introduce el interrogante sobre si surgió primero en China o en Europa. Es claro que la alquimia griega se interesó más en elaborar métodos y encon-

trar la mezcla perfecta, que diera origen al oro; mientras que los chinos enfocaban su filosofía hacia la consecución de un estado perfecto, de la inmortalidad, pero directamente relacionado con las propiedades y el simbolismo del elemento *Au*.

La alquimia china, que siempre estuvo más cerca de la medicina que a la búsqueda de la transmutación de los metales, asociaba el oro con la longevidad e inmortalidad y, por esto, comúnmente se ingería en preparaciones de elixires en un arte denominado *Wai tan*. Posteriormente, la búsqueda del elixir de la vida se tornó esotérica y no se hacían ingestiones de oro por el alto índice de muertes ocurridas, más bien, se pensaba que existía en cada ser humano la posibilidad de hacer más longeva la vida e, incluso, ser joven para siempre y, a partir de ahí, se desarrollaron técnicas fisiológicas basadas en la respiración, ejercicios, hábitos de comida, entre otros, que permitieron extraer del cuerpo aquella sustancia o estado de inmortalidad; este arte se denominaba *Nai tan*.

Los desarrollos chinos marcaron una diferencia en la nueva visión de la guerra en Europa Occidental, cuando las distintas formulaciones de la pólvora, que fueron llevadas a este continente en el siglo XIII, posibilitaron que los combates ya no tuvieran una ventaja para quienes iban a caballo; la pólvora y los fuegos artificiales, que facilitaban los combates a distancia, fueron herencia de la alquimia china.

La química práctica no nace en ninguna de estas culturas en específico, sino en todas; los árabes, griegos, egipcios, babilónicos y



demás, ya ejercían diferentes técnicas de fabricación, sea para elaborar metales, pinturas, colorantes, perfumes, cerámicas, fuegos artificiales o el simple hecho de cocinar. Una vez descubierto el fuego por los prehistóricos, el hombre cambió su alimentación, los alimentos podían ser más fácilmente digeribles. El arte de la cocina nace paralelamente, incluso, se ha llegado a afirmar que la gastronomía fue la primera ciencia, porque con el uso del fuego se comenzó a entender y se aplicaron los conceptos de transformación de la materia. Por estas razones debemos considerar que los orígenes de la química, como un arte práctico, no surgieron con la filosofía ni el albor del pensamiento, sino que el hombre, a medida que se encontraba frente a la naturaleza y se le revelaban los cambios, fue aplicando y haciendo uso de aquellos fenómenos, así fuera por accidente. Incluso, los comienzos de la fabricación de colorantes y perfumes por los egipcios o el uso de la cerámica por chinos y babilónicos, no debieron tener un comienzo en el pensamiento, sino, más bien, desde un descubrimiento accidental, que no pasó desapercibido y se fue tornando en técnica, a medida que se repetía una y otra vez algún proceso, hasta conseguir lo que accidentalmente había ocurrido.

Con el pasar del tiempo, el hombre se fue tornando técnico y dominó las artes de la transformación, existen datos históricos desde 3000 a. C., que revelan el desarrollado conocimiento de materiales y sus usos, entre ellos, destacan el uso del azufre, el carbón mineral, el sulfuro de arsénico para la elaboración de pigmentos, el sulfuro de antimonio para la elaboración de estibinita

(otro pigmento), la sal común y la sal doble de potasio y aluminio (alumbre), esta última usada como astringente y mordiente de tintes vegetales (Brock, 1998, s.p.).

La transmutación de los metales y el elixir de la vida

Quando nos referimos al periodo histórico del saber químico conocido como la era de la alquimia, podríamos mencionar que consistió básicamente en un desarrollo de un pensamiento con base en la observación de la naturaleza, es decir, que a medida que observaban el mundo y el cielo estrellado, entendían que todo aquello que acontecía en el firmamento, en la tierra y en el hombre cumplía las mismas reglas de la naturaleza, el ciclo de la vida se daba en aquellos tres niveles de existencia; observaban cómo la materia tenía un periodo de vida al igual que el hombre y no descartaban la idea, que con las estrellas ocurriera lo mismo. En esa observación del mundo, entendieron que todo está en movimiento y sometido al cambio, las cosas existen, crecen o se desarrollan, para después mutar, es decir, empezar a cambiar y, finalmente, transmutar, como quien dice, cambiar su naturaleza. Si esto podía corroborarse al ver crecer una planta, un árbol, un animal y hasta una montaña, entonces, por qué no podría ocurrir igual en el hombre y en todas las cosas que existen en el universo. Según todo esto, era posible lograr transformar un metal en otro, especialmente en oro.

Parece ser que la alquimia no llegó al occidente latino hasta el siglo XI, cuando aparecieron las primeras traducciones del



árabe (Brock, 1998, s.p.). Los conceptos de la piedra filosofal y del elixir de la vida se encuentran por primera vez en la tradición árabe, ideas que también se desarrollaron en la alquimia china. Dos alquimistas árabes cumplieron un papel muy importante en la concepción y transmisión de la transmutación de los metales y la búsqueda de la panacea griega; el primero de ellos, Jabir Ibn Hayyan, también conocido como Geber (721-815 d. C.). Este personaje fue un prolífico alquimista, se le atribuyen cientos de obras, las cuales plantaron los principales conceptos, en especial, la teoría del mercurio y el azufre, para explicar la composición de los metales (Brock, 1998, s.p.).

La teoría de Jabir Ibn Hayyan partía de que los metales se generaban en la tierra, crecían, germinaban como si fueran frutos. El principio que daba origen a los metales era concebido como una mezcla entre las cualidades humeantes e ígneas que tiene el azufre y la cualidad acuosa, que tiene el mercurio. La explicación de esta teoría es de carácter filosófico y parece ser heredada de los estoicos. Los metales se forman a medida que partículas de azufre y mercurio se evaporan, o en términos alquímicos, exhalan de la tierra, hasta formar un sólido homogéneo. Es notable destacar la explicación sobre el porqué cada metal es diferente, si proviene de las mismas sustancias: las diferentes formas y propiedades de los metales se deben a la proximidad entre sus partículas; metales ligeros tienen partículas de mayor tamaño con distancias grandes entre ellas; mientras que los metales pesados tienen partículas, obviamente de mercurio y azufre, más pequeñas y con menor distancia

de separación. Entonces, para lograr fabricar metales de alta densidad, peso y valor como el oro, se debía partir de algún metal menos noble o más ligero, y disminuir las distancias entre sus partículas o reducir sus tamaños. En los procedimientos para intentar fabricar oro se hacía énfasis en la sublimación del mercurio a partir de cinabrio: los cambios de densidad, maleabilidad y color de los metales estaban atribuidos a agentes mercuriales, a los que los alquimistas se referían como medicinas, elixires o tinturas, lo que en Occidente será denominado *piedra filosofal*, es decir, la clave de la transmutación.

El segundo de los alquimistas árabes importantes en el desarrollo del legado greco-egipcio fue Al-Razi (850-923 d. C.), conocido también como Rhazes, fue un médico y alquimista persa, a quien se le debe la clasificación de las sustancias en metales, vitriolos, bórax, sales y piedras, basándose en las propiedades de la solubilidad y el gusto (Brock, 1998, s.p.). Desarrolló técnicas de purificación, separación, mezcla y eliminación del agua por solidificación y mediante destilaciones de mezclas de vitriolo (mezcla de minerales, principalmente, sulfato cúprico), alumbre, sal, salitre y cloruro de amonio, llamada sal de amoníaco, obtuvo diversos ácidos de utilidad amplia, que actualmente permanecen como compuestos fundamentales de la industria química: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico. A estos compuestos se les llamó *aguas fuertes*. En su obra dejó explícito el funcionamiento de los principales aparatos utilizados en los laboratorios antiguos, los mismos aparatos perduraron hasta finales del siglo XIX, como herra-



mientas de uso frecuente en los talleres, laboratorios, farmacias, entre otros. Entre estos instrumentos caben ser mencionados las cubas, frascos, jarras, cacerolas, velas, lámparas de nafta, braseros, el antiguo horno alquimista, denominado *atanor*, espátulas, morteros, embudos, alúdeles, alambiques, entre otros (Brock, 1998, s.p.). Además, fue el primer hombre en describir el cuadro clínico de la viruela.

Una de las técnicas descritas y perfeccionadas por Al-Razi, es lo que actualmente se conoce como la oxidación de un metal, aunque en aquellos tiempos era descrita como una técnica de calcinación, donde se llevaba un material a un estado muy pequeño, parecido a un polvo. En el proceso se liberaban vapores, uno de los instrumentos utilizados para este método era el Aludel, un recipiente de barro semejante a una olla sin fondo, que al conectarlos en serie conformaban el conocido *horno filosofal*, pues en él se lograban condensar los vapores mercuriales liberados en el procedimiento de sublimación (cambio de estado directamente del sólido al vapor) de minerales como el cinabrio (sulfuro de mercurio). La manera como los alquimistas obtenían las altas temperaturas necesarias para llevar a cabo los procesos de sublimación, era mediante el uso del carbón mineral, madera, aceite, cera, brea e, incluso, estiércol, donde se avivaba el fuego por medio de fuelles (Sagrera, 1991, s.p.). Cuando los procesos de calentamiento se hacían sin exponer directamente los componentes, se utilizaban baños de arena, de estiércol o de agua; este último, conocido actualmente como el *baño María*, se le atribuye a una mujer del siglo III a. C., conocida como Ma-

ría la Hebrea. El uso de la temperatura fue importantísimo para el desarrollo de los diferentes métodos de extracción, purificación, solidificación, destilación, entre otros. Incluso, mientras culturas como la árabe o la griega utilizaban los alambiques para extraer los *licores espirituosos*, es decir, los alcoholes, mediante destilaciones; esto es, el uso de calentamiento y posterior condensado; la cultura china obtenía licores concentrados mediante congelamiento de mezclas de agua y alcoholes: al bajar la temperatura y al utilizar una fuente natural como el hielo, se lograba congelar el agua y dejaba en estado líquido a los alcoholes, que necesitarían una disminución mayor de la temperatura para congelarse.

La destilación, entendida en un sentido amplio como separación por calentamiento, hacía parte del proceso de transmutación; se utilizaba el concepto de purificación, como requisito para alcanzar la conversión de un metal *impuro* en oro, y el número de destilaciones estaba directamente relacionado con la posibilidad de obtener éxito en el proceso. El alambique era el aparato usado para estos procesos; las sustancias se condensaban, sublimaban o se ponían a reaccionar en su parte superior (*Ambix*). Más tarde, la palabra alambique se usó en Occidente para designar todo el aparato y para realizar lo que hoy se llama destilación. La destilación, para los alquimistas, tenía como objetivo obtener sustancias más puras de las que se introducían al alambique, así, mediante el enfriamiento del destilado se lograban separar las sustancias que exhalaban después del calentamiento de un material. Los alquimistas desarrollaron métodos de enfriamiento,



que actualmente constituyen los principios de transferencia de calor de la ingeniería, perfeccionaron la forma de enfriar, mediante corrientes de aire elevando la cabeza del alambique y, posteriormente, introdujeron un sistema de enfriamiento mediante una destilación continua por serpentines de agua fría, algo muy parecido a la configuración de los intercambiadores de corazas y tubos de las industrias químicas actuales.

El alcohol potable, *aqua ardens*, fue siempre una sustancia que se creía tenía poderes curativos, era el disolvente para el oro e, incluso, se comenzó a tomar en los *elíxires de la vida*. Los alquimistas consideraban a la naturaleza y al cosmos como una gran probeta, donde continuamente se generaban innumerables reacciones químicas. La alquimia veía posible realizar este tipo de reacciones a una menor escala, como se pretendía hacerlo en un alambique, porque como se ha dicho anteriormente, todo lo que acontece en el universo es análogo a lo que acontece en el hombre y la naturaleza, y si la naturaleza, en el seno sosegado de la tierra, realiza esta transmutación, ¿por qué no podemos hacerlo nosotros?, se preguntaban los alquimistas.

La alquimia no solo fue una precursora de la química, sino que era el método más aceptado para el conocimiento de la naturaleza hasta el siglo XVIII. La mezcla de culturas fue creando un saber con carácter técnico y espiritual; los egipcios que tenían su religión ligada al saber tuvieron una gran incidencia en esto. El desarrollo de la teoría de la transmutación de los metales tuvo un lenguaje hermético y consistía en una tríada: El azufre, heredado de la cul-

tura egipcia, simbolizaba el alma; el mercurio, heredado de la cultura griega, vino a representar el espíritu; y de los conocimientos técnicos y metalúrgicos de artesanos y herreros se heredó el concepto de sal o aquella sustancia que daba cuerpo a los metales (Gebelein, 2002, s.p.). De esta forma, la materia prima, única e indestructible, necesaria para lograr la transmutación de los metales, estaba compuesta por tres sustancias: azufre (principio fijo), sal (quintaesencia) y mercurio (principio volátil). Mediante esta receta se alcanzaría entonces el elixir de la vida, la eterna juventud, la más preciada búsqueda de todos los alquimistas. En la cosmovisión alquímica, se consideraba al mercurio como elemento que confería propiedades metálicas a las sustancias y al azufre, como el que impartía la propiedad de combustibilidad. El tercer principio fue añadido por uno de los últimos alquimistas, el físico suizo del siglo XVI, Theophrastus Bombast von Hohenheim, conocido como Paracelso, quien sugirió la existencia de una sal como un tercer elemento de la tríada, la cual daría la resistencia al calor y que sería la famosa piedra filosofal o elixir de la vida.

La fabricación de la piedra filosofal era el gran objetivo del trabajo alquímico. Esta piedra tenía las propiedades de transformar los metales innobles en oro o plata, al usarse junto con los otros principios de la tríada en la proporción correcta. Se creía que era un polvo rojo que se obtenía como precipitado de la fundición de metales. La piedra filosofal tenía tres características: transmutaba los metales, aquí se enfocaba el interés de los alquímicos; era un remedio universal, cuando se disolvía en



vino o alcohol; y era un combustible eterno, cuando se lograba introducir en una ampolla de vidrio, al iluminar ininterrumpidamente sin necesidad de combustible (Gebelein, 2002, s.p.). Además, permitía la fabricación de piedras preciosas y diamantes, fundía el vidrio, haciéndolo maleable, flexible e irrompible (Gebelein, 2002, s.p.). El remedio universal era el elixir de la vida, llamado también *aurum potable* (oro potable). Naturalmente, como se ha dicho, muchos estafadores y falsos alquimistas lograban vender cualquier sustancia amarillenta como oro potable, por ejemplo, perclorato de hierro y líquidos coloreados con azafrán y cúrcuma. Del concepto de oro como elemento perfecto se ha instaurado en la cultura el concepto áurico como dador de perfección y se le ha atribuido a lo simétrico y armónico. Por ejemplo, léase el concepto de número áurico, una proporción que guardan dos medidas, no solo en las figuras geométricas, sino en la naturaleza y en el arte, esta proporción se ha identificado con la belleza y la perfección: la cantidad de abejas macho y hembras que hay en una colmena, la disposición de los pétalos de las flores o las proporciones del hombre de Vitrubio de Leonardo Da Vinci (1452-1519) la presentan.

El oro fue considerado como un metal noble, porque, a diferencia de otros metales como el cobre y el estaño, presentaba homogeneidad en algunas de sus propiedades físicas, ante todo, en su color y forma. Mientras el cobre tenía orificios y su color podía variar dada su facilidad para oxidarse, el oro se mostraba siempre brillante y uniforme. El oro era considerado un metal sin impurezas, difícil de disolver, aunque con

los árabes se logró encontrar la forma de hacerlo. Mientras comúnmente se utilizaba aceite de vitriolo (ácido sulfúrico), ácido muriático y agua fuerte (ácido nítrico) para disolver metales como el cobre; el oro permanecía intacto en estas soluciones y solo hasta el descubrimiento de que podía disolverse en una mezcla de tres a cuatro partes de ácido nítrico, con una parte de ácido clorhídrico, se creía que parte de su perfección se debía a su imposibilidad de ser diluido. A esta mezcla de ácidos la denominaron *aqua regia*, porque lograba disolver metales nobles como el oro y el platino. Actualmente, se sabe que el oro no puede ser disuelto por ácidos comunes por su resistencia a la oxidación, el agua regia actúa disolviendo al oro no por acción de los ácidos individualmente o por la proporción correcta de ellos, sino, porque al mezclarse forman dos compuestos altamente oxidantes, denominados cloruro de nitrosilo (ClNO) y cloro gaseoso (Cl₂). En conclusión, considerar al oro como un metal perfecto, por su color y sus propiedades, fue la rienda que mantuvo a los alquimistas empeñados desde cualquier rama, fuera la medicina, la alfarería, la metalurgia o, incluso, la filosofía hermética, en no abandonar la ciencia de la naturaleza y en esa búsqueda incesante por lograr dominarla, el hombre se topó con un arte práctico que le permitió influir en la vida cotidiana, en la guerra, la constitución de las ciudades, las artes, la medicina... y, entre otros: la química.

Alquimia vs. química

Diversos personajes que reconocemos por sus aportaciones a la química teórica



estuvieron bajo la influencia de los misterios y prácticas ocultas de la alquimia y algunos de ellos fueron reconocidos como grandes alquimistas; otros, por el contrario, mantuvieron su identidad lo bastante escondida, para que no fueran tratados como supersticiosos y científicos ociosos, pues bajo esta denominación, fácilmente sus aportes a la ciencia hubieran sido ignorados, debido a que la alquimia, en muchas de sus fases fue condenada como un arte que se practicaba bajo los dominios de poderes malvados y se asociaba con lo prohibido. Por citar algún ejemplo y nada menos que a un personaje fundamental en el desarrollo del método científico, mencionamos entre aquellos alquimistas a Roger Bacon (1214-1294), un monje franciscano inglés, cuyos aportes a la ciencia fueron los descubrimientos de las leyes de la reflexión y refracción de la luz (Gebelein, 2002, s.p.). Hubo muchos otros personajes, antes y después de él, que, por medio de sus contribuciones a la química, basados en un pensamiento alquímico, fundaron las bases y lograron aportes fundamentales para dar origen a lo que se conoce como química moderna. No siempre puede entenderse la ciencia como la búsqueda de la verdad, mediante el método racionalista y positivista, incluso, hombres de la talla de Isaac Newton (1643-1727) estuvieron influenciados por el carácter hermético de los orígenes de la ciencia. Newton dedicó gran parte de su vida a la búsqueda de la piedra filosofal, creía en las teorías alquimistas de la transmutación de los metales, incluso, dedicó gran parte de su estudio a las Sagradas Escrituras y la búsqueda de una cronología para ellas, a las profecías bíblicas y la medicina oculta. Fue

en 1936, cuando el economista John Maynard Keynes adquirió algunos manuscritos del científico inglés, donde se comenzó a conocer la faceta no matemática e irracional del pensamiento newtoniano. Establecer el momento de quiebre entre lo que se consideró la alquimia y la química como la entendemos hoy en día, se le atribuye a la obra que realizó Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794), a partir de la superación del concepto del flogisto, como causa de la combustión (Brock, 1998, s.p).

La alquimia siempre fue un saber total, comprendía religión, arte y ciencia. Los alquimistas aseguraban tener guardados los secretos de la naturaleza. Desde una concepción bíblica, en el occidente católico se decía que, después del diluvio universal, los conocimientos que había recibido el hombre de Dios habían desaparecido y que los restos habían perdurado en el arte alquímico, mediante el cual se podía recobrar la sabiduría originaria, el desvelamiento de la naturaleza, la ley divina. Mediante esta definición se lograba aclarar que los propósitos del alquimista no solo estaban enfocados a la consecución de oro y el elixir de la vida, sino a la búsqueda de la naturaleza íntima del hombre. Los descubrimientos, ensayos, procesos de transformación, entre otros, estuvieron vinculados desde un punto material y otro espiritual, es decir, los laboratorios eran adaptaciones de lo que ocurría en el universo y, por ende, si se lograba purificar algo mediante un proceso químico, se extrapolaba el sentido a una purificación interior. Si en la naturaleza, los elementos nobles como el oro se lograban obtener mediante métodos de transformación, el carácter de pureza del oro se in-



corporaba al estado de pureza del alma y, así, mientras unos trabajaban en el campo material (exotérico), otros desarrollaban un pensamiento análogo desde un campo espiritual o interior (esotérico).

¿Dónde se encuentra la diferencia entre la química y la alquimia? "La química es la ciencia de los hechos mientras que la alquimia es la ciencia de las causas" (Guirao, s.f., s.p.). La actitud frente a la naturaleza es lo que las diferencia. Si bien el prefijo "al" indica que entre *alquimia* y *química* no hay diferencia en contenido, sino solo en el legado del origen de la palabra, el carácter hermético que se incorporó en los saberes prácticos de herreros, farmacéutas, médicos, artesanos, entre otros, hace posible diferenciar entre una filosofía de la química y una química, entre la alquimia y la química o entre la filosofía hermética y la química; este carácter hermético permite aclarar que en los inicios de la química hubo simbolismo, religión, filosofía, superstición, magia, psicología, deseos de trascendencia..., que no escaparon a la mirada de hombres de alto nivel intelectual, como, por ejemplo: Isaac Newton o Johann Wolfgang von Goethe (Gebelein, 2002, s.p.).

Vamos a tomar la clasificación que hace Fulcanelli (1839-1953) de los intereses de la alquimia: *espagiria*, *arquimia* y filosofía hermética. La espagiria fue descrita por Paracelso como el saber sobre la elaboración de remedios y los conocimientos de médicos y farmacéuticos (Gebelein, 2002, s.p.). Desde la concepción de Fulcanelli debían incluirse los conocimientos de cerámica, fabricación de vidrio, elaboración de tinturas y colorantes, destilaciones, solidi-

ficaciones, procesos de purificación... Mientras tanto, a la metalurgia, especialmente, a aquella que se enfocaba en la transformación de los metales minerales, la denominó *arquimia*, aunque quienes dedicaron su vida a esto fueran también importantes espagiristas. La química como descendiente de la alquimia puede entenderse desde la espagiria y la *arquimia*; mientras que "la verdadera alquimia", una ciencia secreta, mística, oculta, simbólica y espiritual, es una ciencia esotérica, es la filosofía hermética y, hoy en día, perdura su lenguaje y su simbolismo, influyendo en muchas creencias gnósticas, religiosas y místicas. Por su parte, la ciencia de la transformación de la materia, de las reacciones químicas, del uso industrial de los compuestos y elementos, de la metalurgia, la farmacia, los plásticos, el petróleo, las bebidas y alimentos, los tejidos y los colorantes, la medicina, entre otros, está influenciada por aquellas épocas donde los espagiristas y *arquimicos* desarrollaron e introdujeron las bases del conocimiento científico, que sustentan todo este complejo de técnicas y saberes.

Alquimia moderna

Para los alquimistas, la naturaleza realizaba la transmutación sin intervención de alquimista alguno (Guirao, s.f., s.p.). Entonces, el fin de la alquimia era descubrir las leyes que rigen la naturaleza y lograr llevar a cabo esos mismos procesos de transformación en el laboratorio. Actualmente, con una mirada científica de la naturaleza, se entiende que, si se logra simular las condiciones de temperatura y presión en las cuales ocurren los procesos de cristalización,



fusión o gasificación, entre otros, se podría realizar las transformaciones que ocurren espontáneamente en la naturaleza.

El oro es el elemento número 79 de la tabla periódica, esto quiere decir que un átomo de oro contiene 79 protones y la misma cantidad de electrones. Su peso atómico es de 197, lo que indica que tiene 118 neutrones. Sabemos que lo que identifica a un elemento de otro es la cantidad de nucleones que posea, si se lograra introducir o retirar un protón del núcleo, sería posible obtener un elemento diferente. Por ejemplo, el platino tiene 78 protones y la misma cantidad de neutrones que el oro, entonces, si un protón es retirado del átomo de oro, se convertiría en platino o, por el contrario, si al platino se le añade por fusión un protón, se obtendría oro. Entonces, al recurrir a un lenguaje no equivocado, la química moderna estaría en la posibilidad de realizar el gran deseo de la alquimia. Esto demuestra que no se debe juzgar una época por su carácter subjetivo y simbólico, porque en ella yacen los orígenes de los deseos e ilusiones, que vagamente parecen supersticiones, pero que, en algún otro momento histórico, podrían ser validadas científicamente.

En 1938, un científico galardonado con el Premio Nobel demostró, por medio del bombardeo de átomos radiactivos, que no solo se podía transmutar un metal en otro, sino que también se podían crear artificialmente metales, como se hizo con el fermio, al partir del uranio o del einstenio. Sin embargo, reconoció el alto costo y la dificultad que tendría pensar en producir metales más allá de un simple experimento científico.

Las reglas de la desintegración atómica dicen que a partir de mil kilos de uranio se podría obtener solo un gramo de plomo no radiactivo y que, para esto, se necesitarían alrededor de diez mil años. Esto indica que en nuestro planeta tuvieron que pasar millones de años de desintegración atómica, para producirse los diferentes metales que conocemos. Uno de los pensamientos de la alquimia era que el proceso de creación del oro por la naturaleza era largo y que de todo metal germinaría oro si se disponía del tiempo suficiente; la alquimia buscaba los métodos de simular el proceso que haría la tierra y buscaba cómo acelerarlo, se creía que la piedra filosofal era aquel agente que aceleraría el proceso de transmutación, que naturalmente ocurre.

La fabricación de oro era un sueño alquímico, pero con la concepción actual de la materia se comprobó que era un sueño realizable, aunque no fuera rentable. En 1980, por medio de un acelerador de partículas en el Laboratorio Lawrence de la Universidad de Berkeley, California, se logró obtener una millonésima parte de oro a partir de bismuto, equivalente a no más de un centavo de dólar, al demostrar que la transmutación de un metal en oro era posible. Este experimento costó diez mil dólares, solamente en la compra de la muestra de bismuto (Brock, 1998, s.p.).

El valor del oro aún se encuentra ligado a su simbolismo de perfección; su color, su aspecto y sus propiedades físicas lo dotaron de valor superior, sin contar con que ha sido sinónimo de riqueza y sustento de la economía de los estados. Pero la producción de oro, a partir de reacciones nuclea-



res costosas libera cantidades de energía abrumadoras y genera una cantidad ínfima del preciado metal. Esto deja claro que, hoy en día, lo valioso es el proceso de liberación de la energía, lo que realmente es nuestra piedra filosofal, puesto que la energía es la que nos ha permitido transformarnos como civilización, sin ella no podrían sustentarse nuestros desarrollos como sociedad tecnificada, basados en las conquistas de la ciencia.

Sobre la simbología y su implicación en los procesos químicos

Los alquimistas diferenciaban entre dos cambios que podía tener la materia; aquellos que podían ser revertidos fácilmente y obtener de nuevo los componentes iniciales y aquellos que no eran sencillos de revertir. Para el alquimista no era imposible retornar desde un óxido al metal puro. Esto estaba influenciado por el pensamiento de que la materia estaba formada por una mezcla de diferentes elementos, fueran los elementos naturales: agua, tierra, fuego o aire, o fueran composiciones de azufre, mercurio y sal, para el caso de los metales.

Al fundir el hielo se obtiene agua pura y al congelar esta agua se vuelve a obtener hielo. De igual forma, cuando se destila el mercurio se obtienen los vapores, que aparentemente pueden ser confundidos con el aire, al condensarlo, se retorna a tener mercurio en forma líquida. En estos procesos, la naturaleza de la materia no cambia,

tan solo lo hace su forma. Antiguamente, estos cambios eran concebidos como cambios en la naturaleza de la materia. Al partir, por ejemplo, de que se usaba el fuego, un elemento, para convertir el mercurio de líquido a gaseoso, se establecía que la naturaleza misma del mercurio cambiaba. Cuando se comenzó a entender que dichos cambios solo ocurrían en la manera cómo se manifestaba la materia y no en su naturaleza, lo que conllevaría a la formación de una nueva sustancia, tuvo que repensarse el valor del fuego como elemento, debido a que, si interactuaba con la sustancia, para tan solo permitirle cambiar de estado, entonces, ¿qué función cumplía como elemento, si no era para combinarse y formar una sustancia nueva?

Los cambios de la naturaleza que no son fáciles de revertir sí fueron sencillos de explicar, desde la formación de una nueva sustancia; por ejemplo: en la oxidación de los metales que ocurría, ya sea por exposición al oxígeno de las lluvias o en la manipulación en las fraguas, se verificaba la formación de nuevas sustancias, que cambiaban la apariencia, el color y las propiedades físicas de la sustancia original; se observó que intentar volver a la materia inicial no era posible bajo los métodos conocidos. Estos cambios, llamados cambios químicos, en su momento fueron llamados cambios alquímicos.

Vamos a ilustrar cómo funcionaba la explicación alquímica de un proceso bien conocido actualmente: la obtención de los metales a partir de sus sales, proceso que desde aquellos tiempos se conoce como calcinación.



Los alquimistas calcinaban una sal de un metal con alguna fuente de carbón como coque, derivados del petróleo, carbón mineral, entre otros. El fuego era un elemento que devolvía el flogisto a los metales, liberándolos de las impurezas y transformándolos en metales puros. El carbón actuaba como una fuente de flogisto.

Actualmente se conoce que el calor propicia una reacción de descomposición, donde se libera el metal puro y gases; el oxígeno, presente en el aire, se *reduce* (gana electrones) al interactuar con el carbono del carbón, lo que forma óxidos ácidos en estado gaseoso, como el óxido y dióxido de carbono.

En el proceso contrario, para explicar la formación de las sales a partir de los metales, los alquimistas aludían a la presencia del flogisto, que migraba del metal al exterior. Lo que no podían explicar era el aumento de peso de la nueva sustancia obtenida a partir del metal, que debería ser, en cambio, una disminución de peso, porque el metal estaría liberando fuego o flogisto.

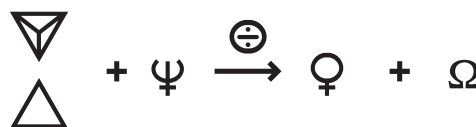
Hoy en día se entiende que en el aire hay una proporción de oxígeno y de dióxido de carbono, que pueden reaccionar con el metal para formar óxidos metálicos y, posteriormente, sales metálicas, lo que explica el aumento de peso del material resultante, gracias a la ganancia de materia en forma de átomos de oxígeno y de carbono.

Para comprender cómo los alquimistas representaban los cambios, la Tabla 6 presenta los símbolos alquímicos para algunos elementos, compuestos, operaciones químicas, estados de las sustancias e instrumentos de laboratorio.

Obtención de cobre puro por medio de la calcinación

Según la simbología alquímica

Para obtener el cobre se necesitaba de un instrumento (crisol), para depositar la escoria (sales de cobre, posiblemente malaquita: carbonato de cobre); mediante un proceso de calentamiento con carbón mineral se obtenía el cobre. En la reacción se liberaban espíritus (gases: CO y CO₂).



Según la simbología química

El carbonato de cobre se quema con carbón mineral, el carbono desprende el oxígeno, al actuar como agente reductor y liberar monóxido de carbono y dióxido de carbono, posteriormente, el óxido de cobre formado reacciona con el monóxido de carbono para obtener cobre sólido.

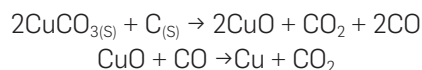























Tabla 5. Símbolos alquímicos de algunas sustancias, aparatos de laboratorio, operaciones y estados de agregación.

Símbolo alquímico	Significado
	Aire
	Fuego
	Tierra
	Agua
	Estado de las sustancias: aguas, líquido
	Estado de las sustancias: espíritu, gaseoso
	Estado de las sustancias: escoria
	Estado de las sustancias: residuo
	Estado de las sustancias: aceite
	Calentamiento
	Sublimación
	Precipitación
	Destilación
	Aceite de vitriolo (ácido sulfúrico)
	Agua fuerte (ácido nítrico)
	Agua regia
	Fórmico
	Ácido marino
	Nitro (nitrato de potasio)
	Orina
	Vinagre



Símbolo alquímico	Significado
	Arena
	Azufre
	Bórax (borato de sodio)
	Cinabrio (mineral compuesto por azufre y mercurio)
	Litargo (óxido de plomo II)
	Magnesia (carbonato de magnesio)
	Malaquita (carbonatos de cobre)
	Carbón vegetal
	Arsénico
	Antimonio
	Amalgama
	Bronce
	Alumbre (sal doble de potasio y aluminio)
	Sal
	Vitriolo (sulfato cúprico)
	Llamas
	Crisol
	Atanor
	Óxido de hierro
	Bismuto
	Fósforo



Obtención de la sal de cobre por oxidación

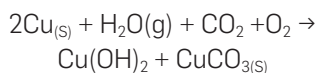
Según la simbología alquímica

Al exponer el metal (cobre) al aire se obtiene la escoria (sal de cobre). En el proceso aparece una sustancia líquida que, posteriormente, se transforma en escoria.



Según la simbología química

Para obtener la sal de un metal se puede partir del metal y ponerlo a reaccionar con un ácido o un no metal. En el proceso descrito anteriormente, el cobre se pone en contacto con el aire, en el cual hay presencia de oxígeno (un no metal), de agua y de dióxido de carbono, que en su forma hidratada es un ácido: el ácido carbónico. Cuando el metal entra en contacto con el oxígeno, se forma el óxido del metal, este óxido reacciona con el ácido y se obtiene el carbonato de cobre, la sal de cobre.



