

Aproximación histórica a momentos clave en el desarrollo de la química

Oportunidades para su enseñanza

Juan Quílez Pardo

Resumen: Se realiza un breve análisis histórico de la química desde sus orígenes hasta principios del siglo xx. El objetivo de este estudio supone proporcionar al profesorado de niveles preuniversitarios elementos de interés que le posibiliten introducir la historia de la química en sus clases para facilitar su aprendizaje. Esta aproximación histórica se ha dividido en tres epígrafes: 1) los orígenes de la química moderna; 2) inicios de la teoría atómica y el desarrollo de la química orgánica; 3) diálogos de la química con la física: química física y química cuántica.

Palabras clave: historia de la química; enseñanza de la química; química preuniversitaria.

Abstract: A brief historical analysis of chemistry is carried out from its origins to the beginning of the 20th century. The aim of this study is to provide pre-university level chemistry teachers with elements of interest that may allow them to introduce the history of chemistry in their classes to facilitate its learning. This historical approach consists of three main sections: 1) the origins of modern chemistry; 2) the beginning of the atomic theory and the development of organic chemistry; 3) conversations of chemistry with physics: physical chemistry and quantum chemistry.

Keywords: history of chemistry; teaching chemistry; preuniversity chemistry.

INTRODUCCIÓN

La enseñanza y el aprendizaje de la ciencia, en general,^[1-3] y de la química,^[4-8] en particular, se pueden beneficiar mediante el conocimiento de su historia. Este estudio histórico permite proporcionar a los profesores de química las bases ontológicas y epistemológicas de los conceptos químicos que cimentan esta disciplina científica. Estos fundamentos los pueden utilizar para introducir en sus clases aspectos básicos acerca de cómo se ha ido construyendo el conocimiento químico, lo que posibilita reflexionar con los estudiantes sobre cómo hemos llegado a saber lo que sabemos en

la actualidad^[9] de las sustancias químicas y de sus reacciones. Este análisis ayuda a presentar los distintos intentos de modelizar el estudio de aspectos concretos de la realidad desde diferentes presupuestos teóricos. El examen de la evolución histórica de estas conceptualizaciones permite, entre otros aspectos:

- a) Comprender el significado otorgado a un término científico en un contexto particular.
- b) Estudiar la evolución del significado de los conceptos químicos, encontrando de esta forma casos que ejemplifiquen el carácter provisional de los conocimientos científicos.
- c) Conocer las distintas conexiones establecidas entre las distintas ideas, su organización y jerarquía.
- d) Enjuiciar las controversias producidas.
- e) Apreciar tanto las limitaciones como los éxitos producidos.
- f) Valorar el avance científico como producto de un esfuerzo colectivo de científicos que utilizan un conocimiento que, por ser público, se encuentra sometido al juicio crítico de los demás.
- g) Entender la necesidad de construir otros conceptos nuevos.



J. Quílez Pardo

Departamento de Física y Química
IES Lluís Vives. Valencia
C-e: jquilez@uji.es

Recibido: 06/04/2021. Aceptado: 20/05/2021.

En el intento de describir, explicar, predecir y controlar las propiedades químicas de la materia. Estas discusiones de clase posibilitan que los alumnos eviten o superen errores conceptuales, así como que construyan los conocimientos químicos desde una base sólida.^[10-11]

A pesar de estos beneficios pedagógicos de inclusión de los aspectos históricos que fundamentan el desarrollo del conocimiento científico, numerosos trabajos señalan que la química se suele presentar a los alumnos desde una perspectiva empirista, dando, por tanto, una imagen pobre de lo que representa la química como disciplina científica.^[12] Además, una presentación muy extendida es la que enfatiza el aprendizaje memorístico de los productos finales de esta ciencia, sin considerar los procesos de construcción de este conocimiento.^[13] Esta visión estática de la química proporciona una imagen simple de esta disciplina e impide conocer los factores que han propiciado los distintos cambios producidos, así como el proceso dinámico de construcción realizado en cada caso concreto.^[1]

En el contexto español, un análisis de los libros de Física y Química de ESO y de bachillerato^[14] reveló que la historia de la química presente en estos materiales contribuye a generar una imagen individualista, aproblemática, empirista y velada de la química como actividad humana. Particularmente, otros estudios han analizado las deficiencias epistemológicas y ontológicas que manifiestan estos libros de texto en su presentación de los modelos atómicos^[15] y en la discusión de ideas asociadas al concepto de equilibrio químico.^[16]

Por otro lado, algunos autores^[17] señalan la escasa preparación inicial del profesorado de química que le pueda permitir usar adecuadamente la historia de la química en sus clases. Además, en estrecha relación con la presentación que suelen realizar muchos libros de texto,^[13] los profesores evitan, en general, el empleo de la historia de la ciencia y, por tanto, no analizan los procesos de construcción de los conocimientos científicos.^[18]

ESTRUCTURA Y OBJETIVO

Tomando como referencia los análisis realizados por Jensen^[19] y Chamizo,^[20] en la síntesis histórica que sigue sobre momentos clave tanto en el origen como en el desarrollo de la química hasta los primeros años del siglo xx, se han