Alquimia y medicina: Paracelso

La revolución científica trae a la memoria nombres como Newton, Galileo, Copérnico, Descartes y Leibniz, pero se omiten los

nombres de los químicos. Muchos de los grandes científicos anteriormente mencionados contribuyeron y participaron en todo el curso del pensamiento alquímico, puesto que la alquimia era más que un arte dedicado a la ciencia y precursora de la química moderna, un arte de artes, donde germinaron muchas de las grandes ciencias y que contribuyó grandemente al desarrollo de la medicina. En cuanto a la medicina, se incursionó en prácticas que antiguamente se rechazaban, y uno de los grandes personajes de la alquimia que influyó y revolucionó el concepto del oficio del médico fue Paracelso, cuyas ideas discreparon con una comunidad médica ortodoxa, que venía laborando bajo el influjo de las teorías de la filosofía aristotélica y la medicina de Galeno. Su búsqueda fue la de comprender en primer lugar la naturaleza, el macrocosmos, para comprender luego al hombre, que era un microcosmos.

La alquimia, comúnmente reconocida como la pseudociencia precursora de la química moderna, significó realmente algo más profundo y complejo, que llegó a tener influencia en los distintos aspectos del ser humano, especialmente en la religión y el arte y, en su momento, fue considerada como lo que actualmente reconocemos por ciencia formal. El arte del alquimista siempre se entendió como un arte noble y necesario para el sustento de todas las otras artes. Nada más necesario y útil que el conocimiento de la naturaleza para el avance y desarrollo de la humanidad, de la insaciable búsqueda de la verdad, cuya vía de aprendizaje y descubrimiento era única y exclusivamente la química (alquimia).



Son pocos los químicos modernos y casi ninguna persona del común los que no sonríen con actitud despreciativa al escuchar pronunciar la palabra alquimia, al dar a entender que dado el grado de conocimiento racional que tiene en la actualidad el ser humano, sería cosa de fábula seguir intentando sostener un conocimiento tan empírico y especulativo, como lo fue la sabiduría hermética que llevó el arte alquimista por casi 14 siglos.

Al recorrer la historia del conocimiento humano, son muchos los nombres que resaltan gracias a sus aportes a la ciencia y que, comúnmente son considerados pilares insustituibles para la conformación y desarrollo del proyecto científico, que en la actualidad avanza a grandes pasos. Normalmente, estos hombres de ciencia aportaron un descubrimiento, sentaron las bases para el desarrollo de una posterior teoría o, en algunos casos, fueron los creadores de modelos y sistemas bases. En su gran mayoría, lo que los hizo grandes, no fue el aspecto reduccionista de su pensamiento, sino, por el contrario, que eran hombres de mentalidad abierta, que intentaron escrutar por todos los lados, sus horizontes eran ilimitados y su ciencia dispuesta a ser puesta en el desvelamiento del orden y funcionamiento de la naturaleza. Y, ¡qué arte más cercano y familiarizado con la naturaleza que la propia alquimia!. Si se sigue a los estudiosos en los libros herméticos, tendríamos que citar aquí personajes de la talla de Isaac Newton, Arquímedes, Lavoisier, Robert Boyle, Roger Bacon y una lista casi interminable y desconcertante de personajes ilustrados, que ha tenido la humanidad y que han estado bajo una influencia alquimista.

La palabra alquimia no debería tener mayor diferencia de la palabra química, nadie niega que la alquimia es la precursora de la química y si se permite, de la física. Llámese alquimia o química, la cuestión es que se habla de lo mismo: El estudio de la naturaleza (materia), sus cambios y transformaciones; y siguiendo las palabras del alquimista Fulcanelli, la diferencia entre ambas radica en lo siguiente: "La química es, indiscutiblemente, la ciencia de los hechos, como la alquimia lo es de las causas".

La química y la alquimia tienen su diferenciador en el trato con la naturaleza, mientras una trabaja en armonía con ella (alquimia), la otra intenta dominarla y someterla a sus leyes. El interés de la alquimia es el perfeccionamiento de los materiales, mientras que la química busca la descomposición de la materia en partes cada vez menores e intenta sintetizar los componentes últimos y fundamentales, que servirían para fabricar de nuevo el mismo compuesto aislado químicamente. La química moderna ignora lo inmaterial que hay en la naturaleza y da preferencia a lo cuantitativo por encima de lo cualitativo (Gebelein, 2002, s.p.).

La alquimia fue un saber hermético, por estar su conocimiento de la naturaleza relegado y resguardado bajo los secretos y prácticas de los alquimistas. Quien tuviera acceso a este conocimiento podía encaminarse a la búsqueda de la verdad. Ahí, las ideas de la trasmutación de los metales, la preparación del elixir de la eterna juventud y los demás misterios alquímicos son muestra del poder, que manifestaban poseer los grandes alquimistas.



La alquimia fue un arte refutado, contradicho, ignorado y, en ocasiones, denigrado, pero que más allá de dejar una huella especulativa, mostró que todo lo que gobierna el universo, la manifestación del macrocosmos, el orden y las leyes naturales, que rigen las orbitas y el curso de los planetas, aquello que mantiene la armonía celeste, es comparable con el orden de la madre tierra, del ciclo natural que llevan los árboles, los animales, las rocas, el agua y, en general, todo lo existente. De ahí, que el hombre como parte de ese mundo, parte de la naturaleza y, a su vez, parte de ese universo, es en esencia un microcosmos en un macrocosmos.

Paracelso, como médico alquimista, desarrolló perfectamente esta idea, luchó por una nueva disciplina médica, introdujo nuevos conceptos y generó una revolución en su campo científico. Aquí la alquimia toca un aspecto más, distinto de la ciencia química, pero se apoya en ella para entender el mundo del hombre desde el pensamiento alquímico. Fundador de la *iatroquímica*, refutó los procedimientos ortodoxos heredados de la medicina clásica, fue un hombre refutado e ignorado, para muchos, por su estilo vulgar y por su búsqueda de la aplicación de saberes populares a la medicina, terminó su vida como un médico errante, al ejercer su arte fuera de las aulas y de los grandes centros burocráticos de su época, se entregó a la empírea alquímica y al servicio de su profesión. Un médico distinto y revolucionario, un hombre con una genialidad tal, que se dice que pasó la mayoría de su vida borracho, pero esto no le impidió curar y sanar desde una perspectiva médica distinta, al lograr cosas que la medicina ortodoxa no podía.

En los inicios del arte curativo se tenían principalmente dos maneras de tratar la enfermedad; en un primer lugar, se usaban remedios naturales extraídos de plantas minerales y animales, se entablillaban los huesos rotos y se aplicaban masajes, apósitos, entre otros; por otro lado, estaba una medicina ejercida por curanderos, chamanes, magos y sacerdotes. Este saber era un conocimiento secreto y considerado mágico. El desarrollo de la medicina como disciplina procede de este último tipo de prácticas ancestrales para la curación. Junto a la medicina oficial surge también el oficio de sangrador, de comadrona y de medicina popular.

El principio de la medicina como ciencia se le atribuye a Hipócrates, quien aún tiene una gran influencia en la historia de la medicina, dado que su reconocido voto de la profesión médica fue el argumento ético de todo médico por muchos siglos y, en la actualidad, aún se cumplen algunos de los artículos, con excepción, especialmente, el artículo quinto, cuyo detractor en su momento fue el mismo Paracelso. Este artículo dice lo siguiente: "No haré uso del bisturí, incluso en caso de mal de piedra, sino que lo dejaré para los hombres que ejercen este oficio". Aquí claramente Hipócrates relega esta labor a los carniceros, puesto que eran ellos los sabidos en este arte de cortar.

El oficio de cirujano era aparte del oficio del médico, aunque su actividad solo podía ser ejercida en supervisión de las facultades médicas, los cirujanos formaban sus propios gremios. La medicina se desarrolló paralelamente al arte alquímico, muchas



de las simbologías son comunes, puesto que siempre estuvo ligada a la necesidad de buscar aquello perfecto, que lograra incidir sobre el ser humano, en especial, cuando la salud se tornó un "tema de interés astronómico" (Gebelein, 2002, s.p.). En la mitología griega se puede hallar el siguiente ejemplo que muestra claramente esta correlación: Asclepio, hijo del dios Apolo, fue instruido por el centauro Quirón en el arte de curar, poseía, incluso, la facultad de resucitar a los muertos y, en una ocasión, fue castigado por Zeus por utilizar indebidamente ese poder. Entre las hijas de Asclepio se encuentran, Higía y Panacea, que corresponden a los términos higiene y panacea (remedios universales) tan comunes en el pensamiento médico de la Edad Media.

Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim, más conocido como Paracelso, fue una de las figuras más controvertidas e importantes de la medicina y la alquimia del siglo XVI. Nació alrededor de 1493 en Einsiedeln, Suiza, y se crio en Villach, en la región de Carintia. Estuvo bajo la mirada crítica de los médicos de su época, quienes eran fieles a las tradicionales enseñanzas de los médicos galenos e Hipócrates. Para muchos no fue más que un charlatán, un hombre con tendencias extrañas y con actitudes desmedidas frente a sus colegas. Estuvo siempre en contra de las costumbres, que consideró exageradas e inútiles por parte de la comunidad médica de su época, contrarió muchas de las ideas gobernantes y luchó por la introducción de saberes populares, entre ellos, la quiromancia, la magia y los saberes adquiridos en la observación de

la naturaleza y el macrocosmos, para ser implementados en las deducciones del ser humano.

Sus detractores no demoraron en salir a criticar y desmeritar las prácticas del médico alquimista. En su biografía se encuentran hechos que fundamentan la ganancia de enemigos, una de sus más reconocidas imprudencias ocurrió en el año 1528, al haber sido el primero en dictar una clase en la Universidad de Basilea en idioma alemán y no en latín, como lo exigía la tradición académica. Entre otras de las cosas, en el mercado de Basilea pronunció un discurso público en el que dijo:

¡Me quejo de vosotros, médicos de alta escuela!, difamáis mis enseñanzas porque no proceden de vuestras cabezas, porque me baso en la medicina y no miro hacia arriba. ¡Pero la curación hace al médico y las obras hacen doctores, no emperadores, ni papas, ni privilegios ni altas escuelas! He vuelto a levantar lo que vosotros habéis corrompido, cortáis los miembros Y luego venís a decir que Theophrastus tampoco nos puede ayudar, pero ¿Quién puede volver a poner un miembro amputado? ¿Quién puede descubrir a un pícaro? ¿A quién le es posible hacer piadosa a una prostituta? (Gebelein, 2002, s.p.).

Paracelso fue aquel genio de la época que incursiona en ámbitos ignorados por muchos, malentendidos por otros y censurados por la gran mayoría. Y con todo esto, los logros que obtenía en cuestiones médicas involucraban su saber con los conocimientos aprendidos de la medicina popular,



de los herbolarios, de la alquimia y artes ocultos, lo que hizo de él un hombre afamado por el pueblo, pero rechazado por la comunidad médica. Fue un hombre que se involucró con la gente, vio en la medicina una herramienta para ayudar, cuyos fines eran meramente en pro de la humanidad y no en saberes reservados y practicados por unos cuantos, bajo rigurosos dogmas que no permitían innovar ni salirse de lo común. Es por todas estas características que lo destacaron en el curso de su vida, que debió abandonar su oficio de médico de la ciudad de Basilea y llevar una vida errante, al recorrer los países de una Europa demacrada por la guerra y al compartir su vida y su conocimiento entre médicos, alquimistas, astrólogos, boticarios, mineros, gitanos y demás personas dedicadas a las ciencias ocultas.

Su obra, la que conocemos actualmente, solo se publicó después de su muerte, al existir siempre una duda y controversia por la autoría de sus escritos, hechos que se sustentan en la búsqueda por desmentar su labor por parte de todos aquellos opositores que tuvo, incluso, siglos después de su muerte. Paracelso fue un fiel seguidor de la alquimia, como se ha dicho anteriormente, este arte involucraba muchos aspectos, entre ellos, la búsqueda de la transmutación de metales y la elaboración de sustancias con poderes mágicos. Paracelso incursionó en todos estos entramados, pero, específicamente se dedicó a la búsqueda de sustancias curativas, a la aplicación de la química en el cuerpo humano, al simular lo que la naturaleza hace para sí misma y lo que ocurre en el universo para que se originen las cosas. El uni-

verso según él fue creado por un químico y la química era la llave para descubrir el funcionamiento y las leyes del universo, es así como se puede evidenciar en su filosofía, que todo lo que ocurre en el macrocosmos se da o puede darse en el interior del hombre, debido a que él es un microcosmos, que análogamente funciona como lo hace la naturaleza y el universo.

“Paracelso fue un médico revolucionario, refutó y luchó en contra de las ideas aristotélicas y de las teorías de Galeno, considerándolas heréticas y paganas” (Brock, 1998, s.p). Consideró mejor basar la práctica médica en medicinas minerales, al refutar los métodos clásicos heredados de la medicina griega y árabe. El principal objetivo de la medicina, sostenía Paracelso, era la preparación de los *arcana*, ya aquí mostraba la diferencia con la medicina grecorromana clásica, mientras esta última utilizaba compuestos orgánicos derivados de plantas para la fabricación de remedios, Paracelso fabricaba todo a partir de compuestos inorgánicos (minerales). Los *arcana* destruían los venenos o causas que generaban la enfermedad y eran específicos para cada enfermedad, idea que hasta entonces era opuesta a la creencia médica, que sostenía la posibilidad de fabricar un remedio único, la panacea alquímica, que curase la enfermedad en sí, sin reconocer diferencias.

Paracelso es considerado el fundador de la iatroquímica (de *iatros*, médico), precursora esta de la química farmacéutica. Aquí la química es aplicada a la medicina, específicamente en la fabricación de remedios y así diferenciar lo que comúnmente



se conocía como la alquimia, cuyo propósito era básicamente la fabricación de oro. Esta palabra pudo tener una significación distinta a la que Paracelso realmente dio a ella. La iatroquímica, en la que el cuerpo humano es una fábrica química y la teoría médico-biológica de la iatrofísica enunciada por Descartes distan mucho de lo que Paracelso comprendía y estableció como iatroquímica. La concepción de iatroquímica, desde las ideas de Paracelso, parte de entender al hombre como un microcosmos, pero cuyo influjo está directamente relacionado con la naturaleza, atender contra ella, es atender contra el mismo hombre. La iatrofísica predominante de la época atentaba contra los animales, eran comunes las inyecciones de plomo y cera caliente en las arterias y ventrículos de animales vivos, con el fin de experimentar; bajo esta visión de la naturaleza, el hombre no era un ser vivo más, sino, que hacía frente a la naturaleza, la tomaba como un medio, se tornaba una herramienta para experimentar, la naturaleza era, entonces, aquella probeta donde ocurrían las reacciones y se obtenía un producto reproducible posteriormente en el hombre. Esta visión semeja la analogía de mundo como probeta química, que tenían los alquimistas, pero tergiversando su sentido, el macrocosmos era la gran probeta donde ocurrían las reacciones, que daban origen a las cosas, igualmente la tierra y así se entendían las posibilidades del hombre de ir en busca de ese conocimiento que tiene el universo, pero que él carece. De esta forma se comprendía que la formación del oro se dio y se seguía dando en el universo, por alguna mezcla de sustancias, que al reaccionar daban como resultado aquel bello y

puro elemento, y el hombre debía encontrar las proporciones y las sustancias para lograr reproducir ese experimento, que el mundo en su gran probeta proveía como muestra de posibilidades.

“El microcosmos era para Paracelso la Tierra y todas sus criaturas, mientras que el macrocosmos eran los cielos” (Brock, 1998, s.p). El firmamento incluía tanto las estrellas como los planetas que se pueden observar y aquellos que no (*astra*). Estos cuerpos influían en la Tierra y en todas las criaturas, incluido el ser humano. La enfermedad al igual que la salud estaba relacionada con el universo, de ahí la más célebre frase conocida de Paracelso: “Lo semejante actúa sobre lo semejante” (Gebelein, 2002, s.p.). Este principio aún, hoy en día, es fundamental en la química moderna, al igual que en artes como la homeopatía. Al reconocer que el universo se rige por ciertas leyes que mantienen su armonía y su equilibrio y que al igual que el hombre, la naturaleza “enferma”; la piedra (metal) aparece rodeada de sustancias que la vuelven impura; los árboles mueren al igual que los animales, entonces la tarea del químico consistía en descubrir las correspondencias entre el microcosmos y el macrocosmos, en determinar una esencia astral, que pudiera curar la enfermedad. Estas ideas perduraron por muchos siglos en el pensamiento alquímico, por ejemplo, la cuestión de las impurezas de los metales (sus sales) se trasladó al plano de la salud humana, al buscar extraer aquella sal del cuerpo que causaba la enfermedad, se creó toda una teoría de la digestión, basada en principios alquímicos, bajo la influencia del pensamiento paracélsico.



Para Paracelso las enfermedades tenían que ver con ese orden del microcosmos que es el ser humano. Estableció cinco causas fundamentales para la enfermedad: Los cinco entes: *el ens astrorum*, *el ens veneni*, *el ens naturale*, *el ens spirituales* y *el ens dei*. Los tres primeros entes tienen que ver con el cuerpo y los otros dos, con el espíritu. Bajo los primeros se consideran los astros y la alimentación como agentes potenciales en el desarrollo de las vidas humanas, mientras que los segundos están bajo la actuación de fuerzas externas y sobrenaturales. Para Paracelso existe una relación entre el cuerpo y el alma: "He enfermado, así que, ante todo, ayuda a tu alma, pues a menudo el alma pecadora provoca en el cuerpo graves enfermedades" (Hohenhcirn, s.f., s.p.).

El arte médico desde el pensamiento de Paracelso no era solo una ciencia ortodoxa, que debía seguir los cánones impuestos por las escuelas de enseñanza, sino que debía involucrar las artes afines a la naturaleza, entre ellas, la filosofía, la astronomía y la alquimia, esto lo dice él mismo en su libro *Paragranum* (Gebelein, 2002, s.p.). Paracelso incluye un cuarto pilar sobre el que debe sentarse el arte médico, la virtud, la cual la describe como la honradez, la integridad y la rectitud de quien ejerce esta profesión. La elaboración de remedios debía tener detrás a un hombre capaz de reconocer los atributos de las sustancias y saberlas usar para el fin adecuado, porque tanto un veneno puede ser peligroso como curativo, si se sabe preparar, este arte de elaboración se denominó la *espagiria* y es conocida la sentencia paracélsica: "La dosis hace el veneno" (Hohenhcirn, s.f., s.p.).

Las cosas al igual que el hombre se enferman, porque se corrompen y, "La corrupción es la madre de todas las enfermedades" (Hohenhcirn, s.f., s.p.).

Por último, aunque se mencionó sin darle la importancia en el pensamiento paracélsico, el tema de la digestión juega un papel muy importante en su doctrina. Para Paracelso, el cuerpo humano actúa como un horno alquimista, ahí ocurren las transmutaciones, las sustancias ingeridas se transforman en otras nuevas. Así, cuando una persona no es capaz de digerir algo sólido, es porque el cuerpo fabrica ese material. La preparación de los alimentos debe ser todo un arte alquímico, "El panadero es todo un alquimista, pues hace pan; lo es el viticultor, pues hace vino; lo es el tejedor, pues hace años. ¿Qué hace a las peras estar a su tiempo, que trae la uva? Nada más que la alquimia natural. Pues eso es alquimia, para reconocerla, lo que mediante el fuego prepara lo que es impuro y lo convierte en puro. No lo que dicen, que la alquimia fabrica oro y plata. Lo importante es esto, que establece los arcanos y los dirige contra las enfermedades" (Hohenhcirn, s.f., s.p.). Es así como para Paracelso la alquimia es el arte que busca representar lo que la naturaleza ya en sí misma hace, porque es la más grande alquimista y el universo la más grande probeta, donde ocurren las reacciones y transmutaciones. La alquimia y la medicina son compatibles, porque el arte alquímico es un arte natural y la medicina debe intentar sanar lo que en la naturaleza enferma, el hombre, y buscar cómo enferma y se cura el mundo, para entender cómo se haría con el hombre. Porque el hombre es parte de la naturaleza, no es un



ser independiente y único, cuyo cuerpo y cuya salud pueden ser entendidos aisladamente del macrocosmos y microcosmos, como lo hacían los médicos ortodoxos de la época de Paracelso y los de ahora.

La alquimia fue un arte complejo y muy desarrollado, más que unas sectas o grupos de personas que ejercían oficios misteriosos y secretos, era un estilo de vida muy de la índole de la filosofía oriental. El conocimiento del hombre iba a la par con el conocimiento de la naturaleza y el firmamento. Las ideas de la alquimia que han tenido mayor eco en nuestra cultura moderna son la trasmutación de los metales y la búsqueda del elixir o piedra filosofal, el cual otorgaría en sus proporciones correctas, la eterna juventud. Estos misterios que intentaron develar los alquimistas ocurrieron, según se encuentra en la tradición alquimista, de forma literal como podría entenderse la transformación de oro, a partir de metales menos puros como el plomo, pero también es sabido que los significados de la simbología y la nomenclatura alquímica son mucho más complejos y profundos. El hombre es un microcosmos, en el cual ocurren las análogas reacciones de tras-

formación y transmutación, que acontecen en el universo y en la naturaleza; la labor del alquimista era analizar y comprender el mundo, sus leyes, su manifestación y llevarlo al plano humano, para lograr la purificación y la obtención de perfección, que ocurre espontáneamente en la más grande probeta química que existe: el universo.

Paracelso hizo de la alquimia una herramienta de la medicina, al igual que integró otras artes, que no lejos eran afines a la práctica alquimista, vio en la medicina tradicional, heredada de los griegos y romanos, una profesión, donde quienes la ejercían se vanagloriaban y solo pensaban en la acumulación de méritos y riquezas, y siempre defendió la labor del médico como aquel que se entrega de por vida a su profesión y la ejerce según la virtud, que lo hace honorable para dicho cargo. Reconoció la importancia de renovar ciertos aspectos de la medicina, tales como la función del cirujano y reivindicó, la importancia de tratar la enfermedad específica y no pensar que lo que la origina es la misma fuente y, por ende, el mismo remedio podría curarlas a todas.



Siglos XVII - XX: el flogisto y el nacimiento de la química moderna

El estudio de los gases y la superación de la teoría del flogisto

*"La química es una ciencia francesa y fue
fundada por Lavoisier, de fama inmortal"*

Adolf Wurtz

El desarrollo de las diferentes ramas de la química debe su origen a la drástica división de los intereses alquímicos y los nuevos retos, que imponía el descubrimiento de sustancias minerales en sus usos medicinales, al igual que la incorporación del pensamiento atomista, que estuvo relegado por cerca de dos milenios. El legado del pensamiento antiguo y la difusión del conocimiento, ahora podían transmitirse de forma escrita por medio de la imprenta, inventada por Johann Gutenberg (1397-1468). Dada la posibilidad de imprimir los textos clásicos y actuales de la época; los descubrimientos, validaciones o refutaciones de

Las teorías antiguas, los nuevos avances en ciencia, entre otros, podían ser leídos por quienes quisieran y cuyos trabajos estuvieran encaminados en búsquedas comunes, se fortalecían al conocer los hallazgos y descubrimientos paralelos, tornando las búsquedas personales en intereses científicos universales.

La posibilidad de la transmisión del conocimiento fue lo que permitió que diferentes personajes de la historia, cada uno actuando desde sus intereses particulares, comenzaran a tejer una visión del mundo, que debía enlazarse poco a poco para develar el secreto de la naturaleza. La física y la astronomía fueron ciencias, que desde su origen tuvieron un carácter cuantitativo, aunque las simples mediciones antiguas usaran no más que la geometría plana. Para la química, el contexto fue muy distinto; la aparición de la medida como necesidad para entender los resultados empíricos tardó mucho en aparecer, el sentido común, originario de la filosofía aristotélica, estaba relacionado con las explicaciones de la concepción de la materia y sus manifestaciones (alquimia).

La comprensión del comportamiento de los cuerpos mediante una descripción geométrica y matemática de su movimiento fue el gran interés de la física y la astronomía. Lograr utilizar la matemática y las mediciones permitieron dar origen a la revolución científica, que la historia de la ciencia reconoce y que comenzó con el trabajo del científico italiano, Galileo Galilei (1564-1642), el cual alcanzó el ápice de la montaña, que se erguía como símbolo de la elevación del conocimiento humano

sobre la ignorancia, con el científico inglés, Isaac Newton (1642-1727). No fueron solo estos dos hombres los que erigieron la concepción mecanicista del universo, la historia muestra cómo quedan en la memoria los nombres de unos cuantos, para representar la grandeza de un descubrimiento o teoría, pero realmente en el caminar científico son muchas historias de vida y acontecimientos, los que contribuyen en menor o mayor medida, para que en una grandeza intelectual, estos pilares del desarrollo del conocimiento, a quienes se les embiste con la gracia de ser los más grandes hombres de ciencia, puedan sistematizar o fundamentar en una gran obra el pensamiento humano, no propio, sino de la actividad disciplinada y entregada de la historia científica de la humanidad.

Newton, al igual que todo hombre de ciencia antiguo, no entregaba la totalidad de sus intereses solo a la física y a la astronomía; se sabe que dedicó gran parte de su vida a la búsqueda alquímica y sus ideas, en cuanto a la concepción de la naturaleza química de la materia, nunca se desligaron de la influencia de la alquimia. Aunque la revolución científica comenzó rápidamente, una vez el conocimiento heredado por las diferentes culturas se puso a prueba, bajo una mirada racional y metodológica basada en el método científico, la química tardó en comenzar su propia revolución. Se atribuye a esta barrera epistemológica el lenguaje en el cual la alquimia llegó a occidente; cultura que estuvo encargada de emprender la comprensión racional del mundo. El carácter simbólico y hermético de la alquimia tornaba difícil sistematizar, comprobar empíricamente y teorizar los



hechos, descubrimientos, métodos, síntesis e, incluso, la posible transmutación de los metales.

Los progresos en cuanto al uso de la medida en la química comenzaron en la época en que Galileo trabajaba en su obra. Los hechos se manifestaban empíricamente, se podían medir cambios de presión, temperatura, confinar sustancias y transformarlas de estado, evidenciar reacciones químicas, calcinar materiales leñosos, obtener temperaturas elevadas para fundir metales y elaborar herramientas, fabricar medicamentos, sintetizar diferentes compuestos, obtener tintes, alcohol, fermentar bebidas para el consumo humano, entre otros, todo esto no de buenas a primeras, sino, basándose en el legado de siglos de tradición alquímica. Quedaba, entonces, la posibilidad de hacer uso literal de los procedimientos antiguos y ponerlos bajo el ojo crítico, que permitiera entender y sustraer de ellos la comprensión de los fenómenos, de los hechos, de la misma naturaleza de la materia. En este proceso comenzó a experimentarse, a valorar cuantitativamente los cambios, pero aunque se lograban introducir los principios físicos, la explicación de las causas continuó siendo subjetiva; no fue fácil desprenderse del concepto de los elementos aristotélicos, que negaba el vacío desde una visión de la naturaleza, como algo homogéneo y continuo; y una vez logrado esto, se entendió que el atomismo griego debía reconsiderarse en el pensamiento científico e introducirlo para poder avanzar, si esto no ocurría, la química no podía desligarse de su carácter empírico subjetivo, mientras que la física ya andaba ligando lo empírico con la razón.

Las teorías antiguas de los elementos fueron un gran obstáculo para el surgimiento de la química moderna, en su origen está la primera evidencia de la necesidad del hombre por entender las causas de las cosas, a partir de un fundamento o sustancia. Los cuatro elementos de la concepción griega de la naturaleza eran la mínima expresión de la materia, eran simples y se encontraban presentes en todas las cosas; el fuego estaba oculto en las sustancias y se manifestaba cuando ardía en forma de llamas, se le consideraba sustancia material y compuesta, de nada más que de él mismo, es decir, no podía separarse en nada. Esta fue la definición de elemento que perduró por muchos siglos, incluso en la época de la revolución científica, que dio origen al modelo mecanicista del universo. Para descubrir el agua y el aire *atrapados* en la materia, debían estudiarse los gases; debía lograrse atraparlos, pesarlos, aislarlos y distinguirlos, para entender si existía un solo y mismo aire (el aire común que nos permite respirar) o, por el contrario, si existían diferentes tipos de aire, exhalados de la materia al calentarse. Realmente no era la búsqueda de varios tipos, sino de las diferentes características del aire común, el cual podía estar mezclado con diferentes cualidades, como, por ejemplo, aires con presencia de tierra o agua.

En los legados de la alquimia existían limitaciones para entender o explicar el comportamiento de muchos fenómenos o de los compuestos, el desarrollo de teorías para dar una interpretación de los hechos fue el pilar de todo el pensamiento alquímico; la *praxis* entregaba resultados sensoriales y corroborables con los sentidos;



se evidenciaba el cambio de coloración de un mineral al exponerse al fuego. Pero las demostraciones pasaban a ser formuladas de manera subjetiva. No se utilizaba la medida, la comprobación general de los sucesos no lograba explicar el comportamiento diferente de múltiples fenómenos; surgía una gran imposibilidad por teorizar en forma general los cambios de la materia; podía entenderse, en particular, un cambio, pero nunca se logró argumentar la naturaleza generalizándola y logrando llevar a cabo una muestra experimental, que diera la razón de las causas. Por este motivo, podríamos atrevernos a decir que, si el logro de transmutar un metal menos noble que el oro o la plata se hubiera dado, la alquimia podría considerarse desde aquel momento como una ciencia y no una *pseudociencia*, como actualmente la conocemos.

Existían límites para explicar cambios que los alquimistas daban por hecho y aceptaban sin mayor argumentación; por ejemplo: ¿por qué algunos compuestos disolvían en agua y otros no?, la sal disolvía sin problema en el agua, mientras el aceite y el mercurio no lograban incorporarse en ella, el azufre disolvía en aceite, pero no en mercurio ni agua (Selva, 2008, s.p.). También estaba el problema sobre los diferentes colores que presentan las piedras preciosas o el cambio de coloración de los metales al exponerse al fuego. Para responder estos y otros interrogantes, se hizo necesario experimentar; para poder teorizar: nace el método científico aplicado a la química.

En el contexto de la revolución científica, la física estaba bastante avanzada, se comenzó a entender el funcionamiento mecánico

del universo por medio de leyes generales para el movimiento, pero en la química, la cuestión era entender las causas del comportamiento de los diferentes elementos y partir de redefinir o comprobar si lo que se ha considerado como elemento, podía seguir considerándose o, por el contrario, se debía descubrir qué eran realmente los elementos. En la Antigüedad se entendía la composición de la materia como la combinación que daba origen a todas las formas, compuestas siempre de los mismos cuatro elementos, impidiéndose que se pudiera describir el comportamiento de la materia en términos generales; incluso, la teoría atómica, que suponía la presencia de partículas indivisibles e invisibles, como fundamento de todas las cosas, al plantear que lo único que diferencia a un elemento de otro era la forma y el tamaño de sus átomos, no permitía generalizar la composición de la materia y sus causas.

El estudio de los gases fue el punto de partida para empezar a comprender cómo se organiza, se conforma, funciona, se divide, se manifiesta e interactúa la naturaleza química de las cosas. Jean Baptista Van Helmont (1577-1644), físico y químico belga, se considera el primer hombre que despertó interés por estudiar los distintos *aires* que se desprendían de las sustancias, incluso, fue quien los llamó *gases* (término derivado del griego "*chaos*", que en la fonética flamenca se pronuncia *gas*). Los vapores o aires obtenidos en diferentes procesos no fueron analizados por los alquimistas, porque los identificaban con el elemento aire (común a todas las cosas) y también por la dificultad en lograr atraparlos y manipularlos. Van Helmont observó



que los vapores que se liberaban de algunas sustancias, en unas más fácilmente que en otras (por su alta volatilidad), se parecían al aire común en su aspecto, pero variaban en sus propiedades.

Al experimentar con diferentes materiales orgánicos, descubrió la presencia de un gas que denominó *gas silvestre*: mediante la combustión de la madera en un recipiente cerrado, observó diferencias entre el aire que se liberaba y el aire común, actualmente, se sabe que el gas liberado es el dióxido de carbono (CO_2), uno de los productos de los procesos de combustión e implicado en la respiración de las plantas y los animales. De manera similar, al experimentar con aceite de vitriolo (ácido sulfúrico) y hierro, observó que se liberaba un *aire* distinto al *gas silvestre* y, por ende, al aire común; lo denominó *aire pingüe*: un gas inflamable, que también se podía obtener de la combustión de materiales orgánicos, el cual, ahora sabemos, era una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono y metano. Al bañar un pedazo de plata con el agua regia de Livadius (1540-1616), compuesto que logra diluir el oro y que consiste en tres partes de ácido nítrico por una de ácido clorhídrico, descubrió un gas rojo altamente venenoso, que también denominó *gas silvestre* (este compuesto correspondía al dióxido de nitrógeno, NO_2). El descubrimiento del *aire pingüe* fue fundamental para que Henry Cavendish (1731-1810), físico y químico británico, al estudiar las reacciones entre los metales y los ácidos, logró aislar los gases producidos y evidenciar sus agudas diferencias con el aire común, entre ellas, su alta inflamabilidad y su baja densidad, al fortalecer, posterior-

mente, la teoría de la combustión de Antoine Lavoisier.

Van Helmont en sus aportes sobre el análisis de los gases concluye cosas extraordinarias, que sentaron las bases para la posterior ley de conservación de la materia: al quemar trozos de madera, propuso que la masa que se perdía en el material, correspondía a la misma masa de los vapores que se liberaban. El problema era cómo pesarlos y así demostrar su teoría, sus ideas quedaron expuestas para que hombres de la talla de Antoine Lavoisier (1743-1794), las demostraran y logaran formular leyes generales como las que tanto deseó Robert Boyle (1627-1691), en su persistencia por matematizar y establecer una química con las características científicas que tenía la física y la astronomía. El ingenio de Van Helmont no solo quedó en la demostración y asignación de diferentes gases, sino que se le atribuye el primer experimento químico con instrumentos de medida para el tiempo, la masa y la temperatura, al utilizar para estos fines un péndulo, una balanza y un termómetro respectivamente.

El estudio de los gases, el estado de la materia más energético, el más difícil de manipular, el que no tiene ni forma ni volumen definido, a pesar de todo esto, fue el que se prestó a las técnicas de medición precisas y abrió el paso al mundo de la química moderna (Asimov, 1975, s.p.). Mientras los líquidos y los sólidos son estados mucho más sencillos de diferenciar a simple vista, no fueron los que despertaron el interés para ser medidos. Una posible explicación es que se aceptaba que en todos los materiales sólidos y líquidos debían existir



el agua y la tierra, en combinación con el aire y el fuego, estos últimos elementos eran fáciles de liberar, mientras que, los materiales que se encontraban en estado gaseoso no eran tan fácilmente manipulables, para comprobar si estaban compuestos de algo más.

Con el legado que empezaba a aparecer en la obra de Van Helmont, los gases se tornaron de gran interés. El físico y matemático italiano, Evangelista Torricelli (1608-1647), al utilizar, nada más y nada menos, que el mercurio, un elemento altamente expansible y compresible, descubrió que los gases ejercían presión: sobre un recipiente lleno de mercurio invirtió un tubo de un metro de longitud, cerrado en su parte inferior y lleno de mercurio y esperó que todo el contenido del tubo se vaciara en el recipiente. Torricelli encontró que tan solo una cuarta parte del mercurio contenido en el tubo se mezcló con el metal y quedó una columna de mercurio en el tubo de aproximadamente 76 cm de altura (medidos desde la superficie del mercurio en el recipiente). Consideró que el espacio restante del tubo era un vacío. A continuación, realizó otro experimento: colocó agua en un recipiente y realizó un experimento similar, al invertir el tubo lleno de mercurio sobre el agua (recuérdese que estos compuestos no se mezclan); Torricelli empezó a retirar el tubo, muy lentamente, hasta que su boca llegase al nivel del agua en el recipiente y sucedió que todo el mercurio se vació al recipiente y a continuación el tubo se llenó de agua. Torricelli notó que existía un desplazamiento del fluido contenido en el tubo, por causa de una fuerza externa que actuaba sobre el líquido con-

tenido en el recipiente: descubrió la presión atmosférica. Lo que había sucedido en el primer experimento, es que el mercurio del tubo descendió hasta que la presión interna, debida al peso del mercurio dentro del tubo, fuera igual a la presión que sufría el mercurio en el recipiente, fuera del tubo (que era la presión atmosférica). En el segundo experimento, el mercurio contenido en el tubo ejercía mayor presión, que la presión que soportaba el agua en el recipiente (la presión atmosférica), por lo que el mercurio se vació (recuérdese que la densidad del mercurio es mucho mayor a la del agua) y el agua llenó el tubo, hasta que su peso igualó la presión atmosférica externa.

El instrumento utilizado para medir la presión se denomina barómetro y puede decirse que su origen se encuentra en los trabajos de Torricelli. En su honor, se denominó Torricelli a la medida de presión que eleva un milímetro de mercurio en una columna barométrica, aparato diseñado por él mismo (a esta unidad de medida también se le conoce como milímetro de mercurio, al ser $1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg}$).

Los errores o casualidades acompañan todo el recorrido del proceso científico. El descubrimiento de la presión atmosférica fue una conclusión que arrojó accidentalmente los experimentos de Torricelli, debido que el objetivo que originalmente tenía Torricelli estaba enfocado a la obtención de una bomba manual, que permitiera extraer agua de pozos o ríos. Las conocidas bombas manuales funcionaban mediante un sistema de cilindro-pistón, que permitía el ascenso del agua. La imposibilidad teóri-



ca, planteada una vez por Galileo, de elevar más de diez metros una columna de agua, debido a que caería por su propio peso, incitó a Torricelli a tratar de verificarlo. Por cuestiones prácticas, pensó en utilizar un elemento más pesado que el agua y eligió al mercurio, que es casi 14 veces más pesado, luego, consideró que la altura a la que dejaría de elevarse la columna de mercurio, sería proporcionalmente mucho menor a la que dejaría de hacerlo una columna de agua. Torricelli realizó el experimento que anteriormente se expuso, al encontrar la acción de la presión del aire (de la atmósfera) sobre el mercurio y, por ende, la formulación de la presión atmosférica (Pérez, 2005, s.p.). Si el descubrimiento de la presión atmosférica se hubiera logrado usando una columna (que debería ser mucho más larga) de agua, hecho que hubiera sido difícil con los aparatos simples de aquella época, la unidad de medida correspondiente para designar la presión que sube 1 mm H₂O en una columna barométrica (es decir, 1 Torr), correspondería a una presión infinitamente pequeña y su utilización práctica tendría la gran dificultad.

El descubrimiento de la presión ejercida por el peso de la atmósfera permitió encaminar la ciencia hacia el entendimiento del vacío y con esto al desarrollo de las bombas de succión. Otto von Guericke (1602-1686), en 1654, cuando era alcalde de Magderburgo, Alemania, demostró en un acto público la existencia de la presión atmosférica y sentó las bases para la comprensión del vacío: en presencia del emperador alemán utilizó dos semiesferas de cobre de 55 cm de diámetro, que podían acoplarse fácilmente. Luego de unir las, ex-

trajo el aire del interior, hasta el punto de que no hubiera aire; entonces, la superficie se deformó y comenzó a demostrar la existencia de un vacío al interior del sistema, luego, ató ocho caballos a cada semiesfera, luego, logró separarlas con gran dificultad; esta circunstancia hizo famoso su experimento. Estos instrumentos diseñados por Guericke los denominó en su momento *jeringas*, tal vez por la similitud que tienen estas para liberar y bombear aire o cualquier otro fluido (Camacho y Quintanilla, 2008, s.p.).

Robert Boyle (1627-1691), químico irlandés, fue un entusiasta en querer entender la naturaleza de la materia. Sus intereses estuvieron enfocados en los trabajos de Van Helmont, en especial, de los aires o gases como los denominó el químico belga. El concepto de vacío no pasó desapercibido por Boyle y basándose en las *jeringas* de Magderburgo, desarrolló un aparato similar. En vez de extraer el aire contenido en ellas, buscó comprimirlo dentro y halló que el volumen de una muestra de aire variaba con la presión: a mayor presión, el volumen del aire disminuía. La herramienta utilizada para esto fue un tubo en U, con uno de los extremos más largo que el otro y abierto a la atmósfera, mientras que el extremo corto estaba cerrado. A medida que Boyle vertía mercurio por el extremo abierto, el aire dentro del tubo se alojaba y se confinaba en el extremo corto, al reducir su volumen. Al incrementar la cantidad de mercurio, se aumenta la presión ejercida sobre el aire, al mismo tiempo que el aire ejerce igual presión sobre las paredes del extremo cerrado. Boyle comprobó que al duplicar la presión ejercida por el



aire y al duplicar la cantidad de mercurio, el volumen del aire se reducía a la mitad o se reducía a un tercio, si se triplicaba la cantidad de mercurio (Asimov, 1975, s.p.). Este hecho sentaba la primera ley de los gases o ley de Boyle: la relación entre el volumen y la presión ejercida por un gas confinado es inversamente proporcional (manteniendo la temperatura constante). La especificación de la temperatura constante para garantizar esta ley, solo se estableció cuando el físico francés Edme Mariotte (1630-1684) llegó a las mismas conclusiones que Boyle años más tarde, y por esta razón, es que también puede ser conocida como la ley de Mariotte. Actualmente, se conoce con el nombre de bomba de succión al aparato que permite, por medio de un cambio de presiones, impulsar fluidos, gracias a la acción del vacío; este nombre fue adaptado por Roberto Boyle en el mejoramiento de las *Jeringas* de Otto von Guericke.

Al ser considerado el químico escéptico y al ser rechazada agudamente la teoría de los elementos o las sustancias universales, Boyle se empeñó en demostrar que todas las sustancias no se descomponían en los cinco elementos (incluido al éter), sino, más bien, al intentar aceptar la filosofía atomista, consideró que la materia era un conjunto de partículas que se unían para formar las diferentes sustancias; adoptó la idea de los corpúsculos. Para comprobar que la materia estaba compuesta por átomos, debía tomarse el camino de los gases, porque mientras se trabajaba con líquidos y sólidos, los cambios de presión y volumen no se evidenciaban fácilmente, lo que lo llevó a la siguiente cuestión: si la materia

está compuesta por átomos, deberán estar unidos entre sí de alguna forma (hasta aquí no se conocía el concepto de enlace químico) y al intentar comprimir el material, solo se lograría disminuir la distancia entre sus átomos; al ser tan poco compresibles los sólidos y los líquidos, sería difícil refutar el argumento de que están compuestos por una materia continua, porque empíricamente no se encuentran cambios de forma apreciables, que indiquen que las partículas que los conforman puedan separarse o comprimirse, mientras que en el estudio de los gases, el concepto de partícula parecía poder comprobarse gracias a su comportamiento elástico (de fácil compresión y expansión) (Asimov, 1975, s.p.).

Los cambios físicos de la materia ocurren cuando las distancias e interacciones entre las moléculas o átomos disminuyen o aumentan, debido a un factor externo como la presión o la temperatura. De esta forma puede comprenderse que el agua puede evaporarse y seguir siendo agua o congelarse sin cambiar su naturaleza química, de igual forma que puede hacerse con cualquier sustancia. Boyle no aceptaba que si una sustancia se evaporaba, era porque liberaba de ella el elemento aire o si ardía era porque el fuego escapaba de la naturaleza íntima de la sustancia; más bien apuntó a la idea de que los átomos pasaban a ser gaseosos y de esta forma, ¿por qué no pensar que las sustancias en estado líquido y sólido también estuvieran compuestas por átomos?, era difícil comprender el concepto de átomo para entender la materia, pero se hizo necesario para desarrollar la descripción del comportamiento de los gases.



Había que demostrar la imposibilidad de obtener los elementos griegos de todo objeto material. Los alquimistas fundamentaban que por medio de la destilación o la calcinación era posible separar los elementos y todo proceso que usara el fuego destructivamente, permitía obtener una sustancia inflamable, que era identificada como el azufre, un residuo soluble en agua que denominaban *sal*, un líquido insoluble conocido como *flema* y un residuo sólido que identificaban con la tierra. Los cuatro elementos deberían estar en la materia destruida o íntimamente ligada a las partes que derivaban de la calcinación o destilación. Boyle advirtió que no todas las sustancias podían reducirse a los elementos, por ejemplo: la madera se transforma en humo y *calx* y no puede entenderse al humo como aire común, porque sus propiedades difieren enormemente, principalmente, porque aquel pica los ojos como si fuera un ácido (Selva, 2008, s.p.). Este humo más adelante se conoció como un gas ácido, dióxido de carbono, producto de la combustión de la materia orgánica.

Los aportes del químico irlandés fueron enormes, incluso en la promulgación del interés científico tuvo un papel preponderante, al ser uno de los trece miembros fundadores de la Sociedad Real de Londres, la primera asociación científica del mundo. Entre sus estudios estaba la clasificación de las sustancias en ácidos o bases, a partir del cambio de coloración de la tintura tornasol: mientras que los ácidos ponen roja la tintura, las bases le devuelven su color azul. Este fenómeno lo observó en otros colorantes y sentó las bases de la titulación, el método de análisis químico

cuantitativo y cualitativo más importante y rápido en la actualidad.

Mediante la decoloración del tornasol se podía saber hasta qué punto mezclar ácidos y bases, para obtener sales sin que sobre reactivo alguno, es decir, controlar las reacciones de neutralización, que ya habían sido expresadas por el médico, farmacéuta y químico alemán, Johann Rudolf Glauber (1604-1670), famoso por la conocida *Sal de Glauber* o sulfato de sodio, compuesto que hasta ahora se vende con este nombre (Selva, 2008, s.p.). Glauber usó una tira de tornasol en ácido sulfúrico, añadió *sosa cáustica* (hidróxido de sodio) y utilizó el principio de neutralización, esperó hasta que el color cambiara de rojo a azul, indicó que todo el ácido había sido consumido por la cantidad de sosa añadida y se obtuvo como producto una sal en el recipiente. Este compuesto se hizo famoso y le permitió vivir económicamente a Glauber, sus propiedades laxantes se volvieron conocidas y se consideró un tipo de *panacea* en su época, llamándola, incluso, elixir, porque curaba todas las enfermedades. Otro de sus aportes, al utilizar, igualmente, los principios de coloración, fue el descubrimiento de un método para extraer económicamente el mismo sulfato de sodio, mediante la reacción de ácido sulfúrico y cloruro de sodio: un ácido y una sal reaccionan para obtener otra sal y ácido clorhídrico. Este método es actualmente uno de los más importantes para la obtención del ácido clorhídrico, uno de los compuestos más relevantes de la industria química.

La ciencia debe reconocer su carácter accidental y entender que solo nace una teori-



zación de los fenómenos químicos, cuando se pone de manifiesto la naturaleza y sus cambios que, generalmente, se introducen asombrando al observador e incitándolo a escudriñar en ella para comprenderla. Glauber, no teorizó a priori los principios de las reacciones de neutralización, los conceptos de moles y equilibrio químico no andaban por aquella época establecidos y no partió de la formulación de la ecuación química, pues la propuesta de Lavoisier para crear un lenguaje para la química, que permitiera alinear todos los avances y teorías en un mismo entendimiento de la naturaleza, apenas empezaba a formularse en su cabeza. La experiencia y las evidencias accidentales estuvieron acompañando a los químicos durante toda la historia, incluso, actualmente sigue y seguirá ocurriendo. El uso de indicadores de pH, utilizados para evidenciar el cambio de coloración de alguna de las sustancias, permite conocer el grado de acidez de una solución, esta forma que no ha perdido su vigencia en los estudios químicos de la materia, tuvo que pasar por la teoría atómica posteriormente, para lograr matematizar el concepto de acidez y basicidad y entender que los ácidos son sustancias que liberan hidrógenos en forma ionizada y si se encuentran en agua, estos iones se adhieren a las moléculas de agua y forman el compuesto H_3O^+ . Incluso, debió formularse el concepto de equilibrio químico y concentración, para generar una escala medible de la cantidad de moles de esta molécula por cada litro de solución, que permitiera convertir en valor numérico el grado de acidez y comprender de manera cuantitativa, el efecto de los ácidos y las bases en las diferentes reacciones químicas. Pero las aplicaciones colorimétricas, a

partir de tinturas como el tornasol, atribuyen un valor histórico inmenso a los inicios de estos procedimientos analíticos.

Los ácidos, según Lavoisier, son compuestos formados por la combinación del *aire desflogisticado* con un no metal, mientras que la reacción con un metal forma un *calx* (óxido metálico). Por ejemplo: al liberarse el *gas silvestre* y entender que no es aire común, sus propiedades irritantes a los ojos son un indicio que debe estar compuesto de un elemento no metálico y al combinar este gas con agua, se formarían un ácido (actualmente se sabe que este compuesto es el ácido carbónico, H_2CO_3). Tendría que pasar algún tiempo, hasta que, en 1796, Berthollet, al descubrir el ácido sulfhídrico (H_2S), hallara que los ácidos se pueden formar sin necesidad de estar involucrado el oxígeno (aire desflogisticado). Cuando reacciona un metal con ácido se produce hidrógeno gaseoso y una sal, esto era una evidencia concreta, pero no fue fácil admitirla, debido que este gas inflamable, cuyas propiedades de combustibilidad eran palpables, no siempre fue considerado un elemento, sino una propiedad de la materia dadora del poder de combustión de un material.

Los avances en química empezaron a aparecer y podría decirse que, gracias a los estudios de Robert Boyle, la química, como la entendemos actualmente, inició su caminar, incluso, se cree que fue él quien instauró el uso de la palabra química en el vocabulario común, cuando abandonó el prefijo árabe *al* de la palabra alquimia en el contenido de su obra *El químico escéptico*. De esta manera, ya nadie que trabajara



en los propósitos de la ciencia llamaría de nuevo alquimia a los procesos de transformación de la materia. La alquimia quedaba atrás, no solo como una época que jugara a entender la naturaleza bajo teorías herméticas y simbólicas, sino en el sentido de que la química se desprendía de los supuestos y las creencias, y comenzaba a poner en la balanza y las probetas los hechos para corroborarlos y generar leyes, para comprender el comportamiento de la materia y su composición.

El concepto de vacío y el estudio de los gases continuaban estando en la matriz de la búsqueda de la comprensión de la materia conformada por átomos; mediante las bombas del vacío boyleriano se extraía el aire contenido en los recipientes huecos, para poner a prueba diferentes fenómenos naturales. La búsqueda de la descomposición de los elementos aristotélicos en elementos más sencillos era la piedra que debía tallarse, para poder impulsar la comprensión material de la naturaleza. Boyle y su discípulo, Robert Hooke, quien sería el descubridor de la célula, no solo evidenciaban el vacío que se generaba dentro de los recipientes al extraer el aire, también encontraron que, si se introducía previamente una vela encendida en el recipiente, una vez generado el vacío, su llama languidecía, al igual que ocurría con las llamas de sustancias como el alcohol o la madera. También notaron que los animales no lograban respirar dentro del vacío boyleriano, el sonido desaparecía, pero la pólvora podía continuar ardiendo por un buen rato. Este último hecho no sería comprendido hasta que se desarrollara la teoría de la combustión, la cual supera uno de los

conceptos más difíciles de la alquimia: *el flogisto*. El logro a la superación entre la ciencia especulativa (pseudociencia) y la ciencia demostrativa está íntimamente ligado al concepto de flogisto, donde Antoine Lavoisier encabeza la revolución química: Es el padre de la química moderna.

Había que definir lo que es elemento y lo que no lo es, para esto había que lograr descomponer las sustancias en partes que no pudieran ser descompuestas en nada más simple. El estudio de los gases debía definir si son estos un tipo de mezclas del elemento aire con sustancias que arrastra a su paso o son elementos independientes, que mezclados componen al aire común. Un fenómeno que se presentaba en la calcinación de los metales o la combustión de materiales leñosos, generaba el punto clave para el estudio de la composición de la materia: *el fuego proporciona peso a los metales al hacerlos arder, mientras que les quita peso a los materiales leñosos, consumiéndoselos*. Entonces, ¿por qué algunas cosas arden en llamas y otras solo liberan calor? Si las llamas que se desprenden en la combustión o calcinación son el elemento fuego manifestándose, ¿cómo entender el calor que se libera? ¿Cuál es la naturaleza de la combustión y la calcinación? Si el fuego es un elemento, ¿por qué no aporta masa a la madera cuando se calienta, mientras que a los metales sí? Realmente, ¿cuál es la naturaleza del fuego?

La respuesta a todos estos interrogantes estaba orientada a definir si es el fuego el que se integra a los metales al arder o es el aire. Boyle consideraba al fuego como la causa del aumento de peso de los metales



y, al aire, como mediador, vehículo o agente indispensable para que el fuego se combinara con las concentraciones del metal. Con este razonamiento explicaba lo que había encontrado en las cámaras de vacío, donde la ausencia de aire impedía la continuación de la combustión, la respiración y la calcinación, y hace alusión a que, sin la presencia del aire, el fuego no puede manifestarse. Es increíble este razonamiento, pues solo tomó las herramientas con las que contaba: la observación y precarios instrumentos de experimentación. Más adelante, cuando se desarrolle la teoría de la combustión, se entenderá por qué considerar indispensable al aire para que estos procesos acontezcan, fue el punto de partida correcto para que todo el trabajo científico se enfocara en entender de qué está compuesto el aire, y, así, establecer la relación oxígeno-combustión.

Para Boyle era sencillo explicar que el fuego estuviera escondido en la madera y escapara de ella al arder, pero, si con el fuego se hace arder la leña, ¿por qué se libera entonces el mismo fuego disminuyendo el peso del material? Se pensaba que el peso se reducía porque se liberaba aire (Selva, 2008, s.p.).

John Mayow (1640-1679), físico y fisiólogo inglés, al ser discípulo de Robert Boyle, adaptó los experimentos del vacío para estudiar la naturaleza del aire: Utilizó un matraz cerrado en la parte superior, con rejilla en la parte inferior; sobre la rejilla puso una vela encendida y sumergió parcialmente el matraz en un recipiente con agua; evidenció que después de un momento, la vela se apagaba, elevándose el nivel de agua

dentro del matraz. De esta forma, quedaba claro que los experimentos anteriores realizados por Boyle estaban en lo cierto y se confirmó que la presión del aire dentro del matraz disminuía, debido que parte del aire era consumido durante el proceso de combustión. Este experimento lo extrapoló para entender por qué la respiración de un ratón cesaba en el vacío y encontró que en el mismo matraz, bajo las mismas condiciones con las que realizó el experimento de la vela, el ratón moría, dado que consumía **la misma proporción** de aire del que consumía la vela. Se concluyó, que tanto la llama de la vela como el ratón necesitaban del aire para poder existir, pero que solo una parte era indispensable y no todo; aquí se hizo patente la idea de que el aire no es un elemento y debía estar compuesto por sustancias más simples que él. Mayow estableció una dualidad en la naturaleza del aire: debía estar conformado por dos sustancias, una de ellas permite que la llama de una vela avive y no se apague, al igual que permite la respiración y, la otra, no tiene incidencia en ambos procesos, al permanecer como residuo. A la primera sustancia la denominó el *espíritus nitro aereus*, que más adelante Lavoisier definirá como el oxígeno (Selva, 2008, s.p.).

Retornando al trabajo de Mayow, al disminuir la cantidad de la sustancia necesaria para mantener viva la llama de la vela dentro del matraz, la presión disminuye y de esta forma asciende el nivel del líquido dentro de matraz. En la combustión existen otros productos que permanecieron indetectables para Mayow: la liberación del *aire silvestre* de Van Helmont, el cual no podía ser aire común, debido a que hacía



arder los ojos, y la producción de agua que se condensa en las paredes del recipiente. Develar la naturaleza de la combustión permitiría establecer que el aire presente hace posible la combustión, gracias a uno de sus componentes (el oxígeno) y que, al arder un material, se desprenden sustancias que se mezclan con el mismo aire.

Thomas Kuhn (1922-1996), filósofo e historiador de la ciencia, definió los *paradigmas* como: “Realizaciones de la ciencia universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica” (Institut de Batxillerat San Vicent Ferrer, s.f., s.p.). A partir de la definición de Kuhn, nos permitimos pensar la concepción de la realidad, necesariamente enmarcada en un contexto específico; en él la ciencia determina el modo de pensar y entender el mundo. Vencer los paradigmas es quizás la labor de toda actividad científica, y mientras eso no ocurra, el concepto de verdad está ligado a lo ya existente y establecido. Por eso, toda época y lugar en la historia tiene su verdad y en ella se logra entender al hombre como ser histórico; es la superación de los paradigmas, la que da paso a una nueva época del pensamiento: desde una visión geocéntrica a una visión heliocéntrica, desde considerar la mecánica clásica como la cúspide del conocimiento a una revolución en el campo de la física, con la teoría de la relatividad de Einstein, y de igual forma, de una concepción de la materia como combinación de los elementos naturales al desarrollo de la teoría atómica.

Entre los diferentes paradigmas que podemos resaltar en la historia de la química,

es quizás la teoría del flogisto la que permite comprender la importancia de superar un esquema de pensamiento, como fundamento de la concepción científica del mundo. El estudio de los gases, de la mano de cada uno de los hombres que la historia puede exaltar y de aquellos que ha olvidado, es el puente que debió cruzar el pensamiento científico. A partir de la superación de la teoría del flogisto, la química se desarrolla y se mantiene en un ritmo constante de avance, permitiéndonos afirmar que, superar la explicación del fuego y el aire como flogisto e instaurar la teoría de la combustión de Lavoisier, abre las puertas a una comprensión atómica de la materia. Ramas de la ciencia y del hacer humano como la termodinámica, la transferencia de calor, la química analítica, la electroquímica y todas las aplicaciones industriales, que no habría lugar aquí para mencionar, se desarrollaron. El nuevo paradigma: la concepción de la materia como átomos, sustenta todo lo hasta ahora desarrollado, incluso, nuestras civilizaciones industrializadas no tendrían sentido, si se negase una explicación del universo de este tipo.

El flogisto ocupó las mentes de los científicos por más de 150 años, a medida que se desarrollaba el concepto moderno de *elemento* con el estudio de los gases (Selva, 2008, s.p.). La historia de la ciencia le atribuye su origen a Georg Ernst Stahl (1660-1734), químico y médico alemán, basándose en los trabajos de su maestro Joachim Becher (1635-1682). Becher tenía una comprensión de la naturaleza de carácter alquimista y mantenía vigente la teoría de combustión basada en la presencia del azufre en los materiales. Al experimentar



con carbón vegetal y hollín, encontró que ardían en presencia de fuego, pero que ninguno de los dos contenía azufre. Al utilizar otros materiales combustibles, notó que existía una característica común entre ellos: una tierra de apariencia grasosa, que denominó *tierra pingüis*. La calcinación debería permitir corroborar la presencia de esta tierra grasa, al calcinar cobre en las llamas del carbón vegetal debía estar escondida o ser el mismo fuego la *tierra pingüis*, la cual se transfería al metal y así explicó, el incremento de peso del cobre. Para comprender el fenómeno contrario: la disminución de peso en un pedazo de madera que arde, se tomaba como ejemplo la producción de carbón; la combustión de la leña de manera que no escapara todo el fuego (flogisto o llama), permitía obtener un material que almacenaba de manera más disponible la tierra grasa para calentar o liberarse, la cual en la leña se encontraba más incrustada.

Boyle no entendía cómo la madera podía quemarse adquiriendo flogisto disponible y, al mismo tiempo, disminuyera de peso, pero Sthal, al definir como flogisto la tierra grasa de Becher, parecía dar una explicación convincente: parte del flogisto se perdía en el proceso y, a su vez, el aire que se desprendía, aportaba a la pérdida de peso, mientras que el flogisto que permanecía, se organiza al interior del material, de forma que pudiera liberarse más fácilmente cuando fuera necesario. Esta idea postulaba la presencia de una *propiedad de la materia*, sosteniéndose que existe una sustancia que se pierde o se gana en el proceso de combustión o calcinación; dicha sustancia debía ser el elemento fuego,

que se albergaba en forma de tierra grasa en los materiales.

¿Qué es entonces la llama que se evidencia al encender un trozo de madera? ¿Por qué no todos los materiales que tienen flogisto desprenden llama? Sthal responde que las llamas eran producto de la forma como se libera el flogisto: era un desencadenamiento violento (Hohenheirn, s.f., s.p.). Algunas sustancias no presentaban llamas, porque el flogisto se liberaba de manera más controlada, pero el calor que permitía evaporar agua era producto del mismo flogisto, incluso, el flogisto podía ser considerado como calor. Allí surgió el gran interrogante, que luego respondería el desarrollo de la termodinámica: si el calor (calórico en su terminología inicial o fuego ígneo como lo denominó posteriormente Lavoisier) era flogisto y, por lo tanto, materia, ¿por qué no aportaba al peso del material que se calentaba? Debieron pasar algunos años para responder a esta cuestión.

La teoría del flogisto permaneció en pie como fundamento de la combustión. La respiración y la calcinación arrojaban evidencias empíricas que la sostenían: al calcinarse un metal en presencia de aire, este se convierte en *calx*, el cual tiene un peso mayor al peso inicial del metal; excepto el oro, todos se cubren de herrumbre (óxidos) al exponerse a la atmósfera, las velas y sustancias combustibles se apagan en el vacío boyleriano y no puede haber combustión en ausencia de aire. Estas evidencias estaban afianzadas teóricamente, gracias a la teoría del flogisto, en ella reposaba la validez de los hechos: la pérdida o ganancia de peso en los proce-



Los procesos de calcinación o herrumbre se debían a la liberación del flogisto, había metales que espontáneamente perdían el flogisto y ya no podían hacerse arder fácilmente, por estar cubiertos de herrumbre. Para explicar el hecho de que un metal, al herrumbrarse por acción del aire atmosférico y perder su flogisto, aumentara de peso, se valía de decir que, aunque los metales puros poseían mayor flogisto que su *calx* (es decir, su herrumbre) y lo perdían en el proceso, al mismo tiempo absorbían aire del ambiente, lo que causaba el aumento de peso. En el proceso contrario, al calcinar la sal o el *calx* de un metal, se absorbe flogisto y se libera el metal puro. A pesar de este tipo de explicaciones, aquí flaqueaba la teoría del flogisto, porque entenderlo como una propiedad material que se liberaba, al reducir el peso en algunos procesos, pero aumentándolo en otros (el peso se reducía en la calcinación de la madera y aumentaba en la oxidación de los metales), era asumir que el flogisto tenía una propiedad dual, contraria, pero complementaria. Este pensamiento no lograba integrarse fácilmente en la mente de los hombres de ciencia, aunque más adelante en la historia, con la evidencia de la naturaleza dual de la luz, se entendería que puede existir la dualidad material-inmaterial, idea que siempre estuvo patente en la alquimia china (Yin-Yang).

Boyle era escéptico respecto a la idea de que el metal ganaba átomos de fuego o flogisto para aumentar su peso, porque si los metales que espontáneamente perdían su flogisto por acción del aire, aumentaban de peso, entonces habría que estudiar más profundamente la naturaleza del flogisto.

Para comprender el flogisto como algo que se liberaba de los metales oxidables, había que admitir que se consumía, al igual que ocurría en la respiración o en la llama de una vela: al acabarse el flogisto de una vela encendida y ser liberado el ambiente, el aire se saturaba de flogisto y la llama se apagaba, de manera análoga ocurría en el cese de la respiración del ratón. Pero, cuando se encendía una vela, las llamas podían hacer evaporar el agua, sugiriéndose que la naturaleza del flogisto era elástica; para tratar de explicarlo en términos actuales: el flogisto lograba introducirse en el agua, disminuía las fuerzas de repulsión entre las partículas y permitía su evaporación. Las afirmaciones de los defensores del flogisto dejaban aún en pie los interrogantes sobre su materialidad: si lograba evaporar agua y, a su vez, su naturaleza era material, ¿cómo lograba atravesar las paredes del recipiente en el que estaba contenida el agua? Esta comprensión del flogisto no lograba desprenderse de la idea, de que este tenía una doble naturaleza, material e inmaterial.

Vemos que el fundamento de la existencia del flogisto como teoría que sostiene los procesos de combustión, calcinación, respiración e, incluso, evaporación, empezaba a cojear y no le quedaba más alternativa a sus defensores, que tornarse especulativos; los hombres que anunciaban el inicio de una nueva ciencia basada en los principios matemáticos y físicos, aún tenían que recurrir a las explicaciones alquímicas de la materia. Aunque los postulados de Stahl permitieron iniciar investigaciones posteriores, para dar origen a la teoría de la fotosíntesis, al sostener que el flogisto se libe-



raba de las sustancias combustibles y que no podía permanecer en el ambiente, porque este terminaría saturándose e impediría cualquier posible combustión posterior; entonces, el flogisto debería transferirse a otro material y parecían ser las plantas las que lo absorbían, para convertirlo en aire. Esta idea permitió explicar cómo el dióxido de carbono es absorbido por las plantas, que luego producen oxígeno, aunque en términos del momento, equivaldría a decir que las plantas absorbían flogisto para *desflogisticar* el aire y permitir la combustión (enriquecer el aire de flogisto). El estudio de la materia orgánica no prosperó rápidamente, debido a que este intercambio entre las sustancias y el aire parecía más evidente entre los metales, los ácidos, los álcalis, el azufre (este por ser el principio de combustibilidad heredado del pensamiento alquimista) y, en general, las sustancias minerales.

Tomemos un ejemplo común que permita analizar el concepto de flogisto desde su carácter dual: la evaporación del agua. Para lograr que el agua en su estado sólido pase a estado líquido y, posteriormente, si se continúa el calentamiento, pase a estado gaseoso, deberá estar presente el fuego. Ahora, al utilizar un recipiente con agua, se dispondrá del flogisto que puede desprender el carbón encendido; este flogisto se incorporará al agua y permitirá su incremento de temperatura y su cambio de estado (según la teoría de Sthal). Para que el flogisto se incorpore al agua, deberá atravesar el recipiente y hasta este punto deberá asumirse como una propiedad inmaterial de la naturaleza. Una vez dentro del recipiente, para que interactúe con el

agua, deberá comprenderse como propiedad material de la naturaleza. Al incorporarse el flogisto en el agua, el estado de agregación de esta sustancia cambiaría, ya sea de sólido a líquido o de líquido a gaseoso, al depender de la cantidad de flogisto que entre al agua o de la que disponga el carbón que lo libera. Al ser el flogisto inmaterial, ¿a qué se debe que la temperatura del recipiente se eleve? O, ¿acaso el flogisto se incorporó también en proporción al recipiente que contiene el agua? Al evidenciarse que el agua en presencia de flogisto cambia de estado y reconociendo que los gases son más *rebeldes* que los líquidos o sólidos (recuérdese que en tiempos de Lavoisier no existía el concepto de enlace) y aceptando la idea de que la materia está compuesta por átomos, es decir, tratando de explicar lo que sucede en palabras modernas, se percibiría que el flogisto tendría la facultad de liberar las fuerzas de atracción entre los átomos, al permitir que se movieran a mayor distancia. Ese movimiento de los átomos, sabemos, hoy en día, es la causa de la temperatura y la medida de la energía cinética; y la transferencia de calor que se puede sentir al tocar las paredes del recipiente, podría entenderse como el mismo flogisto que se estaría moviendo (el concepto de calor apenas empezaba a surgir). El flogisto era, entonces, la materia que se liberaba del carbón para interactuar con los átomos de agua separándolos y permitiendo su evaporación, pero a su vez, era el calor que se manifestaba en el proceso, puesto que el flogisto mismo es fuego: El flogisto fue el punto de partida para entender el calor y para desarrollar la termodinámica.



Era hora de formular correctamente el proceso de combustión, la importancia del aire en él, explicar los cambios de presión en un recipiente cerrado, cuando se apagaba una vela que ardía en su interior, dilucidar por qué un ratón muere en el vacío boyleriano y superar por fin la antigua teoría de los elementos, para establecer el atomismo. Primero, había que refutar la idea de que el fuego era un elemento y, por lo tanto, el flogisto también. Carl Her Scheele (1742-1786), químico sueco, a quien la historia no reconoce como autor del descubrimiento del oxígeno —aunque lo descubriera mucho antes que Joseph Priestley (1732-1804), a quien la historia sí lo enmarcó con este mérito—, sostenía que el aire común estaba compuesto por dos componentes, uno de ellos consumido por la vela o la respiración y otro que permanece como aire residual. La parte del aire contenido en el matraz de Mayow, que disminuía al consumirse la llama de la vela (y que correspondía a la tercera parte del volumen de aire original), parecía ser el flogisto de Sthal. Para comprobar esto, Scheele realizó un experimento parecido al de Mayow: puso un matraz invertido, con un fósforo encendido en su interior, sobre un recipiente con agua; una vez apagado el fósforo, el nivel de agua que ascendió en el interior del matraz ocupó la tercera parte del volumen, que antes ocupaba de aire y Scheele concluyó que las dos terceras partes del aire que permanecían, no lograban mantener la combustión del fósforo; se atrevió, entonces, a formular que el aire estaba compuesto por una tercera parte de aire de combustión y dos terceras partes de aire restante. Es increíble este descubrimiento, porque realmente el aire

está constituido principalmente por dos compuestos, al ser aproximadas sus proporciones, respecto a los valores que encontró Scheele. Actualmente, conocemos que el aire lo componen no solo el oxígeno (21 % del aire) y el nitrógeno (79 % del aire), sino que puede tener concentraciones muy pequeñas de neón, argón, helio, criptón, hidrógeno, metano, agua, ozono, dióxido de carbono y óxido nitroso, principalmente. Pero el conocimiento científico no ocurre de inmediato, se da a medida que se construyen los cimientos iniciales, que generalmente nacen bajo la capacidad de observación, con deducciones simples como las que encontró el químico sueco.

El proceso de combustión comenzó a entenderse, ahora el flogisto no era solo aquello que se liberaba de las sustancias combustibles o lo que permitía que se calentara un recipiente, sino que se suponía que el aire estaba compuesto por una parte que carecía de flogisto y que permitía la combustión al irse saturando: *aire desflogisticado*. Scheele realiza el mismo experimento, que una vez ideó Robert Boyle y hace reaccionar, en baño María, ácido sulfúrico (aceite de vitriolo) con estaño dentro de un tubo, que se comunicaba con el exterior mediante uno de sus extremos. Scheele encontró que al acercar fuego a la parte superior del tubo, en su interior, el fuego o *aire desflogisticado* se mezclaba con el aire común y calentaba las paredes del tubo. Scheele planteó que el calor era, entonces, aire con flogisto, pero no se dio cuenta que en dicha reacción estaba ocurriendo, nada más y nada menos, que la formación de agua a partir de la combustión del hidrógeno liberado del ácido sulfúrico con el



aire desflogisticado. Las gotas que aparecieron en las paredes del tubo eran agua que se condensaba (Selva, 2008, s.p.). Tal vez para Scheele, lo que más fácilmente se evidenciaba era la mezcla entre el fuego y el aire, y para él pasó desapercibido el hecho de la formación de agua, pero ahí estaba la clave para sostener aún más, que el llamado *aire desflogisticado* era algo material, que estaba interactuando con hidrógeno para formar un nuevo compuesto. El hecho de que Scheele no lo notara, permitió que el flogisto siguiera vinculado con la idea, que el aire que hacía combustión era aire saturándose del flogisto liberado por la sustancia que ardía, hasta el punto de la saturación, donde se detenía la reacción.

Es necesario apuntar aquí algunas de las contribuciones en cuestión de descubrimientos de este personaje, porque ha sido relegado de la historia en cuanto al descubrimiento del oxígeno, pero, además, su ingenio y disciplina nos legaron métodos de obtención de compuestos de altísimo valor industrial en la actualidad, entre ellos, debemos nombrar al ácido fluorhídrico, la glicerina, el manganeso, el ácido tartárico, ácido benzoico, ácido málico, ácido oxálico, ácido gálico, ácido cítrico, ácido láctico, ácido úrico y el cloro.

El descubrimiento del *aire desflogisticado* u oxígeno, como más tarde ha de llamarse, tiene su origen en Scheele, pero la historia castiga a quien no hace público su trabajo; dado que Scheele publicó tardíamente su obra. Priestley es quien aparece en la mayoría de libros de historia como el autor del descubrimiento del oxígeno. En este trabajo, que pretende reunir a los hombres y sus

aportes a la química, queremos dejar explícito el reconocimiento real al trabajo de Scheele, como descubridor del compuesto que lideró la revolución química moderna y el cual sustenta muchos de los procesos más importantes de nuestras vidas, entiéndase por esto, que es el oxígeno la molécula más importante para mantener nuestras funciones biológicas y, por esta u otras razones, fue que Lavoisier llamó al aire flogisticado de Rutherford (nitrógeno): "sin vida" y dio a entender que la otra parte del aire, el oxígeno, aquella que carecía de flogisto, tenía las propiedades opuestas: era dadora de vida, sea para mantener viva la llama de una vela o para permitir la vida.

Antoine Lavoisier (1743-1794), químico francés, que ejerció la ciencia escudado en una profesión en leyes, una vez terminó sus estudios en Derecho, tomó un cargo administrativo, que le permitió adquirir los recursos para desarrollar sus investigaciones científicas. Ese mismo cargo que le dio la posibilidad de desentrañar la naturaleza de la materia y sentar las bases de la química moderna, le costó la vida a temprana edad, pero, dejó un legado enorme y quizás mucho por hacer aún, para el desarrollo de la ciencia. Muere guillotinado en plena revolución francesa, por hacer parte de una asociación financiera, que compraba los derechos de cobrar los impuestos que debían pagarse a la Corona. Aunque la historia lo limpia de todo interés lucrativo excesivo, este trabajo le favoreció en términos económicos, para disponer de los recursos necesarios para dedicarse a una vida de investigación y estudio. El gran empeño por entender la combustión y la calcinación en una serie de experimentos, basándose



en los trabajos de quienes le precedieron y de quienes trabajaban en su contexto, le valió el título del más grande químico que la historia ha conocido. Entre sus experimentos se encontraba la exposición de los diamantes a altas temperaturas, con ello lo que buscaba era definir si estos ardían o se evaporaban y se sorprendió ante el hecho de que siendo el diamante un material mineral cristalino, no cristalizaba, sino que ardía como lo hace el carbón o un pedazo de leña (Selva, 2008, s.p.).

La formación de dióxido de carbono, proceso que ocurre al calentar un componente orgánico, una vela o algunos minerales, estaba presente en la fundición del diamante, más tarde, se entenderá que el *gas silvestre* de Van Helmont es uno de los productos principales de la combustión y está íntimamente relacionado con la respiración. Este último hecho lo comprobaría Lavoisier en compañía de su colaborador, el matemático Pierre Simon de Laplace (1749-1827), al notar que no todo el oxígeno inhalado en la respiración era exhalado y, que, en cambio, el ambiente se saturaba de *gas silvestre*, al parecer, el mismo que satura el ambiente en la liberación del flogisto, para impedir la continuación de la llama de una vela.

En la misma época en que Lavoisier trabajaba empecinadamente por comprender la composición de los diamantes, Joseph Priestley (1733-1804) había aislado una sustancia distinta del aire, que la identificó con el *gas silvestre* de Van Helmont. Al igual que Joseph Black (1728-1799), médico escocés, había encontrado que este gas se formaba al calcinar magnesia (carbonato de magnesio). Black, denominán-

dolo *aire fijo*, encontró que en presencia de una vela apagaba la llama y que en la respiración se desprendía el mismo aire y saturaba el ambiente. También encontró que la fermentación alcohólica desprendía la misma sustancia, al igual que la combustión de un trozo de madera, como ya lo había evidenciado Van Helmont. Este gas, que ya hemos mencionado anteriormente, es el dióxido de carbono, el cual comenzó a ser utilizado en diversas aplicaciones industriales. Se sabe que Priestley lo usaba constantemente en sus experimentos y entre sus conclusiones, notó que dotaba de carácter ácido al agua cuando se disolvía en ella, sentando las bases de la aplicación de la gasificación, el fundamento de las bebidas gaseosas o *aguas de soda*, como se conocían antiguamente (Asimov, 1975, s.p.).

El aire de Black, el aire fijo o dióxido de carbono, aunque había sido descrito por Van Helmont como una mezcla de aires, con propiedades inflamables (por la presencia de hidrógeno) y ligeras; su descubrimiento como compuesto se atribuye al químico escocés. Este hecho que mostraba con evidencias cómo el aire no era una sustancia elemental, sino que existían otros tipos de aires con propiedades diferentes, encaminó el trabajo de Lavoisier hacia la comprensión completa de la combustión. La ganancia de pesos en los procesos de calcinación fue un punto clave, para que Lavoisier pusiera contra la pared la teoría del flogisto: si se aceptaba que una sustancia al ser calcinada dejaba libre su flogisto, no tenía sentido acudir a una propiedad "antipeso" de la materia, para explicar el aumento del peso. Por ejemplo: cuando



se calcina un metal se obtiene su *calx* (en términos actuales esto sería el óxido del metal), el cual no arde, porque no posee suficiente flogisto, dado que ya fue liberado del metal al arder; pero este *calx* posee mayor peso que el metal inicial. Si el flogisto es un elemento y se ha liberado, el *calx* debería pesar menos que el mismo metal.

Lavoisier consideraba que el peso que se fijaba en los metales correspondía a la fracción del aire que se consumía en los experimentos de Mayow; la tercera parte del aire que al consumirse disminuía la presión interna del recipiente que contenía la vela.

La teoría del flogisto, al reconocer la presencia de dos tipos de aires, uno desflogisticado y otro flogisticado, explicaba el hecho de que al estar el aire en contacto con un material combustible (altamente rico en flogisto), el aire inicial, carente de flogisto, de alguna manera incitaba para que el material lo cediera, como si la naturaleza buscara siempre un equilibrio. Una vez el flogisto era liberado, el aire se enriquecía de él y ya saturado, el material no podía continuar cediendo más. Así, la combustión ocurría cuando el aire que actuaba como vehículo se mezclaba con el flogisto, al ser fuego lo que se liberaba. Y si era el fuego lo que se liberaba y se consideraba como elemento material, ¿cómo entender el mismo resultado que habían obtenido Mayow, Boyle, Lavoisier, Cavendish y Scheele, al evidenciar que una tercera parte del aire contenido desaparecía, en vez de aumentar como debería ocurrir si se argumentara que el flogisto era material y migraba hacia el aire contenido en el recipiente?

Lavoisier advierte que hasta ahora nadie había tomado en cuenta la presencia del aire en la calcinación de los metales, que todos observaban una ganancia de peso del *calx*, pero nadie había tomado rigurosamente las diferencias entre los pesos del aire y el *calx*, comparativamente. Usando dos recipientes cerrados, pero conectados entre sí y depositando ácido con pequeños trozos de metal previamente pesados en uno de ellos y un álcali fuerte en el otro, el *aire fijo* que se desprende del primer recipiente asciende hasta el segundo, donde reacciona con el álcali. Pesándose los recipientes antes y después del proceso, Lavoisier encontró que lo que se perdía en el primero (correspondiente al peso del gas desprendido), se aumentaba en el segundo. Este experimento permitió formular la más importante de las leyes de la química, la ley de la conservación de la masa: *En la naturaleza y, por lo mismo, en el laboratorio, nada se crea, solo se transforma* (Selva, 2008, s.p.).

Lavoisier, al sostener que lo que aporta peso al *calx* es el aire que se fija en el metal y utilizando la ley de la conservación de la masa, que él mismo enunció, realizó experimentos de calcinación en recipientes previamente pesados. Al utilizar fuego para calcinar los metales, concluyó que el peso total del recipiente, incluyendo todo el material en su interior, no variaba. Por lo tanto, ni el fuego, ni el calor, ni, por ende, el flogisto, se adhería al metal, sino que era la tercera parte del aire la que interactuaba con el material, transformándolo, sin que el sistema completo cambiara de peso. Hasta aquí nadie realizaba las calcinaciones en recipientes cerrados y, por



esta razón, no había sido sencillo mostrar cómo los pesos de todo el sistema eran invariables; cuando esto se logró, se destruyó la idea del flogisto como elemento material. Ni el calor, ni el fuego, considerados formas de flogisto, son materia: la combustión ocurre porque el aire, que es un compuesto, se consume en una proporción que corresponde a su tercera parte, al corresponder esta fracción a uno de los elementos que lo componen (el oxígeno), al igual que la otra parte que queda como aire residual, es otro de los componentes del aire (el nitrógeno). Ese elemento que se consume, aporta la masa al *calx* y los gases que se liberan en la quema de los trozos de madera o azufre son, entonces, productos de la combustión y no aire contaminado. La materia está compuesta por diversos elementos y compuestos, que se manifiestan en la conservación de la masa total en un proceso químico, masa que permanece invariable; no es ninguna causa material ajena a los mismos constituyentes de la materia, la que interactúa para generar el calor, el fuego, las llamas, los diversos gases, entre otros.

¿Qué es el fuego?

El pensamiento alquímico consideraba posible transformar un elemento en otro, herencia de la teoría griega de los elementos. Incluso, en la época del estudio de los gases, Van Helmont encontró que al evaporar agua se obtenía un residuo terroso en el fondo del recipiente, aparentemente, demostró la validez de los preceptos antiguos. Lavoisier usó de igual modo el concepto de conservación de la materia y ad-

virtió la importancia de comparar el peso de las sustancias iniciales con los pesos finales, diseñó un recipiente que él mismo denominó: "pelicano". Colocó agua destilada ocho veces en este recipiente y lo cerró, calentó el pelicano durante *ciento un días* a una temperatura constante de 100°C, una vez hubo de recoger los resultados del experimento, encontró que Van Helmont tenía razón: un sólido blanco, que enturbia el agua, se encontraba depositado en el fondo del pelicano, pero a diferencia de Van Helmont, gracias a su escepticismo, no le pasó desapercibido el peso total del recipiente, el cual no había variado (Selva, 2008, s.p.). Quedaba averiguar si alguna fracción del agua había sido consumida para formar tierra (el residuo blanco), porque no era posible admitir que el fuego como flogisto se hubiera incorporado en el agua, para formar un nuevo elemento; si esto fuera posible, el peso del recipiente tenía que haber variado. Al separar el agua del recipiente y filtrándola para obtener el residuo blanco, pesó el pelicano vacío: el recipiente había perdido 1.13 gramos, los cuales deberían corresponder al peso del residuo sólido. Al lograr secar y asegurar que ninguna parte de agua se perdiera en el proceso, pesó el sólido precipitado y notó que tan solo pesaba un 28 % de lo esperado. Lavoisier, tal vez negándose a aceptar que era posible obtener tierra a partir de agua, evaporó en otro recipiente el agua retirada del pelicano y encontró que, de igual forma, se depositaba un residuo en el recipiente. Al pesarlo, la suma de los dos residuos era mayor a la pérdida de peso del pelicano. Lavoisier, de manera no equivocada, atribuyó el peso total de los residuos al vidrio desprendido de los recipientes y



argumentó que la materia *no se crea ni se destruye*, que siempre estuvo presente el vidrio en el proceso, solo que esa fracción que parecía tierra, se encontraba libre de su forma de recipiente: la teoría del flogisto estaba prácticamente superada y la química estaba tomando forma de ciencia demostrativa, abandona la especulación.

La defensa de la teoría del flogisto estuvo liderada por diferentes personajes, pero es quizás Joseph Priestley (1733-1804), el último científico que la defendió. La historia es bastante curiosa, cuando para superar una concepción científica se necesita del más grande defensor, para aclarar el camino opuesto, que derrumbará las ideas que él mismo defendía. De esta forma, Priestley, que siempre mantuvo contacto con Lavoisier, entregará los resultados necesarios para que la teoría del flogisto fuera por fin superada. Aunque las explicaciones de Priestley a sus descubrimientos estuvieron bañadas en los ríos del pensamiento flogístico, Lavoisier las ató a sus preceptos y experimentos, para poder demostrar la existencia del oxígeno en el proceso de combustión y redefinir el concepto de elemento químico, que abrió el paso a la teoría atómica y la construcción de un lenguaje sistemático y universal para la química.

Priestley es reconocido en la historia como un hombre de ciencia y religión, escribió sobre teología y química, cuyos intereses en el estudio de los gases llegó solo cuando tenía treinta y ocho años (Selva, 2008, s.p.). Se le atribuye el descubrimiento del ácido clorhídrico gaseoso, algunos óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono como producto en algunos procesos de

combustión (esto ocurre cuando la combustión es incompleta), la obtención de metales puros a partir de la reducción de los calces (óxidos metálicos) con **hidrógeno**, al ser este último gas, su mayor descubrimiento. Poder encontrar la naturaleza del gas inflamable (*aire pingüe*), que había advertido Cavendish en la reacción de los metales con los ácidos, permitió establecer la composición del aire y considerar el oxígeno como elemento puro.

Debido a que generalmente las calcinaciones se hacían en presencia de carbón mineral, los diferentes aires que se desprendían, incluyendo principalmente el *gas silvestre* de Van Helmont, encargado de saturar el ambiente e inhibir la combustión, no era posible determinar si el aire residual era un elemento o una mezcla de gases. El *aire fijo* de Black se desprendía al calcinar un *calx* y en este aire era imposible mantener la combustión, por lo tanto, no podía ser aire fijo lo mismo que se absorbía en la formación de herrumbre en un metal expuesto al aire. El aire fijo debería aislarse del aire común y no entenderlo como parte del aire desflogisticado. Fue cuando Priestley comunicó a Lavoisier, que era posible obtener un gas en la calcinación de los calces en ausencia de carbón, que se enlazaron las conjeturas que se tenían sobre la composición del aire. Priestley hizo notar a Lavoisier, que una vela avivaba con vigor en presencia de este gas, que, incluso, la madera ardía con vehemencia, al crepitar y consumirse agresivamente. Este gas liberado, primeramente, en la descomposición del óxido de mercurio, fue corroborado con diversos óxidos por el mismo Priestley y encontró los mismos resultados.



Priestley mantenía una respuesta basada en la teoría del flogisto para explicar las características de este gas, sostenía que el aire común carecía parcialmente de flogisto y se saturaba a medida que el flogisto se liberaba de una sustancia. En ningún momento atribuía a este gas la naturaleza del flogisto y he ahí lo que le costó abrir el camino que, Lavoisier si logró percibir. Priestley creía que este gas carecía mucho más de flogisto que el aire común, debido a que carecía de la otra parte de aire residual y, por eso, se manifestaba tan violentamente la combustión. El gas que encontró Priestley es **aire desflogisticado** puro.

Lavoisier reprodujo el experimento de Priestley y en 1775, escribió las conclusiones que encontró. Entre ellas, estaba la evidencia de que dicho gas no era *aire fijo*, puesto que no enturbiaba el agua, no inhibía la combustión y era más puro que el aire atmosférico. En 1777 publicó su teoría sobre la calcinación y la combustión, en la que estableció una serie de conclusiones, que tomarían carácter de leyes generales para el devenir de la ciencia: el aire no es un elemento puro, está compuesto por dos fluidos elásticos (gases), uno de ellos es el aire mefítico, aire residual o aire flogisticado, que denominó *ázoe* ("sin vida", hoy en día, nitrógeno) y el otro es aire respirable, que denominó oxígeno, que era el gas descrito por Priestley. Cuando este último se combina con un metal, se forma un *calx*; el aire flogisticado es el mismo aire que encontró Priestley, Scheele y Cavendish (aire mefítico); el *gas silvestre* de Van Helmont es el mismo *aire fijo* de Black, el cual es producto de la combustión de materiales orgánicos, la respiración, el consumo de

la llama de una vela y la fermentación; los ácidos son compuestos formados por sustancias no metálicas y oxígeno (Lavoisier se refería a los ácidos oxácidos, debido a que actualmente se conocen ácidos sin presencia de oxígeno denominados hidrácidos, que posteriormente descubriría Berthelot al sintetizar ácido sulfhídrico); los metales, el oxígeno, el nitrógeno y los no metales son elementos, porque no se pueden reducir en sustancias más simples que ellos y, mucho menos, pueden dar origen unos a otros, de esta forma, el aire, el agua y la tierra deberán considerarse como compuestos, mientras que el fuego es una manifestación del proceso, que ocurre entre la combinación del oxígeno con el combustible, en el cual se libera calórico, luz y aire fijo (Selva, 2008, s.p.).

Ahora la combustión y la calcinación estaban comprendidas, era el oxígeno y no el flogisto lo que intervenía en el proceso. El calórico podía entenderse como una sustancia elástica que lograba disminuir la atracción entre las partículas, al difundirse en la materia y formar una serie de envolturas alrededor de ellas. Quedaba entonces encontrar cuál era esa sustancia que permitía los cambios de estado y que, hasta ese momento, debía entenderse como una sustancia que no aportaba peso al sistema.

En la formación de sales estaba el último bastión de la teoría de la combustión. Los defensores de la teoría del flogisto querían una respuesta sobre la liberación del gas *pingüe*, cuando se hacían reaccionar ácidos con metales y el por qué no se liberaba cuando reaccionaban con *calces* (óxidos).



Su argumentación era como se sigue: recordemos que partiendo de un metal puro, rico en flogisto, al contacto con un ácido, se originaba una sal y un gas; al ser la sal pobre en flogisto, aquel gas liberado fácilmente podía ser entendido como el flogisto liberado. Además, al poner en contacto un *calx* con el *gas pingüe*, se obtenía el metal puro, rico en flogisto. Estas evidencias reforzaban el argumento de que el flogisto debería ser ese mismo gas inflamable de Cavendish. Actualmente, llamamos reacción de reducción a la que sucede al exponer los óxidos metálicos al hidrógeno, obteniéndose metales puros. Entonces, al dotar de flogisto al *calx*, como anteriormente se había explicado, se obtenía el metal puro y era el hidrógeno la respuesta definitiva a la existencia de la sustancia denominada flogisto.

Fue el mismo Cavendish quien resolvió el problema y, sucesivamente, en comunicación con Lavoisier, fue este último quien derrumbó la única alternativa posible que tenían los defensores del flogisto, para argumentar su existencia, al corroborar que en la reacción entre un *calx* y un ácido se obtenía, correctamente, como lo predecían los defensores del flogisto, el metal puro, pero, además se formaba como producto secundario; **agua**. Mientras que, en la reacción directa del metal con el ácido, al no haber presencia de oxígeno, el hidrógeno que podría combinarse con él para formar agua, se desprendía puro en la reacción. Gracias a la medición de la densidad del líquido, que se condensaba como gotas de rocío en las paredes del recipiente, a la demostración de que su valor era idéntico al del agua pura y a la realización de evapo-

raciones para comprobar que no se generaban residuos sólidos, quedó claro que el hidrógeno y el oxígeno eran los componentes constitutivos del agua y, por lo tanto, elementos puros.

Aunque Cavendish continuó defendiendo la teoría del flogisto, argumentó que el agua era aire desflogisticado, para Lavoisier estaba claro que el flogisto podía mantenerse en una explicación del calórico, esto es, aceptaba la idea de que su naturaleza era inmaterial; pero para comprender la combustión, el flogisto debía rechazarse, esto es, negaba su naturaleza material. Lavoisier realizó un experimento que marcó el fin de la especulación científica de la combustión, en compañía de Pierre Simon Laplace. En el experimento se ponían en contacto agua y hierro fundido y se obtenía hidrógeno gaseoso; se demostraba, entonces, que no se necesitaba partir de la reacción de un *calx* y un ácido, para obtener el flogisto, que este no era necesariamente aquella sustancia que se liberaba cuando entraban en contacto un *calx* y un ácido, sino que era una sustancia, que componía la naturaleza química del agua —en un diez y seisavo del peso de la composición total—, según sabemos hoy. A partir de entonces, el hidrógeno y el oxígeno fueron considerados elementos puros y nada podría refutar esta ley, todo lo que se vendría estaría ligado a la nueva concepción de elemento, y la química se tornaría demostrativa: Nació la química moderna.

Por último, vamos a dar una explicación de uno de los puntos que causó parálisis en el intento por explicar al aire, como compuesto formado principalmente de dos



elementos: la posibilidad de que la pólvora ardiera en el vacío boyleriano. Cuando se comenzó a notar que parte del aire era consumido para permitir que la llama existiera o ardiera un material, la teoría del flogisto declinaba en sus argumentos como anteriormente se expuso, pero en cuanto a la pólvora, ¿cómo explicar que podía arder sin necesidad de ese aire desflogisticado? Aquí la teoría del flogisto podría sostener que la pólvora era un material altamente rico en flogisto y al carecer de aire el ambiente, la pólvora entregaba flogisto al vacío y permitía arder por más tiempo, que lo que podía durar una vela confinada en presencia de aire. Este argumento tenía que negar la necesidad del aire común como vehículo para que migrase y, realmente, tuvo que pasar algún tiempo para comprender el proceso de combustión, de manera que no quedara coja cualquier explicación. Dilucidar el dilema de la pólvora como combustible que arde, incluso, en el vacío, necesitaba el logro de Lavoisier; el descubrimiento del oxígeno como elemento que se consume en la combustión. Al ser la pólvora, por tradición alquímica, una mezcla de seis partes de salitre (nitrato de sodio o nitrato de potasio), una parte de carbón de leña y una parte de azufre, es posible mantener la combustión en ausencia de oxígeno (aire desflogisticado), debido a que este se libera a medida que ocurre la combustión. Al arder la pólvora se liberan gases de combustión y calor, no como se pensaba, que era un compuesto que explotaba, sino que confinada, esta liberación de energía y gases ocasionan una alta presión, manifestándose una explosión por causas físicas. El principio químico de combustión de la pólvora es una rápida

oxidación del carbón y el azufre, que forma óxidos gaseosos como dióxido de carbono, monóxido de carbono, nitrógeno, sulfitos y residuos sólidos, tales como carbonato y sulfato de potasio o sodio (dependiendo del tipo de nitrato utilizado). La mezcla, generalmente, se recubre de grafito (al ser conductor de la electricidad, disminuye la ignición espontánea por la electricidad estática, generada en el graneado de los componentes) y se humedece para regular la velocidad de ignición, por esta razón, es posible mantener la combustión, prolongándola en el vacío boyleriano.

La comprensión del proceso de combustión como un proceso en el cual el oxígeno reacciona para formar componentes mediante la ganancia de electrones, debió tener como fundamento la superación de la concepción del aire como un elemento, lograr descomponerlo en sus *aires* fundamentales, establecer la presencia de una de las partes implicadas en el proceso de combustión, evidenciar que se consume dicha parte, entender que es indispensable en los procesos vitales de la respiración humana y que es producto de la interacción de las plantas con el medio ambiente. El oxígeno, al ser aislado y diferenciado de los demás *aires*, que se podían obtener en los procesos de transformación, permitió comprender que la materia está conformada por átomos y, de esta forma, debió comenzarse una revolución sin precedentes en la comprensión del mundo y el universo, que más tarde se alinearán en las búsquedas de toda la ciencia: la física, la química, la biología, entre otras, trabajarán conjuntamente, porque se necesitan unas de las otras. El mundo comenzó a utili-



zar anteojos de toda gama de amplitud y se adentró en los confines de la materia invisible y el cosmos, que permite entendernos como *un átomo de materia en un vasto océano sin límites; somos el universo para un átomo, pero somos un átomo para nuestro universo.*



Siglos XVII - XX: la termodinámica

El origen de la termodinámica

A partir de la Lectura del artículo *Evolución histórica del concepto de entropía y sus implicaciones en la enseñanza*, tomado del libro *Historia y filosofía de la química* (Padilla, 2010, s.p.), se presenta una reflexión sobre la evolución del concepto de entropía, desde el nacimiento de las primeras ideas que dieron origen a la termodinámica. De esta forma, se busca aclarar la importancia que tienen algunos conceptos en la enseñanza de la química y cómo han sido tomados y transmitidos en la enseñanza, al mostrar la carencia que tiene su divulgación, desde el contexto histórico.

La enseñanza de la entropía podría constituirse en un pilar fundamental en la formación de un ingeniero químico; sin embargo, la profundización en este tema se ha relegado a la formación de un físico y se olvida la gama de aplicaciones que tiene en los procesos químicos. Generalmente, se en-

foca en sistemas gaseosos y apunta más a una concepción física de la materia, que química. Cabe hacerse la pregunta, ¿tiene alguna importancia el concepto de entropía en la aprehensión de los conceptos químicos? Para responder esta cuestión, no cabe más que recurrir al desarrollo histórico del nacimiento de la termodinámica, rama de la física que se ha considerado como el estudio de los vínculos del calor y las distintas formas de energía.

Mucho antes de establecerse los conceptos de energía y calor, se desarrolló una idea que comprendía la energía como materia: el calórico. Las primeras observaciones científicas sobre las distintas formas del calor fueron realizadas por Francis Bacon (1561-1626) en 1620, quien en su artículo *Novum organum*, mencionaba que el calor existía en una variedad de formas; desde los rayos del sol, hasta los seres animados. El concepto de temperatura emergió mucho después de que se estableció la idea de la existencia de una materia, que podía percibirse mediante el tacto y que ocasionaba cambios en el estado de agregación.

No fue hasta que Galileo Galilei (1564-1642) inventó el primer termómetro (un tubo de vidrio con una mezcla de agua-etanol), que se empezaron a medir los "cambios de calor" a través de los cambios de temperatura. El interés por conocer la naturaleza del calor se hizo cada vez mayor, después de la invención del termómetro, pero, fueron los trabajos del físico y químico británico Joseph Black (1728-1799), los que abrieron el camino para entender cómo influía el calor en los materiales. Fue

este mismo personaje quien estableció las bases de lo que se conocería más adelante como la *ley cero de la termodinámica*:

Incluso sin la ayuda de los termómetros, podemos percibir una tendencia del calor a difundirse por sí mismo, de un cuerpo caliente a uno frío que se encuentre cerca, hasta que es distribuido entre ellos, de forma tal que ninguno de ellos está dispuesto a aceptar más calor del otro. El calor alcanza un estado de equilibrio. Este equilibrio de alguna manera es curioso. Encontramos que cuando todas las acciones mutuas han terminado, un termómetro, aplicado a cualquiera de los cuerpos, adquiere el mismo grado de expansión: por lo tanto, la temperatura de ambos cuerpos es la misma, y el equilibrio es universal (...). Debemos entonces adoptar, como una de las muchas leyes generales de calor, que, **Todos los cuerpos se comunican libremente unos con los otros, siempre y cuando no estén expuestos a la desigualdad de una acción externa, adquieren la misma temperatura, como es indicado por el termómetro.** Todo adquiere la misma temperatura del medio que lo rodea (Padilla, 2010, s.p.).

Los avances de Black permitieron distinguir dos conceptos, que hasta entonces permanecían juntos: el calor y la temperatura. Black estableció las bases para la posterior definición de "calor sensible" y "calor latente". Al experimentar cómo una sustancia podía absorber una cantidad considerable de calor antes de cambiar de estado, evidenció que en el proceso la temperatura permanecía constante hasta



que se daba el cambio de estado. Aunque los aportes de Black al conocimiento de la naturaleza del calor impulsaron el surgimiento de la termodinámica, todo lo realizó al considerar que el calor era algo material que podía pasar de un cuerpo a otro, ideas heredadas de la teoría del flogisto.

Antoine Laurent De Lavoisier (1743-1794), científico francés considerado el padre de la química moderna, recogió las ideas que se habían trabajado sobre el calor y estableció sus causas, al decir que existía una materia o fluido denominado "materia de fuego, del calor y de la luz" (Padilla, 2010, s.p.) y que forma parte de nuestra atmósfera y de todos los cuerpos:

Dentro de esta memoria supondré, y también haré la misma suposición en las dos memorias siguientes, que el planeta que habitamos está completamente rodeado por un fluido realmente sutil, el cual penetra sin excepción a todos los cuerpos que lo componen; este fluido, al que llamaré fluido ígneo, materia de fuego, del calor y de la luz, tiende a entrar con facilidad en equilibrio; por lo que el fluido existe algunas veces en un estado de libertad y otras bajo una forma fija en combinación con los cuerpos (Joseph Black) (Padilla, 2010, s.p.).

La terminología que Lavoisier dio al calor se debió a su interés por evitar emplear el término flogisto, que estaba presente en las explicaciones de los procesos de la combustión: se había postulado como una sustancia, considerada en principio elemental, encargada de transmitirse de un cuerpo a otro, desde una mayor concentra-

ción a una menor concentración. Cuando se aclaró que era el oxígeno la causa de los procesos de calcinación y combustión; aún aquellos fenómenos que solo implicaban cambio en el estado de agregación de las sustancias, continuaron siendo sustentados desde la naturaleza dual del flogisto.

En su *Tratado elemental de química (Traité élémentaire de chimie, 1864)*, Lavoisier dijo que se debía marcar la diferencia entre la causa (el fluido de ignición o materia de calor) y el efecto (el calor) y que debían ser nombrados de forma distinta; así pues, comenta que, junto con M. de Morveau, C. L. Berthollet y M. de Fourcroy, denominaron a la materia del calor como "calórico" (Padilla, 2010, s.p.). La concepción de la materia como un conjunto de átomos y moléculas comenzó a tomar vigor con Lavoisier, como se expuso en el capítulo: *El estudio de los gases y la superación de la teoría del flogisto*; al entender las interacciones entre las partículas desde la relación calórico-átomos: Las fuerzas de atracción se debían a la afinidad química, mientras que las fuerzas de repulsión tendrían su origen en el calórico. Así, las moléculas de un sólido presentarían una fuerza de atracción entre sí, mayor que las de los líquidos y los gases, al contener menor calórico en sus átomos.

La palabra "elástico" se atribuía a las sustancias que poseían una fuerza repulsiva, es decir, aquellas que presentaban una cantidad de calórico suficiente para incrementar las distancias entre sus átomos. Esta teoría permitía entender que una sustancia como la madera, que liberaba altas cantidades de flogisto o calórico, al arder, pudiera volver



elástica el agua líquida, incluso el hielo, llevándolos al estado gaseoso.

“Nosotros hemos observado que las moléculas de todos los cuerpos en la naturaleza se encuentran en un estado de equilibrio entre la atracción que tiende a acercarlas y a reunir las, y los esfuerzos del calórico que tiende a apartarlas (Lavoisier)” (Padilla, 2010, s.p.).

El calórico era una sustancia elástica porque tendía a separar las moléculas de los materiales en los cuales fluía y al salir de los materiales en los que se encontraba presente, ocasionaba la pérdida de masa del material.

La idea de calórico como un fluido material continuó por mucho tiempo, imponiéndose en la comunidad científica química. Encontramos comentarios como el hecho por Dalton (1766-1844) en su *New system of chemical philosophy (Nuevo sistema de filosofía química, 1808)*, en donde hablaba que el calórico era un fluido elástico de gran sutileza, que se caracterizaba porque sus moléculas se repelían entre sí, pero que eran atraídas por todos los cuerpos (Padilla, 2010, s.p.). El calórico empezó a ser considerado la causa de que las moléculas disminuyeran sus fuerzas de atracción y comenzasen a separarse. El surgimiento de la fisicoquímica, de la mano de los desarrollos de la teoría atómica, apuntaba a develar la materialidad o inmaterialidad del calórico.

Humphry Davy (1778-1829) sostenía, a diferencia del propio Lavoisier, que la naturaleza del calórico era inmaterial, debido a que:

Calor es el poder que previene el actual contacto de las partículas de los cuerpos; y la causa de las sensaciones peculiares de calor y frío podrían ser definidas como un movimiento característico, una probable vibración de las partículas de los cuerpos que tienden a separarse de ellos. Esto podría ser llamado movimiento repulsivo (Padilla, 2010, s.p.).

Lavoisier y su colaborador, Pierre Simon Laplace (1780) en *Mémoire sur la chaleur (Memoria sobre el calor)*, establecieron que el calórico podría ser la causa del movimiento de las partículas, al llamar al calor la *forcé vive* (fuerza viva), que surgía de los movimientos de las partículas (Padilla, 2010, s.p.).

El concepto de calórico permitió entender el funcionamiento de la máquina de vapor. Sadi Carnot (1796-1832), al trabajar con máquinas que permitían la liberación y movimiento del calórico, se atrevió a predecir una revolución científica basada en el poder de estos aparatos. El calórico en movimiento producía movimiento físico (lo que denominaríamos ahora como trabajo).

Carnot planteó que el calórico tendía a buscar el equilibrio en la máquina, al ser el vapor un medio por el cual, se transportaba el calórico de un cuerpo caliente a uno frío, sin existir consumo de calórico, sino intercambiándose entre los cuerpos: para que el proceso funcionara era fundamental que hubiera un cuerpo caliente y otro frío; el primero sería una fuente de calórico y el segundo lo recibiría (Padilla, 2010, s.p.). Las ideas de Black sobre la tendencia del calórico a alcanzar el equilibrio fueron ex-



puestas por Carnot, al decir que, mientras existiera una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos en contacto, siempre *el cuerpo caliente cedería el calórico al cuerpo frío, hasta alcanzar un equilibrio* (Padilla, 2010, s.p.). Sin embargo, durante sus experimentos, Carnot encontró que otros factores influían: los cambios de presión y de volumen y los cambios de temperatura, de modo que los primeros podían ser causados por los segundos y viceversa. Carnot describió un proceso ideal, donde se evidenciarían cambios físicos (de presión y volumen) a temperatura constante y donde el calórico permanecería constante:

- Carnot propuso un recipiente cilíndrico que contenía aire encerrado por un émbolo (el aire estaría contenido en el espacio *abcd* de la Figura 2), pero cuya

pared podía hacerse permeable al calórico. Además, propuso dos cuerpos: uno al que denominó A, que tendría una temperatura mayor que otro, al que denominó B.

- Si se ponía en contacto el cuerpo A con el sistema, entonces el aire alcanzaría la misma temperatura que A y se expandiría (el émbolo se movería de *cd* a *ef*). Se asumía que el cuerpo A proporcionaba el calórico necesario para mantener la temperatura constante durante la expansión (este tipo de expansión se denomina expansión isotérmica).
- Se quitaba el cuerpo A y se aislaba el recipiente; el cilindro ya no estaría en contacto con un cuerpo que le proporcionara calórico; sin embargo, el aire seguiría su proceso de expansión, al moverse el émbolo de *ef* a *gh* y esto haría que la

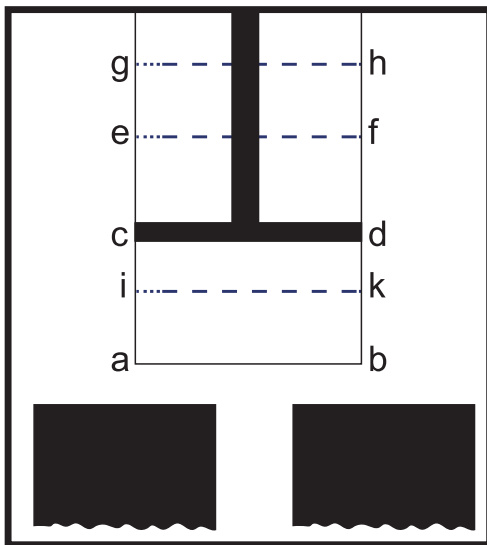


Figura 1. Representación de los diferentes componentes del proceso de Carnot.

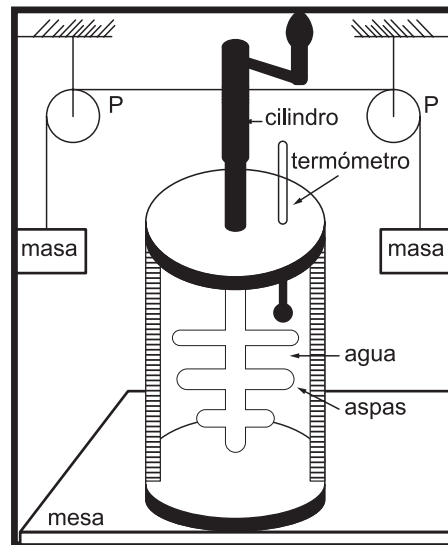


Figura 2. Aparato desarrollado por Joule.



temperatura disminuyera (esta expansión, sin que salga ni entre calórico, se denomina expansión adiabática).

- El sistema se ponía en contacto con el cuerpo B y el aire se comprimiría, a temperatura constante, hasta que el émbolo regresara a su posición original (*cd*), cediéndole calórico al cuerpo B (en un proceso de compresión isotérmica).
- Se removía el cuerpo B y se aislaba el recipiente; el aire continuaría comprimiéndose, hasta que el émbolo llegaría a *ik*, lo que haría que la temperatura del aire aumentara y justo alcanzaría la temperatura del cuerpo A (sería una compresión adiabática, sin intercambio de flogisto).

La idea de un ciclo perpetuo nació a partir de imaginar una continuación sucesiva del proceso anterior. Con el tiempo, el mismo Carnot se dio cuenta de la imposibilidad de obtener una máquina perfecta de movimiento perpetuo.

Sadi Carnot dejó como legado dos principios fundamentales que tuvieron repercusión en todos los avances que se continuaron desarrollando: 1) El movimiento perpetuo es imposible y 2) El calor se conserva. La idea de que el calor se conservaba, implicaba que todo cuerpo que hubiera sufrido un cambio en su calórico, retornaría a su condición inicial y retornaba a un estado de igual cantidad de calórico, que la que tenía inicialmente. Al igual que Lavoisier, Carnot atribuyó la causa del movimiento al calórico.

Émile Clapeyron (1799-1864) fue un ingeniero y físico francés que retomó las inves-

tigaciones sobre el poder del movimiento por medio del calórico. Clapeyron afirmaba que Carnot basaba la posibilidad de crear movimiento o calor a partir de la nada (Padilla, 2010, s.p.). Debido a la ausencia de fundamentos matemáticos en los experimentos de Carnot, Clapeyron consideró que se podría llegar a una ley más general, si se trabajaban sus postulados desde un punto de vista matemático. Así pues, aplicó las leyes de los gases conocidas hasta el momento (ley combinada), desarrolló una teoría donde las variaciones de presión, temperatura y volumen eran mínimas a partir de los procesos. Clapeyron, al igual que Carnot, no consideró la posibilidad de producir calor a partir del concepto físico de trabajo, que aún no se conocía; para ellos, los cambios de presión y volumen estaban directamente relacionados meramente con el calor.

James Joule (1818-1889), físico británico, quien en su infancia fue alumno de Dalton, se interesó por el calor y el poder mecánico de los fluidos elásticos. Joule encontró que era posible producir calor a partir de trabajo, al ser la fricción y el movimiento, su causa. Al buscar entender cómo variaba la temperatura de los cuerpos, cuando se les aplicaba un esfuerzo externo, desarrolló un experimento con palas concéntricas en un recipiente de agua, al obtener calor por medio de movimiento. Lo interesante de este experimento fue que no se necesitaba que el cuerpo estuviera en un estado de agregación elástico, porque en cualquier forma, ocurría lo mismo.

Los resultados de Joule se pueden resumir de la siguiente manera (Padilla, 2010, s.p.):



- La cantidad de calor producido por la fricción de los cuerpos, sean sólidos o líquidos, es siempre proporcional a la cantidad de fuerza ejercida (Joule, 1849, citado en Padilla, 2010, s.p.).
- La cantidad de calor necesaria para lograr que una onza de agua incremente su temperatura 1º Fahrenheit, se obtiene aplicando al agua, por medio de un sistema de poleas, que mueven unas aspas que agitan el agua, el trabajo que realiza un peso de 772 lb al caer una distancia de 1 pie (Joule, 1849, citado en Padilla, 2010, s.p.).

Este último resultado, correspondiente a la cantidad de energía necesaria para lograr elevar apreciablemente la temperatura de un volumen pequeño de agua, corresponde al concepto de equivalente mecánico del calor, el que posteriormente permitió entender muchas de las reacciones químicas. La segunda conclusión de Joule implicó la comprensión del calor, ya no como una sustancia, sino como un efecto del movimiento de las partículas de un cuerpo y abrió el estudio del calor como energía. Sus aportes, conjuntamente con los trabajos de Julius Mayer (1842) y los de Hermann Von Helmholtz (1853), llevaron a formular la primera ley de la termodinámica. Los estudios del calor siempre estuvieron asociados a la relación entre el movimiento y la fuerza como un fenómeno de causa y efecto. La fuerza tiene como consecuencia el trabajo, este último puede ser positivo o negativo, pues depende de si es realizado por las fuerzas moleculares o por fuerzas externas. Es interesante hacer notar, que en todo momento se hablaba del calor como algo que estaría en las sustan-

cias y que sería generado, principalmente, por su movimiento interno.

La teoría del poder mecánico de Carnot, permitió establecer una escala absoluta de temperatura, desarrollada por William Thomson y James Joule, la cual es conocida como escala Kelvin.

Rudolf Clausius (1822-1888) fue un físico alemán, cuyo trabajo consistió en teorizar matemáticamente los dos principios de la termodinámica, al permitir entender mejor el trabajo de Carnot. Entre sus postulados se encuentra un rechazo al "calor total de los cuerpos", como había propuesto Clapeyron, además, estableció que no existía una conservación de la energía como la había propuesto Carnot, sino, que, de alguna forma, debía existir una pérdida o una ganancia:

"En todos los casos en donde se produce trabajo a través de calor, una cantidad determinada de calor es consumida y esta es proporcional al trabajo realizado" (Clausius, 1850, p. 112, citado en Padilla, 2010, s.p.).

Los cambios de presión o volumen del sistema determinarían el trabajo producido o recibido por el mismo, al ser el trabajo externo positivo y el interno negativo. Algo que permaneció en las tres propuestas (Carnot, Clapeyron y Clausius) fue la idea de que el calor solo podía ser transmitido de un cuerpo caliente a uno frío y no viceversa (Padilla, 2010, s.p.). La principal diferencia entre estos tres personajes es que Clausius se basó en los trabajos de Joule y sostuvo la posibilidad de obtener calor a partir de trabajo.



El concepto de energía interna de los cuerpos se derivó de los postulados de Clausius, al establecer que el calor no era función de la temperatura ni del volumen (mientras que el trabajo sí lo era) y formular una primera ecuación, donde se introdujo esta variable.

El principio de equivalencia entre el calor y el trabajo fue formulado por Clausius de la siguiente forma: "El trabajo dado se transforma en calor y recíprocamente el calor dado se transforma en trabajo; la cantidad de uno será siempre proporcional a la del otro" (Clausius, 1854, citado en Padilla, 2010, s.p.). A partir de este postulado, al hablarse del calor (Q) de un cuerpo, podrían distinguirse tres situaciones: la cantidad de calor que existe en el cuerpo; el calor ganado por el trabajo interno (al realizarse un trabajo sobre el cuerpo); y el calor consumido por el trabajo externo (cuando el cuerpo es quien realiza el trabajo sobre otro) (Padilla, 2010, s.p.). Se introdujo la idea de estado inicial y final del sistema estudiado, en atención al valor de las variables físicas que lo caractericen (como presión, temperatura, entre otros); estos conceptos se usaron para conocer el valor del trabajo suministrado o recibido por el sistema, entendiéndose que la energía interna no dependería de estos estados. De esta forma entonces, para poder conocer el calor consumido por el trabajo externo, debería conocerse todo el proceso que sufre el cuerpo con sus modificaciones. Clausius concluyó sus teorías mediante una ecuación que se conocería como el principio de la conservación de la energía: $Q = U + W$, donde Q es el calor total, U es la función desconocida (que, posteriormente,

será conocida como la energía interna y que es mencionada por Lavoisier, como el calórico que es contenido en los cuerpos) y W es el trabajo externo (Padilla, 2010, s.p.).

Clausius permitió pensar en la posibilidad de transferir calor de un cuerpo frío a uno caliente, siempre y cuando, existiera una modificación en el cuerpo caliente, es decir, que debería existir una compensación de la energía en el sistema.

Clausius (1865), en trabajos posteriores, empezó a reconocer a U como la energía de los cuerpos (como la denominó Joule) y aclaró que las cantidades de calor que se retiraban de un cuerpo durante un proceso reversible, eran diferentes a las de un proceso irreversible (Padilla, 2010, s.p.). Además de formular el principio de conservación de la energía, formuló el segundo principio de la termodinámica: *el contenido de transformación de los cuerpos*, el cual representó por S y que denominó *entropía*, cuyo significado es *transformación* (Padilla, 2010, s.p.).

La formalización matemática del segundo principio por Clausius se puede expresar así:

$$\int dQ = S/T - S_0$$

Donde S_0 es el valor de *entropía* para el estado inicial del sistema. Para Clausius, el concepto de entropía estaba ligado al arreglo o distribución de las moléculas y la disgregación de las mismas:

"La disgregación es el valor de transformación del arreglo actual de las partículas de los cuerpos" (Clausius, 1865, citado en Padilla, 2010, s.p.).



Esta idea de disgregación o desorden está bastante difundida, como una de las concepciones más comunes que se tiene en la actualidad, sobre lo que es la *entropía*.

Clausius arrojó dos conclusiones sobre sus teorías, al fundamentar leyes universales: La *entropía* del universo tiende hacia un máximo y la energía del universo es constante.

Para finalizar: el concepto de entropía en la educación

Comenzar a tratar la materia como un conjunto de pequeñas partículas, permitió desarrollar posteriormente la teoría atómica y obtener grandes avances en la física. El planteamiento de que la materia estaba formada por partículas que no podían dividirse más, no fue desarrollado paralelamente con el seguimiento de la termodinámica, ocurrió en los albores de la filosofía, en Grecia, bajo el pensamiento de Demócrito y Leucipo. Estos pensadores dieron el nombre de átomos a aquellas partículas, sin embargo, tuvieron que pasar muchos siglos hasta que se retomaran estos conceptos y se partiera de ellos, para sustentar las explicaciones a fenómenos físicos y químicos, como es el caso del calórico.

John Dalton (1766-1844), en su obra *A new system of chemical philosophy* (1808), fortaleció el concepto de átomo, concibiéndolo como una esfera. Los átomos de Dalton eran entidades que variaban de acuerdo al elemento, pero que mantenían un valor de masa igual para un mismo elemento. A mediados del siglo XIX, los físi-

cos empezaron a hablar del calor como un producto del movimiento de las partículas; incluso en los trabajos de Mayer, Joule y Helmholtz se hace una referencia clara a la energía generada por el movimiento: la energía cinética, (Padilla, 2010, s.p.).

El desarrollo del concepto de entropía surge en el momento donde estaba el estudio de los gases en vigor. Al entender la materia como partículas esféricas, podía modelarse el movimiento de los átomos, desde los principios de la mecánica. James Clerk Maxwell (1831-1879) y Ludwig Boltzmann (1844-1906) fueron científicos entregados al trabajo de la teoría cinética de los gases. Maxwell propuso que el segundo principio (segunda ley de la termodinámica) tenía un carácter estadístico. En su primera propuesta, consideró que los movimientos moleculares eran periódicos y remarcó que la temperatura podía ser pensada como el tiempo promedio de la energía cinética, mientras que el calor era el incremento promedio de la misma (Padilla, 2010, s.p.). Más adelante, Boltzmann mostró cómo la segunda ley estaba relacionada con la distribución estadística de las diferentes configuraciones moleculares y cómo el incremento de la *entropía* corresponde a la distribución aleatoria en el nivel molecular; concluyó que el incremento de la *entropía* era irreversible.

La nueva versión del segundo principio no fue del todo aceptada, sino hasta que Josiah Willard Gibbs (1839-1903) publicó unas memorias sobre *Los métodos gráficos de los fluidos termodinámicos*, en donde empezó a usar la *entropía* como una variable independiente, algo que nadie había



hecho hasta entonces (Padilla, 2010, s.p.). Gibbs desarrolló lo que se conoce como mecánica estadística, trabajos que le han dado el título del padre de la termodinámica química.

Después de dar un recorrido **rápido** por los diferentes pasos que tuvo el surgimiento de la termodinámica, hay que aclarar que hasta hoy, en la educación, el segundo principio ha estado ligado a la concepción de un sistema en desorden, de la imposibilidad de hacer reversible un proceso, pero se ha dejado de lado la gran importancia que tiene cuando se estudian las reacciones químicas. ¿Cómo podría saberse si dos o más sustancias reaccionan entre sí? La idea de espontaneidad en una reacción química está estrechamente relacionada con el concepto de *entropía* propuesto por Clausius. La determinación de la *entropía* no es sencilla de realizar, prácticamente, por esto se dificulta su comprensión y enseñanza en términos de espontaneidad en las reacciones químicas. La energía disponible para realizar un trabajo, puede permitir entender este concepto; si la energía libre decrece, la reacción es espontánea.

Debe notarse cómo el concepto de entropía se origina en el seno de la química, debido a que la definición del calórico se hacía en términos de materia, como flogisto y se entendía a partir de sus transformaciones. El segundo principio tuvo que pasar por los estudios de los físicos, para poder fundamentarse y formalizarse. Ahora, el legado de la ciencia ha permitido construir la termodinámica, al alinearla en una rama de la física y de la química (termodinámica química y termodinámica física), que ayuda a la comprensión de los procesos de transferencia de calor, de la evolución de los sistemas, de los cambios espontáneos en las reacciones químicas y de la conversión de calor en trabajo. El estudio del segundo principio entonces, debería tener una mayor importancia en la enseñanza de la ingeniería (en especial, de la Ingeniería Química) y no relegarlo a una definición matemática, que solo podrá ser abordada en su contexto y significado, por aquellos que opten por realizar estudios posteriores a su formación profesional.



Siglos XVII - XX: la teoría atómica

Las proporciones fijas y las proporciones múltiples

Lavoisier y su teoría de la combustión abrieron paso para que los investigadores y hombres de ciencia se tornasen rigurosos en sus trabajos y tomaran en cuenta la totalidad de las sustancias, que interactuaban para formar compuestos, y sin escatimar en cálculos, midieran los cambios de volumen, peso y de variables, como la temperatura y la presión, y lograr establecer un método científico, que comenzaría a atar las diferentes conclusiones experimentales, en un modelo fisicoquímico de la materia, entendible para todo lector y sin inconsistencias que obligaran a recurrir a explicaciones forzadas y abstractas, como ocurría en la explicación de la materia *anti-peso*, para explicar el flogisto.

El uso de la medida y la posibilidad de cuantificar los resultados obtenidos, permitieron descifrar la composición de las sus-



tancias y la forma como se originaban los diferentes compuestos. La demostración de la *ley de la conservación de la masa* y la *ley de la conservación de la energía* abrió el camino que conduciría a la química moderna. Aunque es pertinente aclarar que, actualmente, con el desarrollo de la física atómica, se sabe que la masa total en una reacción química sí puede variar, debido a que el calor cedido o absorbido durante la reacción, representa masa. Para efectos prácticos, esta cantidad de masa-energía es insignificante, incluso, no representaría ni una millonésima parte de un miligramo, aunque se trate de una reacción muy violenta (Selva, 2008, s.p.). Estos hechos solo representan importancia en términos de cálculos exactos para la física moderna.

Aunque la teoría del flogisto estaba superada y la química se tornó en una ciencia, con todo el carácter riguroso y experimental necesario para esto, quedaba por establecer, cuál sería el lenguaje bajo el cual comenzaría a estructurarse. La necesidad de estipular una manera para referirse a las diferentes sustancias, los procesos y los cambios químicos no escaparon a los intereses de Lavoisier. Este hombre, siempre entusiasta en la posibilidad de derrocar el lenguaje abstracto y simbólico de la alquimia, herencia de más de veinte siglos de tradición, de la mano de Louis Bernard Guyton de Morveau (1736-1816), Claude Louis Berthollet (1748-1822) y Antoine François de Fourcroy (1755-1809), desarrolló un sistema de nomenclatura, el cual dejó expresado en su libro *Traité élémentaire de chimie*, al sentar las bases de la nomenclatura actual.

La teoría del flogisto trajo consigo el derrocamiento del concepto de elemento aristotélico y abrió las puertas para la comprensión y aceptación del átomo. La *ley de la conservación de la masa* formulaba que los componentes últimos de la materia podían combinarse de múltiples formas, pero sin crearse nuevos elementos y sin destruirse los ya existentes: aquello que se formaba u obtenía, era producto de la relación entre los diferentes elementos, ahora el problema era definir de qué estaban compuestos dichos elementos.

La revolución química había surgido, gracias a la obra culmen que encabezó Lavoisier, la cual, al superar la teoría del flogisto, permitió entender que el aire no era un elemento químico, sino que intervenía en las reacciones químicas y estaba compuesto de sustancias más simples que él. De la misma forma, ocurría con el agua: se había demostrado que estaba compuesta de dos elementos diferentes y, por lo tanto, debían rechazarse las ideas aristotélicas sobre los elementos naturales (agua, fuego, aire y tierra), como constituyentes puros de toda la materia. También, gracias al estudio de los gases, con la revolución química se logró teorizar y comprender la naturaleza de los llamados *aires*; la causa de su elasticidad a partir de una interacción con el calórico o calor (Lavoisier usaba este término para no tener que recurrir a las explicaciones a partir del flogisto) y explicar que la expansión de los sólidos y los líquidos dependía igualmente del calórico y que dependiendo de la cantidad de calórico suministrado, podían transformarse en gases.



Además, con el trabajo de Lavoisier, se afirmó la necesidad de medir los cambios químicos a partir de instrumentos y aparatos de laboratorio, al entregar un legado invaluable a la química práctica y al ser *la conservación de la masa*, el principio que regiría todos los experimentos. Por otro lado, la teoría ácido-alcalina que se explicaba a partir de la reacción del oxígeno con un metal o un no metal, que formaba respectivamente una base o un ácido, permitía evidenciar en las reacciones de neutralización la liberación de los gases, al fortalecer el concepto de elemento y la teoría de la combustión (Brock, 1998, s.p.).

Los químicos empezaron a estructurar una matriz de clasificación para las sustancias conocidas, las primeras tablas de los elementos empezaban a aparecer, pero los patrones de clasificación dependían del autor. Lavoisier construyó una tabla de elementos a partir de los diecisiete metales conocidos hasta entonces, los seis no metales, los elementos gaseosos aislados e incluyó el calórico (hasta aquí no se había logrado entender su naturaleza material o inmaterial) (ver Tabla 6). El intento que realizó Lavoisier por clasificar los elementos químicos tuvo un valor práctico enorme, para que más adelante

Tabla 6. Tabla de elementos según Lavoisier.

Metales	No metales	Gases	Otros
antimonio	azufre	ázo (nitrógeno)	calórico
bismuto	fósforo	aire fijo (hidrógeno)	
cobre	carbono	oxígeno	
hierro	radical muriático (cloro)		
manganeso	radical fluórico (flúor)		
níquel	radical borácico (boro)		
plata			
plomo			
arsénico			
cobalto			
estaño			
mercurio			
molibdeno			
oro			
platino			
tungsteno			
zinc			



Dmitri Mendeléiev (1834-1907) construyó la tabla periódica de los elementos que actualmente tenemos. La tabla de elementos de Lavoisier contenía las propiedades genéricas de las sustancias que consideraba como elementos. Para definir qué era un elemento y qué no, Lavoisier se basó en la propiedad de poder ser un principio formador, es decir, que a partir del elemento se lograran formar sustancias más complejas; de esta forma, se tenía que el oxígeno era un elemento porque formaba ácidos, el calórico era el principio formador de la expansibilidad de la materia, el nitrógeno de la alcalinidad, el hidrógeno del agua y los metales y los no metales, principios formadores necesarios para formar ácidos y bases (Brock, 1998, s.p.).

Aún no surgiría la rama de la química, hoy llamada química orgánica, que partió de considerar al nitrógeno, el oxígeno, el hidrógeno y el carbono como elementos universales y de encontrar que estaban vinculados con la materia animal y vegetal.

En 1869, Mendeléiev, basándose en la teoría de los tipos de Gerhardt y Hofmann, clasificó en una lista extensa los elementos químicos. Y siguiendo los preceptos de Lavoisier, debía conocer las propiedades genéricas de cada elemento, para consolidar una clasificación de indiscutible credibilidad (Brock, 1998, s.p.).

Joseph Louis Proust (1754-1826), farmacéutico y químico francés, por medio de sus propios experimentos, encontró que los elementos se combinaban de tal forma, que siempre lo hacían en la misma proporción,

cuando formaban un mismo compuesto. Esta evidencia permitió concluir que no puede existir diferencia alguna, en ninguna parte del mundo, en un mismo compuesto, es decir, el agua estaba formada en las mismas proporciones de sus elementos, ya fuera en China o en el Polo Sur y debía ocurrir igual con cualquier otra sustancia material. Las diferentes formas en las que podía encontrarse cualquier compuesto, ya fuera en su estado líquido, sólido o gaseoso, solo hacía referencia al *estado de agregación*, pero su naturaleza química permanecía invariable (Selva, 2008, s.p.).

Los experimentos llevados a cabo con la rigurosidad planteada por Lavoisier, lograron medir los cambios de peso en las sustancias participantes, permitieron que Proust estableciera una ley que sería conocida como *la ley de las proporciones fijas*, la cual puede escribirse de la siguiente manera: *Un compuesto, con una única naturaleza química, está conformado por elementos combinados en una proporción en masa fija*. Esta proporción se puede expresar como un cociente de números enteros.

Existen múltiples experimentos que permiten demostrar esta ley, podemos citar cualquiera de ellos, pero tomaremos la formación del agua y aclararemos que en la época en que Proust formuló su ley, aún no se conocía la composición química de este compuesto y que tomó tiempo descubrirla, mientras se afianzaba la existencia de los átomos. Intentaremos ejemplificar lo que un aprendiz fácilmente puede verificar si realiza un proceso de electrolisis sencillo.



Si se toma una muestra de 10 gramos de agua, y se le realiza un proceso de electrólisis, este compuesto se separa en sus elementos: hidrógeno y oxígeno, ambos se producen en estado gaseoso. Se encuentra que el hidrógeno producido corresponde al 11,19 % de la composición (1,119 gramos), mientras que el oxígeno al 88,81 % (8,881 gramos), ocupando el hidrógeno un volumen dos veces mayor que el que ocupa el oxígeno. Si se dividen los pesos del hidrógeno y el oxígeno ($\frac{m_{\text{hidrógeno}}}{m_{\text{oxígeno}}}$), se encuentra que la relación es igual a $\frac{1}{8}$, indicando que el agua está compuesta, en masa, por ocho veces más oxígeno que hidrógeno.

Si se realiza un experimento en la vía contraria, al obtener algún compuesto a partir de sus elementos constitutivos, se llega a una conclusión semejante: por ejemplo, si se obtiene sulfuro de plomo a partir de azufre y plomo y se logra pesar el compuesto obtenido, al discriminar los residuos de los elementos, se puede comprobar que el cociente entre los pesos de azufre y de plomo que se fijan en el compuesto, mantiene una relación de números enteros.

La *ley de las proporciones fijas* o ley de Proust permitió comprender la diferencia entre un compuesto, una mezcla y un elemento. Las mezclas poseen composiciones variables, como ocurre en la fabricación de aleaciones, pero un compuesto solo puede formarse bajo proporciones definidas entre sus elementos constituyentes. La *ley de la conservación de la masa* de Lavoisier, reforzada con la *ley de Proust*, le permitió a John Dalton (1766-1844), maestro de escuela primaria, naturalista y químico inglés, formular el primer modelo atómico

para explicar la naturaleza química de la materia. Al partir de las ideas griegas del atomismo, Dalton afirmaba que la materia no era divisible totalmente, que debería existir un límite material indivisible, al cual le dio el mismo nombre que algún día pronunció Demócrito: el átomo.

Aunque el atomismo sostenía que los átomos eran un tipo de corpúsculos, Dalton planteaba que los átomos eran esferas rígidas rodeadas de una envoltura de *calórico* (recuérdese que, para la teoría del flogisto, el calórico era una sustancia repulsiva) y que diferían entre sí por su tamaño, al ser el diámetro de las partículas la causa de que algunas sustancias ocuparan más espacio que otras y, por lo tanto, existieran en estado líquido o sólido. Como se observa, el concepto de importancia para Dalton, para diferenciar a los átomos, era el tamaño. Más adelante se verá que, en la búsqueda del tamaño (o el volumen) de los átomos, Dalton se tuvo que ocupar del peso de tales átomos, influyendo en la determinación de los pesos atómicos.

Cuando Dalton expuso su teoría, comenzó definiendo que los elementos eran sustancias que tenían todos sus átomos iguales, en peso y tamaño, por lo que no podían existir dos elementos con el mismo tipo de átomos. Y siguiendo los argumentos de Dalton, un elemento químico se debería clasificar de acuerdo a sus átomos, únicos e iguales y, por lo tanto, la transmutación soñada por los alquimistas debería ser imposible, porque esto implicaría que los átomos de un elemento se transformasen en los de otro elemento y se estaría violando su indivisibilidad y su naturale-



za química. Los compuestos deberían ser combinaciones de los distintos elementos, como si se armaran y desarmaran piezas; esta idea estaba sostenida a partir de la *ley de la conservación de la masa*, que ya era una realidad indiscutible. Para identificar un tipo de compuesto, se debería conocer qué tipo de átomos lo componían y en qué proporciones, debido a que la organización de aquellos átomos, que denominó moléculas, siempre debería ser igual en un mismo compuesto.

Dalton tuvo que recurrir a la teoría del flogisto para argumentar la causa que mantiene unidos los átomos y las moléculas. Se basó en la existencia de calórico rodeando a los átomos, para explicar que la cantidad de calórico presente les otorgaba diámetros específicos; dada la naturaleza repulsiva del calórico, los átomos se mantenían alejados a una distancia acorde al estado de agregación en el que se encontrase la materia (las distancias cortas separarían las moléculas o átomos del estado sólido, las distancias medias separarían las moléculas del estado líquido y las distancias mayores, las del estado gaseoso).

El calórico era una sustancia a la cual se le atribuía movimiento, capaz de atravesar paredes e, incluso, parecía no tener masa (como se explicó en la teoría del flogisto). La naturaleza elástica de la materia en estado gaseoso se explicaba con las grandes distancias que lograban separar sus partículas, debido al calórico presente en ellas, las fuerzas de repulsión entre las nubes de calórico ocasionarían el movimiento de las partículas y, por lo tanto, el efecto de la presión y la temperatura (esto será enten-

dido posteriormente, cuando se estudien los inicios de la termodinámica).

Para explicar el por qué se pueden formar los diferentes compuestos de la naturaleza, la teoría atómica de Dalton daría una explicación sencilla, que nadie, hasta entonces, había notado: si la materia estaba compuesta de partículas minúsculas, pero materiales, podría organizarse como un rompecabezas y las diferentes naturalezas químicas podrían surgir de esa interacción, al ser la cantidad y el tipo de átomos unidos, la causa de que ciertos compuestos presentasen determinada coloración, se comportasen específicamente en relación con otros, fuesen evaporables, solidificables, manipulables, brillantes, entre otros. Tan solo una proporción fija en peso (*ley de las proporciones fijas*), entre los átomos que componen la sustancia, otorgaría la naturaleza química única y original a cada compuesto en el universo.

Dalton tomó como punto de partida la ley de Proust y predijo que podría conocerse el peso de los átomos de un elemento (esto es, el peso de cada átomo de dicho elemento) de una manera sencilla y práctica, al partir de que una cantidad fija en peso suponía una cantidad fija en número de átomos. Pero habría que encontrar el peso relativo de cada átomo de cada elemento, para que las cantidades másicas se explicaran en términos de cantidades de átomos.

Las masas fijas que se combinan para formar los compuestos eran aportadas por una cantidad de átomos determinada. Al usar las proporciones entre estas masas,



era posible conocer el peso de los átomos, al suponer la proporción de los átomos en la molécula. Si la cantidad de átomos supuesta en una molécula no fuese la correcta, se podría calcular un peso falso para los átomos.

En este punto es conveniente expresar lo que los científicos del momento sabían, lo que desconocían y lo que deseaban conocer, al utilizar una fórmula matemática, como lo hizo el propio Dalton. Al asumir la existencia de un compuesto conformado por los elementos A y B, este compuesto podría descomponerse para medir las cantidades en masa de A y B producidas (estas masas, sin duda, cumplirían la ley de Proust). La relación entre estas masas podría indicarse como (masa A/masa B). Ahora bien, la masa del elemento A la aportaría el conjunto de los átomos presente de dicho elemento. De esta manera, al saber el número de los átomos de A presentes y el peso de cada átomo de A, podría calcularse la masa de dicho elemento. Lo mismo podría hacerse para el elemento B. A partir de estas consideraciones, se podía plantear la siguiente expresión:

$$\frac{\#átomos A}{\#átomos B} * \frac{masa \text{ átomo A}}{masa \text{ átomo B}} = \frac{masa A}{masa B}$$

Para la anterior expresión se tiene lo siguiente:

- El término (masa A) / (masa B) se podía medir experimentalmente.
- El término (masa átomo A) / (masa átomo B) era lo que se deseaba determinar. Nótese que no iba a ser posible determinar la masa "absoluta" de cada

átomo del elemento A y de cada átomo del elemento B, sino que se lograría determinar la relación de las masas de esos átomos. Esto implica que, posteriormente, los científicos tendrían que escoger a un elemento cualquiera, de entre los conocidos, como el elemento de referencia, respecto al cual se calcularían los pesos relativos de todos los demás elementos.

- El término (# átomos A) / (# átomos B) no se conocía.

Por ejemplo, tomemos la electrólisis del agua. Recordemos que la proporción másica entre los elementos que la componen es 1/8, es decir, en una cantidad dada de agua, por cada gramo de hidrógeno hay ocho gramos de oxígeno. El número de átomos de cada elemento por el peso unitario de cada átomo, debería corresponder a la cantidad de gramos del elemento producidos experimentalmente, así:

$$\frac{\#átomos \text{ hidrógeno}}{\#átomos \text{ oxígeno}} * \frac{\text{peso átomo hidrógeno}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{masa \text{ hidrógeno}}{masa \text{ oxígeno}} = \frac{1}{8}$$

Quedaba por establecer la cantidad de átomos de cada elemento en la molécula, la cual tenía que suponerse, pues, hasta el momento, no se conocía. Se podría suponer una determinada relación entre los átomos de hidrógeno y de oxígeno en cada molécula de agua, así: 1:1, 1:2, 2:1... Dalton propuso una relación 1:1, lo que indicaría que una molécula de agua podría expresarse con la fórmula H₁O₁ (o HO), tal vez, porque consideró más sencillo que un átomo de hidrógeno se juntara con otro átomo



de oxígeno. Hoy se conoce que la relación verdadera es 2:1. Recuérdese que antes de 1815, no se conocía otro compuesto entre el hidrógeno y el oxígeno que no fuera el agua. Fue, posteriormente, cuando los químicos descubrieron el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), un compuesto con los elementos hidrógeno y oxígeno en relación 2:2.

La suposición de Dalton respecto a la relación del número de átomos de hidrógeno y oxígeno en la molécula de agua, lo llevó a establecer relaciones erróneas entre las masas de los átomos. Esto revela lo importante que era tener certeza sobre la composición de los átomos de cada molécula, no era fiable simplemente suponerla. Según los cálculos de Dalton, la expresión anterior llevaría a la siguiente conclusión equivocada:

$$\frac{1 \text{ átomo hidrógeno}}{1 \text{ átomo oxígeno}} * \frac{\text{peso átomo hidrógeno}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{1}{8}$$

Despejando:

$$\frac{\text{peso átomo hidrógeno}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{1}{8}$$

Para Dalton, un átomo de oxígeno pesaría ocho veces más que un átomo de hidrógeno. Al continuar con esta metodología, se podría crear un sistema periódico con los diferentes pesos atómicos, basándose en el peso unitario del hidrógeno.

Por ejemplo, se conocía que la proporción de pesos entre el oxígeno y el hierro en la formación del óxido férrico (Fe_2O_3) era 7/3, es decir, por cada siete gramos de hierro se fijaban tres gramos de oxígeno. Aunque los

científicos hubieran supuesto la composición de átomos de oxígeno y hierro correcta en la molécula: 2:3 (lo cual sería muy difícil que hubiera ocurrido solo por azar), se obtendría para el hidrógeno y el oxígeno, que:

$$\frac{2 \text{ átomos hierro}}{3 \text{ átomos oxígeno}} * \frac{\text{peso átomo hierro}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{7}{3}$$

Despejando:

$$\frac{\text{peso átomo hierro}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{7}{2} = 3,5$$

El peso de los átomos de hierro sería 3,5 veces el peso de los átomos de oxígeno. Como habíamos visto, el peso de los átomos de oxígeno podría expresarse como 8 (ocho veces el peso del elemento unitario: el hidrógeno). Al unir estas dos consideraciones, el peso del átomo de hierro sería igual a 28. De esta forma, al conocer la proporción en masa de los elementos que conforman cada compuesto, se podrían encontrar los demás pesos atómicos. Pero la suposición errónea de Dalton, lo estaría llevando a conclusiones falsas: hoy se conoce que el peso relativo del átomo de oxígeno no es 8, sino 16 y que el peso relativo del átomo de hierro no es 28, sino 56, como se mostrará más adelante.

La composición real del agua no fue descubierta sino después de los trabajos de Gay-Lussac, pero permítasenos admitir la real composición para ilustrar con mayor claridad el fundamento de la posterior construcción de la tabla de pesos atómicos. Si por algún motivo, Dalton hubiera sugerido

la combinación entre el hidrógeno y el oxígeno en relación 2:1, encontraría que dieciséis átomos de hidrógeno pesan lo mismo que un átomo de oxígeno:

$$\frac{2 \text{ átomos hidrógeno}}{1 \text{ átomo oxígeno}} * \frac{\text{peso átomo hidrógeno}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{1}{8}$$

Despejando:

$$\frac{\text{peso átomo hidrógeno}}{\text{peso átomo oxígeno}} = \frac{1}{16}$$

La teoría atómica de Dalton afirmaba que deberían existir tantas clases de átomos como de elementos hubiese, al ser el diámetro externo, determinado por el calórico, lo que los diferenciaba. Además, sostenía que las fuerzas de repulsión se debían al efecto del calórico entre los átomos del mismo elemento, pero que no existía interacción de naturaleza repulsiva entre átomos de diferentes elementos, por lo tanto, la presión ejercida en las paredes de un recipiente se explicaría por la naturaleza elástica del gas: el calórico alejaría los átomos y generaría una fuerza por unidad de área. Pero, cuando se encontraran diferentes tipos de gases en un mismo recipiente, la presión ejercida equivaldría a la suma de las presiones individuales de cada gas. Esta fue la formulación de la *ley de presiones parciales*. Para que la teoría atómica pudiera explicar las evidencias sobre la presión parcial de los gases, no podía existir interacción entre partículas de tamaños diferentes.

En la búsqueda de los volúmenes atómicos, el estudio de los *gases mixtos* se convirtió en un centro de interés para Dalton y las *disoluciones* se convirtieron en un pun-

to clave de su investigación. Su amigo William Henry (1774-1836), quien se dedicaba a la elaboración de leche de magnesia, un producto farmacéutico de alta reputación para aliviar males digestivos, estudió los factores que pueden afectar la solubilidad de los gases en los líquidos y encontró que, *en condiciones térmicas constantes, la presión es directamente proporcional a la solubilidad de un gas (ley de Henry)*. Quedaba por entender, por qué los gases más simples como el hidrógeno y el oxígeno necesitaban mayor presión para ser disueltos en agua, mientras que el dióxido de carbono disolvía fácilmente. Dalton estaba convencido de que la solubilidad dependía del peso y el número de las partículas de la sustancia: entre más simples y ligeras, serían menos absorbidas, por lo tanto, el tamaño, directamente relacionado al peso, debía estar en función de las solubilidades. Aunque Dalton buscaba conocer el tamaño (es decir, el volumen) de los átomos, esto implicaba investigar acerca de los pesos relativos, debido a que, conocidas las densidades experimentales de los gases y los pesos atómicos, se podrían encontrar los volúmenes atómicos (Brock, 1998, s.p.).

Para poder encaminar la química en la construcción de un lenguaje nombrado y estructurado científicamente, se necesitó de lo empírico: los hechos, los cálculos, las medidas, los valores exactos de la materia que se consumía para formar los compuestos. El método de proporciones fundamentado en la ley de Proust, permitió conocer el peso de aquellas partículas aparentemente invisibles que constituían toda la materia del universo y, que quizás, Dalton no estimaba de tanto valor, como



sí conocer su volumen o tamaño. Es aquí donde la historia muestra cómo inocentemente las búsquedas científicas encauzadas hacia cierto objetivo, terminan revelando los caminos verdaderamente indispensables para la solución, a un periodo de conocimiento estancado: los pesos atómicos fueron el real fundamento de la organización periódica de los elementos. Calcular el peso relativo de los átomos ha sido un problema que la filosofía de la ciencia ha denominado *transducción*.

La química se estructuraba, parecía que la existencia de los átomos, tan huidizos a los sentidos y rechazados por los escépticos naturalistas, se podía comprobar usando la física y la medida. Como hemos visto, solamente se necesitaba predecir, con exactitud, la relación entre el número de átomos de cada elemento constitutivo en una molécula, para que la tabla de pesos que se construyera fuera coherente y correspondiera a la realidad.

El camino parecía aclararse al entender que era posible la formación de diferentes compuestos, a partir de los mismos elementos, en una misma reacción. Van Helmont, cuando describió el *gas silvestre*, producto de la quema de un trozo de madera, lo consideró como una mezcla de aires o gases. Black había descrito el producto de esta quema como aire fijo (dióxido de carbono), el cual inhibía la llama de una vela y saturaba el ambiente. Pero, como luego se supo, en la combustión no solo se liberaba el dióxido de carbono, sino que se formaban otros gases. De esta forma, resultaba más aproximada la definición de Van Helmont para describir como una

mezcla, el producto de la quema de los materiales orgánicos y los combustibles, y no como un solo aire.

Dalton encontró algo realmente espectacular en estos procesos en los que se formaban compuestos diferentes desde los mismos elementos y era que, para una cantidad fija de uno de los elementos, las cantidades que se requerían de otro de los elementos para formar los diferentes compuestos, estaban en relación de números enteros (afirmación que, posteriormente, se llamó la *ley de las proporciones múltiples*), es decir, por ejemplo, si se realizaban por separado las síntesis de dos gases carbónicos (dióxido de carbono, CO_2 , y monóxido de carbono, CO), al tomar una cantidad fija de carbono al inicio de cada experiencia, se comprobaba que se necesitaba una cantidad diferente de oxígeno en cada síntesis. Al medirse la cantidad de oxígeno consumido para formar cada gas, se podía comprobar que al dividir estas cantidades de oxígeno se obtenía un cociente entero.

Véase a continuación, en la Tabla 7, la información encontrada en el libro *De la alquimia a la química*, de Teresa de la Selva (2008, s.p.), en la cual se muestran datos experimentales reales obtenidos en la época de Dalton, que permitieron establecer la *ley de las proporciones múltiples* enunciada por el químico inglés.

Este descubrimiento permitió entender que los elementos se combinaban, para formar diferentes compuestos, de acuerdo a unas proporciones, no de cualquier forma y, por lo tanto, no podían formularse combinaciones por fuera de estas propor-



ciones. Hay que resaltar el logro de esta ley; por ejemplo, se entendió que las cantidades de oxígeno presentes en los dos óxidos de hierro, como se muestra en la Tabla 8, se encontraban en la proporción 3:2, lo que podría indicar que, en la molécula del óxido férrico, para una cantidad fija de átomos de hierro habría 3 átomos de oxígeno, mientras en la de óxido ferroso habría 2. De igual forma, se podría conocer la proporción entre los átomos de hierro de ambos compuestos, al mantener fija la cantidad que se combina de oxígeno y medir la que se necesita de hierro y, de esta forma, quedaría completada la composición molecular del óxido ferroso y del férrico.

Es importante aclarar que, aunque se lograra conocer la proporción en peso de un mismo elemento en los diferentes compuestos que puede formar, dicha relación no indicaba, en términos absolutos, la can-

tidad real de átomos en cada molécula. Por ejemplo, una relación 3:2 podría indicar que habría 3 átomos del elemento en una molécula de un compuesto, mientras habría 2 en la molécula de otros compuestos o podría indicar que habría 6 átomos del elemento en una molécula de un compuesto, mientras 4, en la molécula de otro.

Para poder comprobar exactamente cuál era la composición de los elementos en la molécula, se necesitó del trabajo experimental, es especial, los resultados que había encontrado Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850), físico y químico francés, a quien la historia de la química le reconoce una de las leyes de los gases. Gay-Lussac demostró que los gases se dilataban con el aumento de la temperatura, y encontró que, *el volumen de un gas es directamente proporcional a la temperatura (a presión constante) y su presión directamente*

Tabla 7. Proporciones múltiples de algunos compuestos de oxígeno.

Compuesto	Composición fija	Proporción entre el oxígeno fijo de cada compuesto
Óxidos de plomo		
Óxido de plomo II	100 g plomo/ 15,6 g oxígeno	2
Óxido de plomo IV	100 g plomo/ 7,8 g de oxígeno	1
Óxidos de cobre		
Óxido cúprico	100 g de cobre/ 25 g de oxígeno	2
Óxido cuproso	100 g de cobre/ 12,5 g de oxígeno	1
Óxidos de hierro		
Óxido férrico	100 g de hierro/ 44,25 g de oxígeno	3
Óxido ferroso	100 g de hierro/ 29,6 g de oxígeno	2



proporcional a la temperatura (a volumen constante). Esta ley también se le atribuye a Jack Charles (1746-1823), aunque este autor nunca la publicó, sucediéndole lo mismo que a Carl Her Scheele con el descubrimiento del oxígeno.

Al tener la ley de Boyle (el volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión ejercida) y la enunciada por Gay-Lussac, el estado de los gases podía entenderse de acuerdo a las variables físicas de presión, temperatura y volumen, que más adelante fueron reunidas en una misma expresión, conocida como la *ley combinada de los gases*. Esta ley establece que tanto la presión como el volumen son directamente proporcionales a la temperatura; mientras que, cuando se mantiene constante la temperatura, la presión y el volumen son inversamente proporcionales. La expresión matemática que representa estas relaciones es la siguiente:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

Donde 1 y 2 corresponden a los estados iniciales y finales de un gas sometido a algún cambio en sus condiciones.

Al trabajar con los gases, Gay-Lussac encontró una manera de correlacionar las proporciones fijas de Proust con las proporciones múltiples de Dalton y expresó las reacciones de descomposición de los compuestos, en términos de los volúmenes generados de sus componentes, que se obtenían como producto de su separación en elementos; así mismo, también pudo expresar las reacciones de síntesis

de un compuesto, en términos de los volúmenes de los elementos necesarios para su formación. Para esto, Gay-Lussac llevó a cabo sus experiencias a presión y temperatura constantes.

Gay-Lussac se basó en la electrolisis del agua, un método de separación, que utiliza una corriente eléctrica, descubierto, tal vez accidentalmente, por William Nicholson (1753-1815). Nicholson, químico inglés, al trabajar con la pila voltaica (aparato que puede producir electricidad y que fue inventado a inicios del siglo XIX por el italiano Alessandro Volta (1745-1827), encontró que, al unir alambres de platino a ambos extremos de la pila y sumergiéndolos en agua, se obtenía oxígeno e hidrógeno. El oxígeno comenzaba a aparecer burbujeando en el extremo positivo de la pila, mientras que el hidrógeno lo hacía en el extremo negativo. Para Gay-Lussac, lo importante del proceso de electrolisis del agua era que el volumen de oxígeno producido era la mitad del volumen del hidrógeno producido (Chamizo, 2010, s.p.).

Al tomar un volumen de vapor de agua conocido, se podía encontrar que después de realizar la electrólisis, el volumen de hidrógeno obtenido era igual al volumen inicial de agua, mientras que el volumen de oxígeno obtenido era la mitad del volumen inicial del agua. Estos hallazgos podrían ser analizados a la luz de una idea planteada por Daniel Bernoulli (1700-1782): *Los volúmenes iguales de gases tienen igual número de partículas a presión y temperatura constantes*. Es importante aclarar que, se pensaba que las partículas harían referencia a los átomos, en el caso de un



elemento; o a las moléculas, en el caso de un compuesto. La idea de Bernoulli aún estaba por demostrarse y de ser cierta, permitiría definir la composición de una molécula de agua, puesto que permitiría inferir la relación entre la cantidad de partículas (átomos) de cada elemento en una molécula de compuesto (relación que, hasta entonces, tenía que ser supuesta). De esta misma manera, se podría proceder para cualquier otro compuesto estudiado en forma gaseosa.

La afirmación de Bernoulli contradecía la idea de Dalton, de que los átomos eran esferas sólidas contiguas y sin movimiento, tan solo separadas por la acción repulsiva del calórico que las envolvía. Al tener en cuenta que Dalton consideraba que los átomos de los diferentes elementos variaban en tamaño, entonces, no podría ser cierto que en un mismo volumen cupiera la misma cantidad de átomos de diferentes elementos.

Si se aceptaba la hipótesis de Bernoulli, se hacía posible descubrir las proporciones reales entre el hidrógeno y el oxígeno en la molécula de agua: si el volumen de hidrógeno obtenido en la electrolisis del agua era dos veces el volumen obtenido de oxígeno, entonces en la molécula de agua debían estar presentes estos elementos en la misma proporción, por lo tanto, podía plantearse que una molécula de agua tendría la fórmula H_2O . Sin embargo, en este punto se abría un nuevo problema: para la reacción contraria, la formación del agua, dos volúmenes de hidrógeno se combinarían con un volumen de oxígeno para generar dos volúmenes de agua. Esto parecía contradecir la ley de la conservación de la masa.

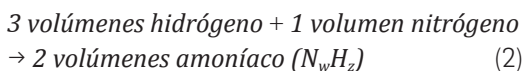
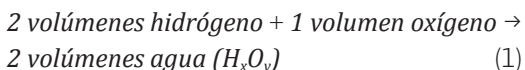
Lorenzo Romano Amadeo Carlo Avogadro (1776-1856), profesor de física de la universidad de Turín, Italia, logró armonizar las ideas de Gay-Lussac con los postulados de Dalton y terminó resolviendo el problema de las masas relativas de los átomos. En primer lugar, aceptó la presencia del calórico, refutó la idea de que los átomos permanecían quietos y retomó, de algún modo, el concepto griego de corpúsculo: un tipo de partícula en movimiento. Dalton sostenía que las partículas mínimas de los elementos correspondían a un solo átomo y, de esta forma, planteaba la formación del agua así: ; por su parte, Avogadro sostenía que, para poder explicar los volúmenes de hidrógeno y oxígeno involucrados en la síntesis del agua, era necesario considerar la posibilidad de que las partículas mínimas de los elementos, estuvieran conformadas por más de un átomo, del mismo elemento, claro está.

Fuera cual fuera la reacción para la obtención del agua, la ley de conservación de la masa imponía que el número de átomos totales de un elemento en los reactivos, debía ser igual al número total de estos mismos átomos en los productos. Dicho sea de paso, esta idea abría la posibilidad de entender que el peso atómico no dependería del tamaño de los átomos, como suponía Dalton, sino, que debía estar relacionado con otro factor de su naturaleza.

Al partir de lo anterior, los químicos de ese entonces pudieron realizar un razonamiento, que les llevaría a aceptar la naturaleza poliatómica de las partículas mínimas de algunos elementos. Vamos a ejemplificarlo con las siguientes reacciones: la formación



del agua (1) y la formación del amoníaco (2) (los datos de los volúmenes de los gases fueron tomados experimentalmente por aquellos científicos):



Donde los subíndices indicarían lo siguiente:

x: Número de átomos de hidrógeno en una molécula de agua.

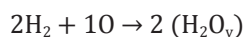
y: Número de átomos de oxígeno en una molécula de agua.

w: Número de átomos de nitrógeno en una molécula de amoníaco.

z: Número de átomos de hidrógeno en una molécula de amoníaco.

Al observarse la ecuación (1), se tiene que el volumen consumido de hidrógeno y el volumen producido de agua son iguales, por lo tanto, involucran la misma cantidad de partículas: la cantidad de partículas (supuestamente átomos) de hidrógeno que reaccionan es la misma que la de partículas (moléculas) de agua que se forman. Al compararse las ecuaciones (1) y (2), se observa que el volumen producido de amoníaco es igual al volumen producido de agua, es decir, la cantidad de moléculas de agua que se forman, es idéntica a la cantidad de moléculas de amoníaco que se generan. También se concluye que, los volúmenes de oxígeno y de nitrógeno consumidos en ambas reacciones son iguales, es decir, la cantidad de partículas de oxí-

geno que se gastan, es igual a las de nitrógeno que se consumen. Pero, entonces, ¿por qué, en la reacción de formación del amoníaco, se necesita una mayor cantidad de partículas de hidrógeno, para obtener la misma cantidad de moléculas de amoníaco que la que se obtiene en la formación del agua? La única solución a esto era que las partículas del elemento hidrógeno no podían ser monoatómicas. Una ecuación para la formación de agua, que podría satisfacer estas inquietudes, sería:



Para la anterior ecuación, lo más lógico sería suponer que el subíndice y, la cantidad de átomos de oxígeno en la molécula de agua, sería 1. Pero esto hizo que muy pronto se llegara a la idea de que las partículas mínimas del elemento oxígeno, también deberían tener naturaleza diatómica. Miremos el razonamiento que se llevó a cabo: No sería aceptable que, tal como lo expresa la anterior ecuación, un átomo de oxígeno, al combinarse con cuatro átomos de hidrógeno, pudiera formar una cantidad de agua tal, que contuviera dos átomos de oxígeno; esto violaría la ley de la conservación de la masa. Para respetar la conservación de la masa, en la anterior ecuación, el valor de y debía ser igual a $\frac{1}{2}$, pero esto equivaldría a decir que el átomo es divisible, puesto que un átomo de oxígeno tendría que partirse en mitades, para formar dos moléculas de agua. Un razonamiento similar pudo realizarse para el caso de la formación del amoníaco, concluyéndose que las partículas del elemento nitrógeno, tampoco podían ser monoatómicas.



Al aceptarse la idea de que los elementos hidrógeno, oxígeno y nitrógeno tenían partículas mínimas diatómicas, de modo que sus moléculas correspondían a H_2 , O_2 y N_2 , las ecuaciones de formación para el agua y el amoníaco podrían expresarse así: $(2H_2 + 1O_2 \rightarrow 2H_2O_1)$ y $(3H_2 + 1N_2 \rightarrow 2N_1H_3)$. Actualmente, estos hechos son indiscutibles y es de admirar cómo, sin instrumentos de alta resolución, tan solo a partir de la observación detallada de los fenómenos físicos y la reflexión, se formularon conjeturas que se sostuvieron una a una en los resultados experimentales confirmatorios, que avalaban las nacientes teorías.

Procedimientos similares permitieron comprobar que muchos elementos poseían partículas mínimas de composición poliatómica, es decir, estaban conformados realmente por moléculas. Por ejemplo, para el fósforo se encontró que su molécula era tetraatómica: P_4 . Las bases para encontrar la composición correcta de elementos y compuestos gaseosos estaban asentadas y fue Avogadro, el hombre que erigió esta columna vertebral para el fortalecimiento de la química, como una ciencia sistemática y racional. La tabla periódica empezaba a nacer, las diferentes propuestas de organización de los elementos y el cálculo de propiedades químicas se tornaron indispensables, para poder clasificar las piezas que el rompecabezas de la naturaleza química de la materia, que, nada más y nada menos, tiene el tamaño del universo, pues todo lo creado está constituido por átomos. Ya era hora de reconocer los elementos químicos y desnudarlos de sus atributos de compuestos y mezclas

y, de esta forma, comenzar a dar origen a uno de los legados más importantes, que ha entregado el curso de la historia de la química a la humanidad: *la tabla periódica de los elementos*.

Recapitulando: conocer los pesos atómicos relativos de los elementos se hizo posible, al retomar el cálculo sencillo propuesto por Dalton, a partir de las proporciones de fijar:

$$\frac{\#átomos A}{\#átomos B} * \frac{masa átomo A}{masa átomo B} = \frac{masa A}{masa B}$$

Con los logros obtenidos hasta Avogadro, conocida de manera certera la relación $\frac{\#átomos A}{\#átomos B}$, se lograba encontrar correctamente la proporción $\frac{masa átomo A}{masa átomo B}$ (lo que para Dalton dependía de suposiciones). Al descifrar las proporciones entre los diversos elementos, en las diferentes reacciones, se construyó la tabla de pesos atómicos relativos, fundamental para la organización posterior en la tabla periódica.

Ya se mostró, anteriormente, que esta ecuación permitió establecer la relación:

$$\frac{peso átomo hidrógeno}{peso átomo oxígeno} = \frac{1}{16}$$

Al conocer la reacción de formación del óxido férrico (Fe_2O_3) y recordando que el cociente experimental de las masas fijas de hierro y oxígeno (1/7), se pudo conocer la masa del átomo de hierro de la siguiente forma:

$$\frac{2 \text{ átomos hierro}}{3 \text{ átomos oxígeno}} * \frac{masa átomo hierro}{masa átomo oxígeno} = \frac{masa hierro}{masa oxígeno} = \frac{7}{2}$$



$$\frac{\text{masa átomo hierro}}{\text{masa átomo oxígeno}} = 3,5$$

Despejando:

$$\text{masa átomo hierro} = 3,5 \times 16 = 56$$

A partir de aquí, se estableció como valor unitario a la masa del átomo de hidrógeno y se comenzó a estructurar la tabla de las masas atómicas. Vale la pena aclarar que, actualmente la tabla periódica se basa en la masa del átomo de carbono, a la que se le ha asignado un valor de 12.

Claude Louis Berthollet (1748-1822), un hombre que nunca aceptó la ley de las proporciones múltiples, intentó demostrar que los compuestos se combinaban en proporciones variables e indefinidas, accidentalmente sentó las bases para el desarrollo de la teoría de los semiconductores y la fisicoquímica: En 1798, Berthollet acompañó una expedición de Napoleón a Egipto y encontró que en las orillas de los lagos salados se formaba espontáneamente sosa (carbonato de sodio, Na_2CO_3), a partir de sal común (cloruro de sodio, NaCl) y la piedra caliza (carbonato de calcio, CaCO_3). Lo sorprendente era que esto era contrario a lo que hasta entonces, se había observado experimentalmente: la sosa, de manera natural, se descomponía en sal y piedra caliza. Para explicar por qué estaba ocurriendo la reacción contraria, Berthollet propuso que las altas concentraciones de sal en los lagos predominaban sobre las afinidades electivas de los compuestos: *la acción de la masa o concentración* tendría un papel fundamental en el curso de las reacciones químicas. El concepto del equilibrio de las

reacciones empezaba a surgir en el campo de la química, ahora se entendería que los elementos formaban compuestos, no solo a partir de sus afinidades, sino que existían factores macroscópicos o externos, como la masa, la presión y la temperatura, que afectaban el curso de las reacciones químicas. Estos desarrollos, posteriormente, permitieron aclarar el concepto de acidez y formular la teoría del pH.

El papel de la electroquímica

El experimento que permitió desentrañar la composición del agua en su descomposición: hidrógeno y oxígeno, estaba ligado a una de las ramas más importantes de la química: *la electroquímica*. El mundo químico andaba revolucionado por la corriente galvánica (corriente eléctrica) de Alessandro Volta, una herramienta analítica fundamental para el curso de la constitución del sistema periódico. Mediante la descomposición electrolítica se descubrieron nuevos elementos, incluso, aquellos compuestos que Lavoisier había incluido en su tabla de elementos, que no había logrado reducirlos mediante el fuego, a nada más simple que ellos mismos: la potasa (hidróxido de potasio), la sosa cáustica (hidróxido de calcio) y las tierras alcalinas, fueron simplificados en sus elementos. Humphry Davy (1778-1829), químico autodidáctico, que por falta de recursos nunca pudo comenzar la carrera de Medicina, realizó numerosos experimentos y aplicó los principios eléctricos a la química. Al utilizar baterías más potentes que las usadas en la descomposición del agua, logró confirmar que



la sosa y la potasa, al igual que las tierras alcalinas, no eran compuestos y añadió a la tabla de elementos el calcio, el sodio, el estroncio y el bario, como productos de sus experimentos.

El uso de la electricidad permitió esclarecer aún más que los ácidos no son solo compuestos formados de oxígenos, sino que pueden formarse por medio de un no metal con hidrógeno. También, entregó las evidencias sobre que la afinidad química se debía a fenómenos eléctricos y no a la interacción con el flogisto. El concepto de enlace químico estaba palpable y la comprensión de la naturaleza eléctrica del átomo parecía inevitable. En los experimentos de electroquímica se utilizaban líquidos conductores que, en algunos casos, no se descomponían y en otro, sí; esto indicaba que la naturaleza química es eléctrica, pero de forma potencial, es decir, actúa de acuerdo a las afinidades químicas. Las observaciones de Davy se convirtieron en toda una teoría electroquímica, gracias al trabajo del químico sueco, Jöns Jacob von Berzelius (1779-1848).

La electricidad no solo permitió descubrir los pesos atómicos de los elementos, sino que las evidencias sobre la naturaleza eléctrica de la materia estaban forjando un camino, para entender más a fondo la naturaleza del átomo; en presencia de la corriente eléctrica, algunas sustancias migraban hacia superficies metálicas negativas, denominadas ánodos, entre estas sustancias se encontraban los metales, ciertos óxidos metálicos, las sustancias alcalinas y el hidrógeno; mientras que las sustancias ácidas eran atraídas por su-

perficie electrificadas positivamente; las fuerzas de repulsión y atracción rompían con suficiente energía, las afinidades químicas entre los componentes de los compuestos. Entre los aportes de la electroquímica al descubrimiento de los elementos químicos se atribuye el descubrimiento del cerio y la clasificación de la materia sobre la base de los cuerpos electropositivos y electronegativos, que daría origen al concepto de valencia: al depender en cuál electrodo se depositaran los elementos, serían denominados como *aniones* y *cationes*, por Michael Faraday, al ser los aniones los cuerpos electronegativos que migran hacia el polo positivo (cátodo) y los electropositivos los que migran hacia el polo negativo (ánodo).

Uno de los conceptos más importantes surgía para entablarse como una propiedad intrínseca de la materia: la electronegatividad. El oxígeno liberado en la electrolisis del agua viajaba al cátodo por su naturaleza electronegativa, mientras que los metales lo hacían al ánodo. Al trabajar con los elementos conocidos se establecía las diferencias de electronegatividades, al encontrar que el oxígeno era el más electronegativo (actualmente con la tabla periódica completa, se sabe que el flúor es el elemento más electronegativo). Se hizo posible reproducir las reacciones químicas conocidas a partir de la electricidad; los elementos menos electronegativos que el oxígeno se lograban *enlazar* a él, ya fuera un metal o un no metal, el oxígeno actuaba electronegativamente, forzaba a ser electropositivos a los elementos y formaba en cada caso un óxido o una base. Toda la construcción de la teoría ácido-alcalina se



desarrolló y permitió comprender que los elementos no metálicos, menos electro-negativos que el oxígeno, podían enlazarse con elementos electropositivos, incluso, entender que dos elementos que pueden actuar electronegativamente, como, por ejemplo: el oxígeno y el azufre con los metales, podían formar entre ambos un tipo de compuesto, debido que el oxígeno al ser más electronegativo que el azufre, hacía que este se comportara electropositivamente, en afinidad con él. Las reacciones químicas tomaban un valor cuantitativo, lo que antes se predecía por resultados de prueba y error, ahora podía predecirse sin recurrir a la probeta (Brock, 1998, s.p.).

El descubrimiento del flúor ocurrió en 1886, cuando Ferdinand Frédéric Henri Moissan (1852-1907), químico francés, logró aislarlo mediante una corriente eléctrica, a través de una solución de fluoruro de potasio disuelto en ácido fluorhídrico a -50°C . Una vez descubierto este elemento, ya el oxígeno no era el más electronegativo y debía comportarse electropositivamente frente al flúor. En un lenguaje moderno, paradójicamente, equivaldría a decir que el flúor oxida al oxígeno (el oxígeno pierde electrones). El flúor fue indispensable para trazar la tabla periódica y estuvo entre los intereses de muchos químicos, incluyendo a Davy.

El flúor es un gas amarillo pálido, que en contacto con el agua forma ozono (O_3) y ácido fluorhídrico, ácido que logra diluir al vidrio. La importancia del descubrimiento del flúor radica en su poder oxidante, al atacar metales estables como el oro y la plata. También, al poder combinarse con

el uranio, permitió utilizarse en la fabricación del hexafluoruro de uranio, un compuesto gaseoso, que fue utilizado en una técnica para separar el isótopo radiactivo uranio-235, la materia prima de la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima en la Segunda Guerra Mundial (Ríos, 2011, s.p.).

El comportamiento electrolítico de los elementos permitió organizarlos de acuerdo con su electronegatividad y crear una lista de acuerdo con esta propiedad. Berzelius introdujo un simbolismo racional, basado en el origen de las palabras en latín, al poner el elemento electropositivo en la izquierda y un signo *más*, seguido del elemento o parte electronegativa a la derecha. Por ejemplo, para escribir óxido cúprico, se usaba ($2\text{Cu} + \text{O}$). Con el tiempo, se sustituyó el signo *más*, se agruparon los elementos y se representaron por superíndices la cantidad de átomos que tenía (esto ya era posible, gracias a la teoría atómica y a las leyes de conservación de la materia de Lavoisier y las proporciones fijas de Proust, como se mostró anteriormente). La convención de subíndices que utilizamos actualmente, la introdujo Justus von Liebig (1803-1873), pero el uso de esta simbología no fue acogido inmediatamente, incluso hasta finales del siglo XX, los franceses se negaban a abandonar la nomenclatura de Berzelius (Brock, 1998, s.p.).

El desarrollo del espectroscopio por el químico Robert Bunsen y por el físico Gustav Robert Kirchhoff en 1859, permitió identificar nuevos elementos, entre ellos el rubidio y el talio. Este aparato abrió el camino para el surgimiento de una nueva ciencia: la espectroscopia. Los orígenes de esta



rama de la física, cuya aplicación en la química sería preponderante, se encuentran en Newton, quien, al descomponer la luz del sol por medio de un prisma, observó que se producía un juego de colores, al que llamó *espectro*. Newton, al analizar el abanico de colores que se formaba al refractarse la luz del sol, aparecían unas franjas oscuras divisorias.

Joseph von Fraunhofer, un fabricante alemán de cristales y lentes, se atrevió a medir las líneas oscuras de la luz solar, dándose cuenta que siempre aparecían en el mismo lugar. Posteriormente, se descubrió que cada elemento, calentado hasta su incandescencia, emitía una luz que, al ser refractada mediante un prisma, presentaba un espectro discontinuo conformado por rayas divisorias, similar al de la luz del sol, pero con ubicaciones y tamaños distintos. Al analizar cada elemento, se encontró que no se parecían en nada los espectros de la luz que emitían, como si fuese un tipo de identidad original (Ríos, 2011, s.p.).

El primer espectrómetro estaba basado en una rendija, por la que se hacía pasar la luz generada por la incandescencia de un elemento, la cual era refractada en un prisma, para luego ser observadas las franjas. Incluso, Bunsen y Kirchhoff descubrieron dos elementos nuevos por medio de este aparato, a los cuales nombraron por la coloración que predominaba en su espectro: el cesio, del latín *caesius* "azul cielo" y el rubidio, del latín *rubidus*, "rojo".

Los aportes a la química práctica por parte de Bunsen fueron cuantiosos: logró mejorar los métodos de combustión en grandes

hornos, los cuales estaban demandando pérdidas de calor por encima del 50 % en la industria inglesa y pérdidas superiores al 80 % en Francia. Inventó el fotómetro, un instrumento que permitía medir la intensidad de la luz. Inventó la yodometría, una técnica utilizada para hacer determinaciones de compuestos en cantidades muy pequeñas. En electroquímica demostró que era posible obtener corriente eléctrica, sustituyendo los polos de platino de las pilas por polos de carbón, al reducir considerablemente los costos de fabricación. Desarrolló un calorímetro para gases y construyó una *bomba de filtro* para purificar soluciones en el laboratorio. Perfeccionó el mechero, mediante una abertura en la parte inferior, que permitía regular la mezcla entre el gas y el aire (este mechero es el que actualmente se utiliza en los laboratorios de química, el cual lleva el nombre de *Mechero Bunsen*). Pero su logro más significativo es el desarrollo del espectrómetro en compañía de Kirchhoff.

Al estudiar las líneas de los espectros de las estrellas y nebulosas, Norman Lockyer y Edward Frankland, en 1868, identificaron un espectro del cual no se tenía registro y que debería pertenecer a un elemento nuevo: el helio (*helios*, "sol").

El concepto de espectro de un elemento o compuesto químico es un tipo de huella digital, que arroja la frecuencia de la radiación electromagnética emitida en la transición de un electrón, desde un nivel de alta energía, a uno de baja energía, al originar diferentes longitudes de onda, al ser único el espectro de cada elemento. Por esta razón de originalidad, es posible identificar



la composición química de la naturaleza, al ser los colores de bandas, frecuencias emitidas, que generan un tipo de registro de la naturaleza atómica de la materia.

El criterio para organizar los elementos fue el de los pesos atómicos. Johann Wolfgang Dobereiner (1780-1849), reconocido por sus estudios en catálisis, principalmente en la acción del platino sobre la inflamabilidad del hidrógeno, descubrió que algunos elementos compartían propiedades que los asemejaban y también los distanciaban de otros, clasificándolos en *tríadas*. Una de las propiedades más importantes de estas tríadas era que el peso atómico del elemento intermedio, era igual al promedio entre los otros dos. Una de las tríadas más importantes, que permanece vigente en la tabla periódica actual es: cloro, bromo y yodo. Al tomar los pesos atómicos de estos elementos del grupo VII A, cuyos pesos atómicos son respectivamente: 35.45, 79.90 y 126.90, se comprueba que la masa del bromo es el promedio entre la masa del cloro y el yodo. Otras tríadas descubiertas fueron: litio (7), sodio (23), potasio (39); calcio (40), estroncio (88), bario (137); azufre (32), selenio (79) y telurio (128). Debido que no todos los elementos podían clasificarse en tríadas, este modelo quedó como un simple juego mnemotécnico para conocer el peso de algunos elementos (Ríos, 2011, s.p.).

Max Joseph von Pettenkofer (1818-1901), un médico alemán preocupado por mejorar las condiciones de salubridad en los hospitales, dedicado igualmente al estudio de la química, encontró una correlación entre los pesos atómicos de algunos elementos,

cuyas características físicas y químicas eran muy similares: agrupó algunos elementos, cuyos pesos diferían en múltiplos de ocho. Entre los grupos se encontraban el litio (7), el sodio ($23 = 7 + 2 \times 8$) y el potasio ($39 = 7 + 4 \times 8$). Al igual que el trabajo de Dobereiner, no pasó a ser más que otra curiosidad matemática.

John Alexander Reina Newlands (1837-1898) organizó los elementos de acuerdo a su peso atómico de forma creciente y encontró que en cada ocho elementos, las propiedades se asemejaban: denominó su hallazgo *ley de las octavas*. El trabajo de este químico inglés, solo tuvo reconocimiento en el mundo científico, cuando Mendeléiev reconoció su importancia para el desarrollo de la tabla periódica, basada en la *ley periódica de los elementos*.

Mendeléiev, de origen ruso, tuvo una vida que difícilmente podía desarrollarse en las aulas de las universidades más prestigiosas de Europa. El empeño que puso al estudio en el colegio, le valió un premio para poder viajar a Francia y Alemania, los dos países más avanzados en química en ese momento. Allí conoció el trabajo del italiano Stanislao Cannizzaro, quien logró resolver el cálculo de los pesos moleculares de los compuestos y fomentó las ideas sobre los pesos atómicos en Mendeléiev.

La construcción del sistema periódico se basó en relacionar la capacidad de combinación de cada elemento con su peso atómico (el concepto de electronegatividad permitió formular el concepto de valencia). Al organizar los elementos, Mendeléiev encontró que las valencias conocidas subían



y luego bajaban en un orden constante: 1, 2, 3, 4, 3, 2, 1; incluso, para respetar ese orden, debía dejar vacíos algunos espacios, atreviéndose a predecir que deberían corresponder a elementos aún no hallados, a los cuales les predijo sus pesos atómicos, sus valencias, su densidad y otras propiedades, a partir de los promedios aritméticos que debían respetarse entre las propiedades periódicas. Entre esos elementos se encontraba el galio, el germanio y el escandio. Su convencimiento en lo que hacía, lo llevó a invertir las posiciones que arrojaban las valencias para el telurio (128) y el yodo (127), debido a que debían acomodarse en la familia de elementos similares; el yodo debía pertenecer a la familia del bromo, el cloro y el flúor; mientras que el telurio debería estar con el oxígeno, el azufre y el selenio. Mendeléiev publicó su trabajo en 1869 y legó a la humanidad un tesoro invaluable, que nos ha permitido construir un lenguaje científico comprensible y lógico, como tanto lo soñó Lavoisier.

La espectroscopia, quizás la herramienta más importante que se desarrolló para facilitar el definitivo desarrollo de la tabla periódica, permitió comprobar la existencia de los elementos y, por ende, de los átomos, entidades que fueron negadas como la imposibilidad de reducir la materia a un componente constitutivo, porque de alguna manera, era aceptar la concepción aristotélica de elemento.

Cuando parecía que el entendimiento de la naturaleza del aire estaba completo, John William Strutt (1842-1919), químico inglés, al estudiar el nitrógeno, encontró que su densidad difería si se obtenía del aire

o de la descomposición del amoníaco. Se sabía que el oxígeno podía combinarse con el nitrógeno para formar óxido nitroso, gas que fue descubierto por Priestley. Si el aire atmosférico estaba compuesto en parte oxígeno y nitrógeno, ¿por qué al hacer reaccionar estos dos gases en la atmósfera, por medio de una corriente eléctrica, quedaba una pequeña burbuja de gas, más pesada que el nitrógeno? Al desarrollarse el método para extraer el posible nitrógeno y oxígeno residual, y aislar esta burbuja, calentándola hasta la incandescencia para estudiar su espectro, se encontró el primer gas noble: el argón. William Ramsay (1852-1916), a quien se le atribuye el descubrimiento de este elemento, que por definición traduce "inactivo", intentó ubicarlo en la tabla periódica y predijo que debían existir elementos aún no descubiertos, cuyas propiedades de inactividad permitieran familiarizarlos con el argón.

El estudio del espectro de un gas desprendido de minerales de uranio permitió comprobar la existencia en la tierra del elemento helio y al estudiarlo se le clasificó entre los gases inactivos o *gases nobles*. Para descubrir los demás gases nobles, Ramsay preparó argón líquido, mediante enfriamiento a alta presión que, al evaporarse lentamente, develaba la presencia de componentes en pequeñas cantidades, cuyos espectros no coincidían con ninguno conocido y, por lo tanto, debía ser un indicio de nuevos elementos: se obtuvo el neón (*neos*, "nuevo"), criptón (*criptos*, "oculto") y el xenón (*xenos*, "extraño") (Ríos, 2011, s.p.). Con el descubrimiento del último gas noble, el radón, en 1900, por el físico alemán Friedrich Ernst Dorn, la familia de los



gases nobles en la tabla periódica estaba completa. El nombre de este gas se debió a que se obtuvo como producto de la descomposición del isótopo del elemento Radio-226, actualmente su presencia en los suelos sirve como factor de predicción de terremotos y fallas geológicas (Equipos y Laboratorios de Colombia (2012, s.p.).

Cuando parecía que la unidad última de la materia era el átomo y las evidencias se lo graban afianzar en una interpretación material de las interacciones entre estos, el descubrimiento de los rayos catódicos llevó a adentrarse en la naturaleza atómica. Se encontró que los átomos, aparentemente indivisibles, estaban conformados por un tipo de identidad eléctrica. Las investigaciones desde 1850 se enfocaron en desenmascarar, lo que parecía ser la naturaleza interna de los átomos. La emisión y transmisión de la energía a través del espacio vacío aclaró la estructura eléctrica de la materia: Los tubos catódicos de vidrio empleados por William Crookes (1832-1923), a los cuales se les retiraba el aire contenido, entregaron las evidencias de la presencia del electrón. Crookes, al conectar dos placas de metal a una fuente de energía, asignándole el valor negativo (cátodo) y positivo (ánodo) a cada lado de las placas, evidenció una fluorescencia que se producía en el tubo, cuando un supuesto rayo invisible atravesaba al ánodo. La atracción de los rayos por parte de la placa positiva, debía suponer que aquello que se atraía tenía una naturaleza eléctrica negativa.

El descubrimiento del electrón estuvo vinculado al uso de la espectroscopia. Crookes, al ser un conocedor de esta técnica de iden-

tificación de los elementos químicos, encontró que entre las menas de sales de selenio había una sustancia, cuyo espectro no coincidía con alguno conocido, al estudiarlo, se identificó que era un nuevo elemento y se le nombró: talio (su nombre deriva de la palabra griega "Thallus", que significa "tallo verde" y fue dado, debido a que en su huella digital aparecía una distintiva raya verde) (Ríos, (2011, s.p.). Para medir sus propiedades, Crookes trabajaba en cámaras de vacío, aparatos que lo llevaron a construir el radiómetro, un dispositivo basado en las bajas presiones de un gas, que lograba mover unas aspas rotatorias cuando se exponía a la luz, al permitir que la energía cinética, producida por el movimiento de los átomos del gas, se transformara en trabajo.

El trabajo con gases a condiciones cercanas al vacío (presiones muy bajas) motivó el diseño de los tubos catódicos y, por ende, el descubrimiento del electrón. En presencia de un imán, estos rayos llamados catódicos, por migrar desde el cátodo, eran desviados. Esta desviación indicaba la naturaleza corpuscular de los rayos, es decir, que debían estar formados por partículas.

En 1895, el físico alemán, Wilhem Conrad Röntgen (1845-1923), al usar un tubo de Crookes en condiciones de oscuridad, observó que se mostraba un color verdoso en una pantalla que situó a unos metros de distancia del aparato, en el momento en el que eran emitidos rayos. Los rayos luminosos permanecían, incluso, cuando se cubría el tubo de cartón o se incrementaba la distancia entre el ánodo y la pantalla. Las propiedades de los rayos catódicos permanecían invariables, si se sobreponían en la



trayectoria superficies metálicas o de gran grosor, al atravesarlas sin problema. El descubrimiento de los rayos X ocurrió cuando Röntgen, al cambiar los metales por la mano de su esposa, encontró que los huesos de la mano se revelaban en una placa fotográfica. Este descubrimiento no tardó en ser acogido por los médicos, para favorecer el diagnóstico de torcedoras o rotura de huesos. Otras de las aplicaciones que se encontraron en los rayos X dieron origen a la técnica de análisis, conocida como cristalografía de rayos X, la cual permite conocer la estructura molecular de compuestos.

El espectro electromagnético reúne todas las radiaciones producidas por los fenómenos eléctricos y magnéticos de la naturaleza. Los tipos de radiaciones van desde una longitud de onda de 10^{18} angstrom hasta 10^{-8} angstrom, al corresponder a un valor de energía mayor a una longitud de onda menor. Los rayos X corresponden a un tipo de radiación con un rango de longitud de onda de 10^4 - 10^2 . Los tipos de radiación electromagnética, en un orden creciente de energía son: Las ondas de radio, las microondas, el infrarrojo, los rayos X y los rayos gamma. Los seres humanos logramos percibir distintas longitudes de onda en tonalidades de color, pero solamente entre el espectro visible, un rango de longitudes de onda entre el espectro infrarrojo y el espectro de rayos X.

La radioactividad

El logro de la radioactividad ocurrió cuando se logró evidenciar que existían sustan-

cias que espontáneamente emitían algún tipo de radiación. Antoine Henri Becquerel trabajaba con sales de uranio, las cuales presentaban una luminiscencia natural, envolvió laminas fotográficas en papel oscuro, para evitar que la luz del sol ocasionara una reacción, y cerca de ellas dejó las sales. Al exponer a la luz del sol todo el conjunto, dedujo que, si las placas fotográficas develaban alguna imagen, esta debería ser causada por la radiación del uranio, puesto que la luz era impenetrable en el papel. Cuando desenvolvió las láminas fotográficas, una imagen se reveló en ellas e indicó que habían reaccionado por acción del uranio: se había descubierto la **Radioactividad**.

La existencia del electrón parecía indiscutible, Becquerel al comprobar que la radiación podía ser desviada por un campo magnético, entregó nuevas evidencias de que parte de la radiación debería contener carga eléctrica negativa. Entre sus discípulos, se encontraba una mujer de grandes aptitudes científicas; Marja Skłodowska (1867-1934), más conocida como Marie Curie, casada con el químico francés Pierre Curie, cuyos trabajos en física habían conseguido la fabricación de un dispositivo para medir las emisiones radioactivas, por medio de la piezoelectricidad (técnica para generar potencial eléctrico, al ejercer presión sobre un material cristalino). Los intereses de Marie Curie se enfocaron en el fenómeno de la radioactividad del uranio, al comprobar que la cantidad del elemento era directamente proporcional a la radiación emitida. Al utilizar las mediciones de radiación, encontró dos elementos más radioactivos que el uranio: El polonio (este



elemento debe su nombre al país natal de Marie Curie) y el radio (extraído del mineral pechblenda), este último elemento era más radiactivo que los otros dos. Al obtener radio a partir de su mineral; André Louis Debierne descubrió otro elemento que se hallaba presente: El actinio.

Uno de los descubrimientos más importantes de la científica polaca fue la inalterabilidad de la emisión radiactiva: la velocidad con la cual se emiten los rayos no cambiaba en el tiempo. La ciencia ha guardado en su memoria los logros y aportes que dieron la pareja Curie, al mantener como unidad de medida de la radiación, la cantidad de radioactividad que presenta un gramo de radio y que Marie Curie definió como un *curie*.

El descubrimiento del electrón comenzó con los experimentos del tubo de Crookes y se afianzó con la evidencia de la desviación del campo magnético por la radioactividad. La concepción del átomo como una esfera rígida, herencia del pensamiento de Dalton, se mantuvo para los primeros modelos atómicos. Aunque la etimología de la palabra **átomo** signifique que no puede ser dividido en nada más simple, algo más pequeño que él mismo, el electrón, develó su naturaleza interna.

La discusión sobre la materialidad de las causas químicas y físicas continuaba, parecía que definir la forma cómo interactúan los fenómenos podía ser de carácter inmaterial, aunque ocupasen un espacio; si se lograra desviar los rayos por medio de un campo eléctrico, estos debían ser partículas. Joseph John Thomson (1856-1940)

logró comprobar que sin la presencia de algún agente perturbador, como el poco gas que permanecía alojado a muy baja presión en el tubo de Crookes, los rayos eran desviados hacia el cátodo, lo que comprobaba la naturaleza eléctrica de estos y se podía deducir, entonces, que deberían ser partículas negativas.

Thomson encontró la relación matemática de la carga y la masa del electrón ($e/m = -1,76 \times 10^8$), y gracias al trabajo de Robert Andrews Millikan (1868-1953) se logró calcular la masa del electrón ($9,109\ 382\ 91 \times 10^{-31}$ kg). Millikan aplicó los principios de la piezoelectricidad en la ionización del aire, al analizar minúsculas gotas de aceite y al encontrar que estas se cargaban eléctricamente. Los avances en electroquímica y el desarrollo de las teorías sobre el electromagnetismo, le permitieron a Millikan establecer la carga del electrón.

Thomson diseñó el primer modelo atómico, donde incrustó los electrones dentro del átomo, el cual fue tomado como una esfera rígida cargada positivamente, para poder mantener la neutralidad eléctrica. La cantidad de electrones era la causa para equilibrar las cargas en los átomos y el problema de poder calcularlas estaba presente.

Los descubrimientos por medio del tubo de Crookes no solo se quedaron en el electrón. Thomson advirtió que se presentaba otro flujo de rayos en sentido contrario, cuando había una abertura en el lado positivo del tubo (cátodo). Thomson explicó que los gases contenidos tomaban carga



positiva dirigiéndose al extremo opuesto del tubo. Al tomar **láminas fotográficas**, se hacían desviar los rayos hacia ellas por medio de un campo eléctrico y magnético. Al observar las manchas formadas en las láminas, se encontró que correspondían a dos pesos atómicos diferentes, dedujo que, al tratarse del mismo elemento, puesto que se utilizaba neón puro, la mancha que correspondía al átomo más pesado (22 unidades de masa atómica), debería ser un tipo de neón en menor abundancia que el elemento tradicional, de 20 unidades atómicas. Thomson acababa de descubrir los isótopos: átomos del mismo elemento, pero con peso diferente (Ríos, 2011, s.p.). El desarrollo posterior de un espectrógrafo de masa permitirá establecer los pesos atómicos correctos de los elementos, al comprobar que lo más común es, que se presente el fenómeno de isótopos en un elemento químico; ahora los pesos no podían ser dados por el isótopo del elemento más abundante, sino, que sería el promedio entre las proporciones y los pesos individuales de cada elemento. Por ejemplo: el átomo de oxígeno tiene tres isótopos, cuyos pesos atómicos y proporciones en la naturaleza son: 16 uma (99,76 %), 17 uma (0,03 %) y 18 uma (0,21 %), lo que da un promedio de sus pesos atómicos de 15.99941 uma.

Ernest Rutherford (1871-1937), físico neozelandés, descubrió dos radiaciones distintas emitidas por el uranio: radiación beta y radiación alfa. Al estudiar estos fenómenos, a partir del trabajo de Thomson, encontró que los rayos beta tenían la misma relación carga/masa del electrón y que su naturaleza era eléctrica y negativa. No

tardó Rutherford en clasificar estos rayos como electrones; mientras que los rayos alfa, al tener carga positiva y ser más pesados que los electrones, se sospechaba que debían ser átomos de helio sin electrones, hecho que fue confirmado por medio de la espectroscopia. En algún momento se pensaba que todos los elementos eran átomos de hidrógeno, que al agruparse formaban átomos más pesados, esta idea no estaba tan perdida de las evidencias que encontró Rutherford, sobre el decrecimiento de la radiación de los elementos radiactivos, los cuales, con el tiempo se descomponían en átomos más sencillos, en especial, átomos de helio (entre un átomo de helio y un átomo de hidrógeno solo hay un electrón que los separe en su naturaleza química).

Rutherford acompañado de dos de sus alumnos, Ernest Marsden y Hans Geiger, trabajó en la reflexión de la radiación alfa en láminas metálicas. Utilizó un material radiactivo, dirigió los rayos alfa mediante un orificio para que atravesaran un tubo al vacío e interfirieran en una delgada hoja de oro. Para comprobar si los rayos atravesaban el metal, se dispuso de láminas fotográficas para evidenciar los impactos de las partículas de helio. Lo que encontraron estos tres hombres, al examinar que no todas las partículas atravesaban, fue el descubrimiento del protón (partículas con carga positiva). Algunas partículas eran desviadas con algún ángulo y otras repelidas completamente por la lámina de oro. La explicación que dio Rutherford fue grandiosa y fundamentó un modelo atómico, en el cual se predecía la presencia de un núcleo, muchísimo más pequeño que el tamaño del átomo y de naturaleza positiva.



Las raras colisiones que repelían los rayos, debían ocurrir por la presencia de partículas positivas en los núcleos de los átomos de oro; mientras que los rayos que logran atravesar la lámina, pasaban porque debería existir un espacio vacío entre el núcleo y la frontera del átomo. Las desviaciones de algunos rayos, dada su naturaleza eléctrica positiva, ocurría, porque los electrones de los átomos de oro, de naturaleza negativa, generaban una atracción eléctrica.

La física se convirtió en una herramienta indispensable para la química. Los descubrimientos del átomo y sus constituyentes se tornaron de interés para los físicos y toda una teoría comenzaba a tallarse en el libro de la ciencia, para implantarse como fundamento de todo lo existente. Es curioso que los avances científicos empezaran a validar algunas especulaciones alquimistas, especialmente, la transmutación. Entender la materia como átomos, cuyas diferencias estriban en sus componentes, hizo posible pensar que lograr vencer la constitución de las partes del átomo, permitiría transformar un elemento en otro. Rutherford había encontrado el carácter positivo del núcleo del átomo, pero solo lo denominó protón y partícula, cuando bombardeó nitrógeno, notó un centelleo que no era producto de los rayos gama. Al analizar la composición del tarro donde tenía el nitrógeno, encontró trazas de oxígeno, al parecer había ocurrido la primera transmutación; átomos de nitrógeno habían sido transformados en átomos de oxígeno; los núcleos de los átomos de nitrógeno estaban siendo fusionados y la cantidad de material eléctrico positivo (protones) aumentaba, lo que formaba un átomo estable de

oxígeno. Esta fue la primera reacción nuclear generada por el hombre y el inicio de una era nuclear.

Las masas atómicas ya eran conocidas en aquel entonces, cuando Rutherford descubrió el protón y al razonar sobre la naturaleza neutra de los átomos, planteó la necesidad de la existencia de una partícula neutra, sin carga, pero que aportaría masa al átomo: El neutrón. Para que un átomo sea eléctricamente neutro, el número de electrones debe ser igual al número de protones. Pero al considerar que la masa de un electrón no aporta a la masa del átomo, tan solo lo que alberga el núcleo es responsable de su peso y, de esta forma, al conocer el número de electrones, se conocería el número de protones y, por ende, el peso hipotético del átomo, el cual no coincidía con los pesos tabulados y comprobados, experimentalmente, desde los inicios de Dalton. La necesidad de una partícula neutra, que más tarde se comprobaría, tenía la misma masa que el protón, se hizo indispensable para que coincidieran los pesos reales conocidos. La masa del electrón es mil ochocientas veces más pequeña que la masa del protón, por lo tanto, su participación en el peso de un átomo es irrelevante.

El modelo de Rutherford tenía un bache, sostenía que los electrones giraban alrededor del núcleo del átomo, lo cual no coincidía con las teorías de la física clásica: si el electrón es una partícula cargada eléctricamente, debería emitir energía y agotarse con el tiempo, cayendo al núcleo, hecho que no acontecía. Niels Bohr (1885-1962), un físico danés, se percató de esto y propuso explicar el comportamiento de



los átomos a partir de nuevos modelos, que no utilizaran la física tradicional. El camino que tomaría Bohr sería la teoría cuántica de Max Planck, según la expresión matemática que describe la radiación electromagnética en forma discreta, donde la energía estaría cuantificada, es decir, en *quantos* o paquetes de energía, según la frecuencia de la onda de radiación. El modelo atómico de Bohr se basó en un átomo con un núcleo muy pequeño, donde se encontraba la parte positiva y neutra, mientras que los electrones deberían estar girando en órbitas definidas de energía discreta, es decir, no podían ocupar cualquier espacio en el átomo. Este modelo permitía demostrar que los electrones no cayeran por la pérdida de energía, sino que existían diferentes energías para los electrones, entre más alejados del núcleo, mayor energía presentarían y podían pasar de un nivel de menor a uno de mayor energía, al ocupar una órbita más alejada del núcleo o, por el contrario, caer a un nivel inferior. De esta forma, se entendió la radiación electromagnética como el efecto de un electrón que pasa de un estado de mayor a menor energía, desprendiéndose una diferencia de energía entre las capas, en forma de luz electromagnética, que para algunas frecuencias se manifestaría en las franjas de colores específicas, las mismas que permitían la detección de los elementos químicos por medio del espectrómetro.

El trabajo de Niels Bohr se basó en el átomo de hidrógeno, modelándolo a partir de los dos niveles de energía, que podía ocupar su único electrón, análogamente, formuló una expresión matemática, para explicar la energía desprendida a partir de las capas o

niveles que podían ocupar los electrones en el átomo, que debían ser siempre números enteros. Aunque para el espectro del hidrógeno funcionaba perfectamente, no ocurría lo mismo para los demás elementos. El primer número cuántico: los niveles de energía, permaneció, para que más adelante se mejorara con la introducción de otros números cuánticos, para permitir describir cada uno de los elementos químicos.

La tabla periódica desarrollada por Mendeléiev, a partir de los pesos atómicos, tenía una inconsistencia en los elementos telurio y yodo. Para que estos elementos coincidieran con las propiedades de una familia química, Mendeléiev invirtió el orden en el que estaban inicialmente y dejó una inconsistencia en el incremento de los pesos atómicos como fundamento de la organización periódica. Henry Gwyn-Jeffreys Moseley (1887-1915), físico inglés, explicó la anomalía en la tabla periódica de Mendeléiev, sobre la ubicación del telurio y el yodo a partir del número de protones que tiene el núcleo, propiedad que denominó *número atómico*. Moseley demostró que la periodicidad no dependía del peso atómico, sino del número atómico, al ser el del hidrógeno 1, el del helio 2 y, así consecutivamente, y de esta forma, por fin, las *tierras raras* fueron ubicadas correctamente en la tabla periódica.

La existencia de la partícula positiva y de la partícula negativa: el protón y el electrón respectivamente, estaba demostrada y solo quedaba encontrar la hipotética existencia de la partícula neutra que había formulado Rutherford. James Chadwick (1891-1974), físico inglés, al bombardear



berilio con rayos alfa, produjo un tipo de radiación diferente que lograba ionizar un gas, encontró que, la causa de la ionización era que las partículas alfa estaban desprendiendo protones de una capa de parafina, que se hallaba tapando el orificio donde se encontraba el gas. Al no ser desviadas estas partículas por un campo electromagnético, deberían tener una naturaleza no eléctrica. Al medir las velocidades de las partículas, logró calcular su masa y comprobar que era aproximadamente igual a la masa del protón.

El descubrimiento del electrón abrió las puertas para experimentar la emisión de energía electromagnética, a partir del bombardeo de núcleos atómicos que, co-

múnmente, se hacía con rayos alfa. Ahora disponer de partículas sin carga eléctrica y más pesadas que los electrones, permitía trabajar sin perturbaciones. Chadwick trabajó de la mano de científicos como Niels Bohr y Albert Einstein en el proyecto Manhattan, al fabricar la bomba atómica, cuyos impactos en el orden social venidero marcarían una era nuclear armamentista; la energía posible que podía entonces obtenerse, ya no de reacciones químicas, sino nucleares, permitiría comprender el poder de la naturaleza, tanto para generar energía útil, como la que disponemos de las fuentes hidroeléctricas o termoeléctricas, como energía inútil, en el sentido peyorativo de un uso bélico y carente de sentido humano.



Siglos XVII - XX: la química orgánica

La tardía aparición de la química orgánica

La parte de la química que se encarga de estudiar los compuestos químicos que se forman en organismos vivos, se denomina química orgánica y su nombre se le debe al célebre químico John Jakob Berzelius (1779-1848).

En el pensamiento alquimista se tenía la creencia en que debería existir una fuerza vital, inherente a la naturaleza de los seres vivos, que permitiría la formación de los tejidos animales y vegetales. La química se tomaba como dividida entre dos mundos, el inanimado y el animado. Para adentrarse en el estudio de los complejos compuestos orgánicos, se buscaba aquella fuerza vital, que rara vez, se atribuía a un compuesto o elemento material, al ser esta búsqueda de carácter más esotérico que experimental. Al igual que la teoría del flogisto, la teoría de la fuerza vital representaba un obstácu-



lo epistemológico, para avanzar y dilucidar la composición química de la materia.

Más adelante, al perseguir intereses electroquímicos, se buscaba separar los compuestos en sus partes electropositivas y electronegativas, pero se encontraba que algunos grupos de átomos, de los que conformaban estos compuestos, mantenían su integridad en estas reacciones, sin dotarse de naturaleza eléctrica. A este tipo de átomos se les denominó radicales libres, siendo el mismo Berzelius, quien adaptó el nombre. El estudio de los radicales proveyó claves para la comprensión de los compuestos orgánicos.

Los experimentos para aclarar cómo se comportaban las sustancias orgánicas y cómo reaccionaban, originaron diversas teorías, hasta que por fin, se estableció un método para organizarlas estructuralmente, al concebir el átomo de carbono como pilar, sobre el cual reposara la naturaleza orgánica de la materia.

Friedrich Wolher (1800-1882), químico alemán y discípulo de Berzelius, conociendo que la urea era un producto presente en los desechos de los mamíferos, notó que al calentar cianato de amonio se formaban unos cristales, al analizarlos, demostró que correspondían a la urea. Este descubrimiento, aparentemente sencillo, fue fundamental para el desarrollo de la química orgánica: se había sintetizado un compuesto orgánico a partir de una sal inorgánica. A partir de ese momento, se pensó posible sintetizar compuestos orgánicos en un laboratorio, aceptándose que la fuerza vital, supuesto agente transformador de la ma-

teria animada, no era necesaria para lograr obtener los compuestos, que se creía que solo la naturaleza podía formar.

La teoría de los radicales tomó fuerza, cuando se logró comprobar que al utilizar ácido benzoico, un conjunto de los átomos que forman su molécula (el correspondiente, a lo que hoy se conoce como el radical benzoilo) participaba de la reacción sin descomponerse en nada más sencillo, como si fuera una unidad, combinándose de nuevas maneras, para formar otros compuestos.

Otros importantes avances se dieron de la mano de Wohler y su amigo Justus von Liebig (1803-1873), entre ellos, cabe rescatar: la producción del carburo de calcio y la síntesis del acetileno (un compuesto con una importancia industrial enorme, hoy en día).

Liebig, al trabajar con cianatos, encontró que las fórmulas químicas (es decir, el tipo y la cantidad de átomos en cada molécula) del cianato de plata y el fulminato de plata eran las mismas, pero sus propiedades físicas y químicas diferían enormemente (Ríos, 2011, s.p.). Este hecho tomaría una relevancia trascendental en el desarrollo de la química orgánica, al empezar a considerarse que, a diferencia de los compuestos inorgánicos, varios compuestos orgánicos diferentes podían presentar una composición química idéntica, en cuanto al tipo y la cantidad de átomos en cada molécula, pero diferente, de alguna manera, en la forma como se agrupaban los átomos en las moléculas. Era necesario desarrollar una teoría sobre los enlaces, para permitir



establecer de qué forma se estructuraban las moléculas orgánicas. Berzelius llamó isomerismo, al fenómeno que había encontrado su discípulo Liebig, para referirse a la existencia de diferentes conjuntos de acomodación de los átomos en las moléculas, que pueden tener algunos compuestos con fórmulas químicas idénticas.

Se sabía que al quemar completamente una muestra orgánica, se liberaba dióxido de carbono y agua; conocimientos traídos desde la época alquimista. Mediante una combustión completa era posible garantizar que ningún átomo de carbono permanecía en el material orgánico inicial y, de esta forma, era posible conocer la cantidad de carbono que contenía el compuesto orgánico estudiado, al determinar la cantidad de carbono presente en el dióxido de carbono liberado. Este razonamiento se convirtió en un hecho concreto mediante los estudios de Liebig: partiendo de la teoría de la combustión, se hizo posible analizar la composición de materiales orgánicos, por ejemplo, determinar la composición de nitrógeno que podía tener un compuesto, quemándolo completamente y midiendo los cambios de nitrógeno en el ambiente.

El estudio de los compuestos orgánicos llevó a relacionar la antigua teoría de la energía vital con un proceso oxidativo: los alimentos orgánicos, poseedores de energía química, eran oxidados para liberar dióxido de carbono, en un proceso tan común y familiar, como lo es la respiración. La fermentación, la combustión y la respiración, focos de estudio de la teoría del flogisto y, posteriormente, de la teoría de la combustión de Lavoisier, funcionaban similarmente.

La química orgánica abrió camino a aplicaciones industriales de mucha relevancia, incluso, algunas de ellas, como la producción de detergentes o jabones, tenían su origen en la Antigüedad, pero ahora podían ser entendidas y mejoradas. Michel Eugène Chevreul (1786-1889), químico francés, encontró la composición de las grasas: se trataba de una molécula de glicerol (también llamada glicerina), con tres cadenas ácidas acopladas, compuestas de hidrógeno, oxígeno y, por supuesto, carbono. Al entrar en contacto con un álcali, estas moléculas de grasa formaban un compuesto soluble en agua, con la propiedad de romper su tensión superficial, generando un efecto de detergencia y, por lo tanto, siendo útil para la limpieza y el aseo: el jabón. Estos compuestos, como se dijo anteriormente, ya eran usados en la Antigüedad, incluido, Egipto, donde la cosmética fue un arte y una técnica preponderante; los jabones se obtenían a partir de esta misma reacción ácido-base, sin que supieran teorizarla, al mezclar las grasas animales o vegetales con cenizas de plantas, las cuales presentan un pH alcalino.

Chevreul sintetizó diversos ácidos grasos, entre ellos, el ácido oleico, el cual se encontraba en muchos aceites y de ahí derivó su nombre: "óleum" = aceite; el ácido butírico, componente de la mantequilla; los ácidos caproico y cáprico, encontrados en la leche de la cabra; y el ácido esteárico, fundamental en la elaboración de productos cosméticos como cremas o emulsiones (Ríos, 2011, s.p.). La fabricación de velas se impulsó, debido a que ya no se utilizaría el sebo o grasa común para servir de combustible, sino ácidos grasos, especialmen-



te, la estearina, lo que permitió una mejor iluminación y evitó el desagradable olor que desprendían los quinqués o lámparas, que utilizaban grasa pura (en esta época no se conocía la electricidad para iluminar las casas o las calles, toda luz artificial venía de las velas).

La obtención de la urea como demostración indiscutible de que es posible sintetizar compuestos orgánicos y que debía descartarse la teoría de la fuerza vital, no caló en todos los científicos de la época; solo fue admitida cuando se logró sintetizar el ácido acético, por parte de Adolph Wilhelm Hermann Kolbe (1818-1884), a partir de compuestos aceptados como inorgánicos. Este químico alemán sostenía que era posible obtener todos los compuestos orgánicos, a partir del dióxido de carbono. Esta idea, un poco exagerada, permitiría predecir la existencia de compuestos nunca antes aislados, entre ellos, los alcoholes terciarios y secundarios, y estaría marcando el papel fundamental del carbono en la composición de todas las moléculas orgánicas.

Quizás la vida cotidiana de nuestras civilizaciones modernas, que funciona casi de manera automática, en lo que tiene que ver con el uso de los productos elaborados, gracias a la ciencia, no reconoce lo importante que fueron estos personajes para que nosotros, tal vez, porque el valor práctico sustituye el valor histórico y, hoy en día, nos comportamos como simples consumidores de la técnica. Podemos disponer de elementos tan esenciales en nuestras vidas como la electricidad, los combustibles, jabones, cosméticos, alimentos, abonos y fertilizantes usados en la agricultura, en-

tre otros, gracias a estos hombres; nombrando aquí solamente a Hermann Kolbe, autor responsable de la síntesis del ácido salicílico, que es la base de una familia de compuestos muy usados en nuestras vidas: los medicamentos, entre ellos, la aspirina (cuyo compuesto activo es el ácido acetilsalicílico).

Así como estaba instaurada la tabla periódica como respuesta a la necesidad operativa de nombrar y clasificar los diversos elementos químicos, la gama de compuestos orgánicos que estaban siendo obtenidos, obligó a los científicos a diseñar un método para nombrar y estructurar todo el abanico de los compuestos presentes en la materia orgánica.

Jean Baptiste André Dumas (1800-1884), químico francés, fue un hombre conocedor de la química que estaba emergiendo y en sus experimentos buscaba, ante todo, el papel que jugaban los compuestos orgánicos en los seres vivos. Encontró que el yodo era indispensable en la dieta humana y que su carencia podía afectar la glándula tiroides, lo que ocasionar enfermedades como el Bocio. También refutó la idea de que los animales producían urea en sus riñones, al encontrar este compuesto en la sangre de animales, que tenían extirpados sus riñones, concluyendo que la función de estos órganos no era producirla, sino eliminarla. Dumas fue autor de un método para determinar pesos moleculares y atómicos, a partir de gases o vapores, debido a que estos pesos eran directamente proporcionales a la densidad de los gases. Resulta increíble que haya desarrollado este método, en épocas, donde la ciencia apenas



empezaba a aclararse. Este método, incluso, se utilizaba en la enseñanza escolar, tal vez con la firme convicción, de que el carácter científico se forja de la mano de la aprehensión de los conceptos, por medio de la evidencia experimental y no solo por la teorización de los conceptos y su enseñanza floja. *La fenomenología en la ciencia es fundamental, para que los estudiantes no aprendan, porque aprender implica olvido, sino aprehendan, porque aprehender implica asimilar.*

El gran descubrimiento de Dumas fueron las reacciones de sustitución. Antes de esto, las reacciones químicas se explicaban desde la teoría dualista defendida por Berzelius, donde la parte electropositiva de la materia se unía a la parte electronegativa, de esta forma se entendía la formación de sales en las reacciones de neutralización y la deposición electroquímica. El modelo de Berzelius sirvió para fundamentar las reacciones iónicas, pero descartaba la unión entre átomos del mismo elemento, lo que era común en los compuestos orgánicos, por ser de la misma naturaleza eléctrica. Más adelante, se determinó que estas uniones serían del tipo covalente, lo que se desconocía en la época de Berzelius. Los descubrimientos de este autor son grandes logros de la ciencia, entre ellos el fenómeno de alotropía (los elementos pueden agruparse y expresarse en distintas formas físicas, como lo hace el carbono, en materiales tan diferentes como el grafito y el diamante) y la catálisis (alteración de la velocidad en las reacciones, por la presencia de una sustancia que no afecta el producto esperado, aunque también la temperatura, la presión y la concentración

pueden modificar esta velocidad); sus ideas permitieron elaborar métodos de clasificación de los compuestos. Pero Berzelius se tropezó con el comportamiento de los compuestos orgánicos y sus ideas no encajaban en los fenómenos encontrados.

El descubrimiento de las reacciones de sustitución se dio, como suele pasar en la historia de la ciencia, de manera casi accidental. Sucede que en la fabricación de velas, se solía usar cloro para blanquearlas y darles una apariencia mejor, pero al encenderlas se liberaba un humo irritante a los ojos e, incluso, a la piel. Dumas se percató de que el cloro que quedaba en la vela formaba ácido clorhídrico, cuando la vela se encendía y para explicar esto, tendría que acudir a afirmar que un átomo de cloro debía sustituir a un átomo de hidrógeno en algún compuesto presente en la vela, formando el peligroso ácido gaseoso. Incluso, para apoyar su descubrimiento, logró hacer reaccionar diversos compuestos orgánicos con cloro, formando el conocido cloroformo, demostrando que los átomos de cloro reemplazaban los átomos de hidrógeno al actuar como radicales libres, para formar el ácido clorhídrico.

El método para calcular los pesos moleculares de Dumas, que también aplicó Wolher, permitiría reforzar una teoría sobre la difusión de los gases, creada por Thomas Graham. Al estudiar diferentes gases y su difusión en el aire, Graham encontró que la velocidad con la que se difundían era inversamente proporcional a la densidad del gas. De esta manera, al relacionar los pesos moleculares y las densidades, se estaría utilizando el método de Dumas y



Wohler, lográndose la corroboración de la composición química de los compuestos.

Tal vez fue Graham quien comenzó a establecer métodos físicos en los estudios químicos, buscando relacionar parámetros como la densidad, la velocidad de difusión, la concentración, entre otros, con la composición química y en esto no estaba equivocado. Dos de sus mayores aportes a la química fueron el descubrimiento de las partículas coloidales y del fenómeno de la ósmosis. A los coloides los descubrió trabajando con líquidos en contacto con membranas de poros muy pequeños, buscando entender la difusión de los líquidos, cuando se disponían soluciones de un lado de la membrana y agua pura del otro. Graham evidenció que las sustancias que formaban cristales; por ejemplo, las sales y el azúcar, lograban pasar más fácilmente por los pequeños poros, que las sustancias como el almidón y la goma o cola de pegar (Ríos, 2011, s.p.). A las sustancias que demoraban en atravesar la membrana las nombró coloides, debido a que para él, la goma de pegar representaba el tipo de sustancias con este comportamiento. El origen de su nombre venía del griego *cola*.

En cuanto al descubrimiento de la ósmosis (*osmós* = "impulsar"), Graham lo evidenció en los mismos procedimientos que utilizó con las membranas porosas: al ubicar agua pura de un lado de la membrana y una solución acuosa del otro lado, se esperaría, desde la teoría de la difusión, que el soluto del lado de la solución viajara a través de la membrana hacia el agua y que tratara de equilibrar las concentraciones a lado y lado. El agua, entonces, quedaría como una solu-

ción de dicho soluto. Pero esto no ocurría con todos los solutos: para los coloides, al finalizar el experimento, el agua no se había convertido en una solución, sino que se conservaba pura, pero se hallaba en menor cantidad, por lo tanto, eran las moléculas de agua las que debían haber migrado al otro lado de la membrana, intentando reducir la concentración de la solución para acercarse a un equilibrio. Esto sucedía, porque el tamaño de los poros de la membrana no permitía el paso de algunos solutos (como en el caso de los coloides), pero sí el de sustancias como el agua. En síntesis, en la ósmosis, las concentraciones a lado y lado de la membrana tratan de igualarse por medio de la migración del solvente; mientras que en la difusión, se realiza por medio de la migración del soluto.

La nomenclatura moderna para clasificar los compuestos químicos orgánicos, tiene su origen en la teoría de los tipos. Se consideraba que todos los compuestos podían pensarse como sustituciones de tipos de moléculas inorgánicas como las siguientes: hidrógeno, ácido clorhídrico, agua y amoníaco, donde podían ser sustituidos el oxígeno del agua, el cloro del ácido, el hidrógeno del amoníaco y un átomo de hidrógeno de la molécula de hidrógeno por otros átomos, para formar todas las sustancias orgánicas. De esta forma, se clasificaban los compuestos orgánicos como los alcoholes, ácidos, óxidos, éteres y sulfuros como compuestos derivados del agua; los yoduros, cloruros, bromuros, cianuros y fluoruros como derivados del ácido clorhídrico; los hidrocarburos como derivados del hidrógeno; y las aminas, fosfuros, arseniuros y amidas como derivados del amoníaco.



La nomenclatura moderna abandonó el nombre de *tipos* y lo reemplazó por la categoría de *grupos funcionales*. Un grupo funcional es un conjunto de átomos específicos, que normalmente incluyen átomos diferentes al carbono y el hidrógeno, que se unen a cadenas de carbono e hidrógeno, para componer las diferentes familias de compuestos orgánicos. Por ejemplo, el grupo funcional alcohol (OH) se puede unir a una cadena carbonada (simbolizada como R), para formar los compuestos que conforman la familia de los alcoholes (R-OH). Otras familias orgánicas son las cetonas (R-C-R'), las aminas (R-NH₂), los haluros (R-X, donde X es un halógeno), los ácidos carboxílicos (R-COOH), los aldehídos (R-CHO), entre otros. A partir de la combinación de varios grupos funcionales se forman moléculas orgánicas tan complejas como los aminoácidos.

La química orgánica permitió entender que, al lograrse sintetizar compuestos que se consideraban meramente producto de los seres vivos, era posible obtenerse cualquier compuesto que pudiera establecer teóricamente. Pierre Eugène Marcellin Berthollet (1827-1907) logró sintetizar, por primera vez en la historia, un compuesto artificial: una grasa que no existía en la naturaleza; lo logró a partir del glicerol y tres ácidos carboxílicos. Berthollet se dedicó a la síntesis orgánica y legó muchos procesos de obtención de compuestos químicos de gran utilidad, entre ellos, el del acetileno, el fenol y el benceno.

Por último, considerando que para abordar la química orgánica en su complejidad, se necesitaría un tratado extenso y sustan-

cioso, y abogando, más bien, a un esbozo general de su impacto en el desarrollo de la industria química, vamos a dedicar este espacio a tratar la teoría de la valencia, debido a que fue esta la que permitió entender realmente cómo se enlazaban los compuestos orgánicos, sin tener que recurrir a la teoría de la afinidad iónica.

Friedrich August Kekulé von Stradonitz (1829-1896) fue quien permitió abandonar la tradición de la teoría de los tipos, para establecer una teoría estructural de los compuestos químicos orgánicos. Una de sus aportaciones más importantes a la química fue la fórmula cíclica hexagonal para la molécula del benceno, que según cuenta la historia, la dedujo después de un sueño.

Kekulé, basándose en la tetravalencia del carbono, idea que estaba en vigor, demostró cómo sus átomos podían enlazarse entre sí y formar cadenas complejas. La presencia de compuestos isómeros parecía explicarse, a partir de las posibles organizaciones de los átomos de carbono al unirse entre sí. Los procesos experimentales incluían la posibilidad de encontrar el número de átomos presentes y conocidos los pesos relativos, como también las proporciones en las cuales deberían estar los diferentes elementos, se podía plantear la composición de un compuesto, pero no la forma espacial como se organizaban los átomos en la molécula.

La estructura cíclica del Benceno no se permitía explicar con la tetravalencia del carbono, pero al plantear la posibilidad de tener enlaces dobles o triples, parecía acla-



rarse el problema. De esta forma, Kekulé propuso una estructura hexagonal con enlaces simples y dobles alternados entre los átomos de carbono. Estos enlaces debían permitir un efecto de resonancia, es decir, no tenían que permanecer fijos entre los mismos carbonos, sino, que podrían cambiar de sitio constantemente. La posibilidad de la resonancia, basada en la existencia de enlaces dobles, permitía explicar el reducido número de hidrógenos, que de hecho tenía la molécula de benceno; de no existir enlaces dobles, el número de hidrógenos de cada molécula debería ser mayor.

En la comunidad química no se aceptaba fácilmente cualquier aporte que realizara un joven estudiante o, incluso, un ya distinguido personaje de ciencia; existía terquedad e, incluso, partidos "ideológicos", que buscaban defender asiduamente una teoría por encima de otra, aunque los aparentes hechos experimentales ya la estuvieran contradiciendo. Kekulé, en 1860, logró organizar el *Primer Congreso Internacional de Química*, al que acudieron los científicos más reconocidos de la época; se buscaba definir los conceptos más relevantes para la química y la manera procedimental de trabajar, que hasta la fecha divergían tanto, que generaban contradicciones. Allí se definieron los conceptos de átomo, mo-

lécula, peso equivalente, peso atómico y se estableció una nomenclatura uniforme para nombrar los compuestos químicos.

El auge de la investigación en química orgánica desembocó en aplicaciones, que constituyen muchos de los pilares industriales modernos: los plásticos, hidrocarburos, polímeros, colorantes artificiales, entre otros. La labor de todos estos personajes impulsó el estudio de la naturaleza y en alianza con todos los procesos que se tejían en las diferentes ramas de la ciencia (la física, biología, bioquímica, termodinámica, entre otras), generaron un vasto campo de investigación, que parece no tener límites, actualmente guiado de la mano de la tecnología. De esta forma, debe darse su lugar en la historia a hombres como: Wilhem Adolf von Baeyer, por la síntesis del colorante índigo; y Hermann Emil Fischer, por la composición de los azúcares y el famoso reactivo que lleva su nombre, que hasta la fecha, ha sido usado en cientos de aplicaciones químicas. Por último, cabe mencionar simplemente que la química orgánica permitió descifrar el código genético a partir del estudio de la purina, a partir de la cual se puede llevar a cabo la síntesis de compuestos como la cafeína, teobromina (alcaloide del chocolate), teofilina, guanina y adenina.



Conclusiones



La sofisticación tecnológica que actualmente conocemos, al igual que el avanzado grado de industrialización, se basan en un dominio de las aplicaciones científicas. En palabras que sean coherentes con este trabajo, equivaldría a decir que los conceptos originarios del pensamiento precientífico se han consolidado y extrapolado a un uso productivo. La historia nos recuerda cómo evolucionó el pensamiento humano y de qué forma se fueron superando los paradigmas; nos hace conscientes del innecesario imperativo de una verdad absoluta y, más bien, nos invita a recorrer la historia del conocimiento humano, en un sendero de sentidos e interpretaciones.

Reconocer, en el surgimiento de la química, que los errores o equivocaciones acompañaron el curso del desarrollo científico, permite implantar una huella humana a toda la labor de construcción del conocimiento. El conocimiento del mundo y sus fenómenos ocurre debido a que el hombre puede asombrarse y no dejando pasar de largo



un acontecimiento, se adentra en su contemplación como primer momento, para reflexionarlo y permitirse entenderlo. Una vez la naturaleza se manifiesta, el hombre reconoce en ella patrones de comportamiento y apoyado de un lenguaje matemático, se propone describirla y modelarla, siempre y cuando, el lenguaje alcance los límites de lo demostrable, porque sin lenguaje adecuado, no hay ciencia.

Quizás el valor que subyace en toda formación profesional radica en una enseñanza del lenguaje necesario, para entender y comprender los fundamentos de las posteriores aplicaciones específicas del saber. Es así como un ingeniero o un médico, dos profesionales que aparentemente están formados en visiones del mundo y de la vida diametralmente opuestas, parece que solo los distanciara el lenguaje adoptado en su proceso de formación académica. Ninguno de los dos posee la verdad, pero sí poseen un método propio de su área

específica, construido por medio de la experimentación y el lenguaje apropiado, para que esta empírica se pueda ejercer y aplicar. Mientras los saberes tienden a especializarse, siempre existirá algo común entre todos: nacen bajo la mano del hombre y crecen por acción del mismo ser humano, la pérdida del carácter humano e integrador de los saberes, solo puede ser una amputación del gran cuerpo del conocimiento universal, por eso, este trabajo es una invitación a desempolvar los orígenes del conocimiento, los procesos de construcción del lenguaje científico, los retazos de la historia, que permiten comprender el surgimiento de un concepto desde su reflexión y posterior confrontación con los hechos experimentales, para que de esta forma, la ciencia retorne a su valor humano y logre entenderse desde una perspectiva integradora, cuyo propósito es permanecer en el camino de la vida como asombro, gozo y utilidad y no solo como presunción de verdad o herramienta de poder.



Referencias bibliográficas

- Acosta, W. (s.f.). *Cursos virtuales*. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://www.monografias.com/trabajos11/cursosvr/cursosvr.shtml>
- Alfonso, I. (2002). *Enseñanza a distancia y el modelo educativo virtual*. En Revista cubana de educación superior. V. 22, No. 2. pp. 45-54.
- Asimov, I. (1975). *Breve Historia de la Química*. Madrid: Alianza.
- Bertomeu, J. R. (2007). *Teaching History of chemistry in Europe*. consultado en abril 21 de 2013 de http://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2015/07/Nov07TeachingHistReport_tcm23-108306.pdf
- Bertomeu, J. R. (s.f.). *Bibliografía de historia de la química*. Recuperado en abril 11 de 2013 de <http://www.uv.es/bertomeu/biblio.htm>
- Bertomeu, J. R.; Esteban, S.; Freijanes, E.; García, A.; Muñoz, R.; Nieto, A.; Pinto, G.; Román, P. y Toca, A. (2007). *Propuesta de programa de asignatura Historia de la química*. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://www.ehu.es/proman/documents/20070327ProgramaHistoriaQuimicaVersionDefinitivaMarzo20071.pdf>
- Bertomeu, J. R. y García, A. (2008). *Historia e la química: Pequeña guía para navegantes. Parte I*. En Anales de la Real Sociedad Española de Química. V. 104, No. 1. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/24356/1/2008_Bertomeu_GarciaBelmar_An_Quim.pdf
- Bertomeu, J. R., y García, A. (2008). *Historia de la Química: Pequeña guía para navegantes. Parte II*. En Anales de la Real Sociedad Española de Química. V. 104, No. 2. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/24357/1/2008_Bertomeu_GarciaBelmar_An_Quim_2.pdf
- Boyle, R. (1661). *Sceptical Chymist*. Londres: J. Cadwell y J. Crooke. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://www.gutenberg.org/files/22914/22914-h/22914-h.htm>
- Brock, W. H. (1998). *Historia de la química*. Madrid: Alianza.





- Camacho, J. y Quintanilla, M. (2008). *Resolución de problemas científicos desde la historia de la ciencia: Retos y desafíos para promover competencias cognitivas lingüísticas en la química escolar*. En: *Ciência & Educação*. V. 14, No. 2. Recuperado en marzo 20 de 2014 de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v14n2/a02v14n2.pdf>
- Chamizo, J. A. (2010). *Introducción experimental a la historia de la química*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado en abril 3 de 2014 de http://depa.fquim.unam.mx/SHFQ/docs/IntrExpHistQuim_JAC.pdf
- DeKosky, R. y Allchin, D. (Ed.) (2008). *An introduction to the history of science in non-western traditions*. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de http://hssonline.org/resources/teaching/teaching_nonwestern/
- Duschl, R. (1997). *Renovar la enseñanza de las ciencias: importancia de las teorías y su desarrollo*. Madrid: Narcea.
- Echeburúa, E. (1999). *¿Adicciones sin drogas?* Bilbao: Desclee de Brouwer.
- Equipos y Laboratorios de Colombia (2012). *El gas radón*. Recuperado en octubre 12 de 2014 de http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3024
- Faraday, M. (2004). *La historia química de una vela*. Madrid: Nivola libros.
- Fulcanelli. (s.f.). *Las moradas filosóficas*. Muñoz Moya.
- Furst, P. (2002). *Alucinógenos y cultura*. Fondo de Cultura Económica.
- Gallego, R.; Pérez, R.; Uribe, M.; Cuéllar, L. y Amador, R. (2004). *El concepto de valencia: su construcción histórica y epistemológica y la importancia de su inclusión en la enseñanza*. En: *Ciência & Educação*. V. 10, No. 3. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v10n3/18.pdf>
- Gebelein, H. (2002). *Alquimia*. Bogotá: Pinter Latinoamericana.
- Giere, R. (1992). *La explicación de la ciencia: un acercamiento cognitivo*. México.
- Gil, D. (1991). ¿Qué hemos de saber o saber hacer los profesores de ciencias? En *Enseñanza de las ciencias*. V. 9, No. 1. pp. 69-77.
- González, A. (2011). *Los paradigmas según Thomas Kuhn*. Arequipa: Universidad Privada Telesup.
- Gordon, M. y. (1985). *Relapse prevention*. Nueva York.
- Guerrero, J. R. (s.f.). *Azogue: Revista electrónica dedicada al estudio histórico crítico de la alquimia*. Recuperado el 4 de abril de 2013, de <http://www.revistaazogue.com/>
- Guirao, P. (s.f.). *La alquimia desvelada*. Teorema S.A.
- Hedesan, J. (s.f.). *Society for the History of Alchemy and Chemistry*. Recuperado el 28 de marzo de 2013, de <http://www.ambix.org/>
- Hohenhircn, A. F. (s.f.). *Obras completas (Opera Omnia)*. Schapire.
- Institut de Batxillerat San Vicent Ferrer, A. (s.f.). *La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química*. En Besol, J. y Traver, M. *Historia y epistemología de las ciencias*. Valencia.
- Izquierdo, M. (2005). *Com fer problemàtiques els problemes que no en són proa*. Noves y Universidad Autónoma de Barcelona. pp. 45-52.
- Lakatos, I. (1983). *La metodología de los programas de investigación científica*. Madrid: Alianza.



- Max-Neef, M. (s.f.). *Transdisciplina, para pasar del saber al comprender*. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://disi.unal.edu.co/~lctorress/PSist/PenSis07.pdf>
- Morahan-Martin, J. (2000). *Incidence and correlates of pathological Internet use among college students*. En *Computers in human behavior*. V. 16, No. 1. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563299000497>
- Nieto-Galán, A. (2010). ¿Para qué sirve la historia de la química? Una reflexión sobre el pasado de una profesión. En Chamizo, J. (Coord.) *Historia y filosofía de la química*. México: UNAM y Siglo XXI.
- Padilla, K. (2010). *Evolución histórica del concepto de entropía y sus implicaciones en la enseñanza*. En Chamizo, J. (Coord.) *Historia y filosofía de la química*. México: UNAM y Siglo XXI.
- Peset, J. (2009). *Casi cien años de historia de la ciencia (o de las ciencias)*. En *Asclepio*. V. 61, No. 2. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://asclepio.revistas.csic.es/index.php/asclepio/article/view/292/288>
- Pérez Barquero S. A. (s.f.). *Historia de la destilación*. Recuperado en octubre 8 de 2014 de http://www.alambiques.com/historia_de_la_destilacion.htm
- Pérez, J. (2005). *Evangelista Torricelli. De la bomba de agua a la invención del barómetro*. En: *El día* (16 de abril de 2005). La Laguna, España. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://juperez.webs.ull.es/Torricelli2005.pdf>
- Pontificia Universidad Javeriana (s.f.). *Ciencia árabe*. Recuperado en octubre 10 de 2014 de <http://pioneros.puj.edu.co/cronos/crono2/arabes/alquimia.htm>
- Ríos, J. (2011). *Químicos y química*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Sagrera, J. E. de (1991). *La química sagrada: de la alquimia a la química en el siglo XVII*. Madrid: Akal.
- Sánchez-Carbonell, X. (2008). *La adicción a internet y al móvil: ¿moda o trastorno?*. En *Adicciones*. V. 20, No. 2. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=289122057007>
- Selva, T. de la (2008). *De la alquimia a la química*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Solbes, J. y Traver, M. (1996). *La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química*. En *Enseñanzas de las ciencias*. V. 14, No. 1. pp 103-112.
- Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. (2010). *Ingeniería Química: Plan de estudios*. Recuperado en noviembre 11 de 2014 de http://www.fi.uba.ar/archivos/Actualizacion_2010_Plan_1986_Quimica_Modificado.pdf
- Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Química. (2008). *Proyecto Educativo. Programa de Ingeniería Química*. Medellín: UPB.
- Vargas, E. (s.f.). *Química, leyes y conceptos*. Curso del Departamento de Química de la Universidad de los Andes. Recuperado en abril 21 de 2013 de http://quimicapr.uniandes.edu.co/images/pdf/leyes_conceptos.pdf

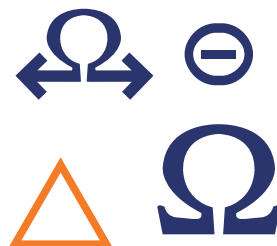


 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>	<p>SU OPINIÓN</p>	
<p>Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto. La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos. Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565 o vía e-mail a editorial@upb.edu.co Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, e-mail y número telefónico.</p>		

Esta obra se publicó
en archivo digital en el mes
de septiembre de 2017.

Este libro se origina en un trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico, que obtuvo Mención de Honor por su alta calidad. El trabajo de grado tiene por nombre *Curso Historia de la Química: propuesta para fortalecer el currículo académico*, y pretende ser una herramienta dinámica que acerque al estudiante a una perspectiva humana e integradora de lo que fue y es la química, y en el que se tienen como punto de partida los hechos históricos, que permitieron que fenómenos complejos u ocultos fuesen explicados a través de la observación incisiva del ensayo y el error, y, muchas veces, gracias a la casualidad o al accidente. Así pues, se hace referencia al nacimiento de la química desde los albores de la existencia del hombre, que cruza los puentes de las civilizaciones y reconoce el valor de personajes que contribuyeron con su inquietud natural a la evolución de lo que siglos después ha de considerarse como química moderna.

El objetivo del libro, así como el del trabajo de grado, está sostenido sobre la misión de la Universidad y, específicamente, de la UPB, la cual es brindar una educación interdisciplinaria y contextualizada y no solo especializada en un área particular de trabajo. Por este motivo, el curso que se propone, se basa en la historia del desarrollo de una ciencia que busca dinamizar la educación para permitir una mayor comprensión de los conceptos, las teorías, los métodos y el lenguaje científico, y una más acertada aplicación del conocimiento científico en el desempeño profesional.



ISBN: 978-958-764-427-2



9 789587 644272

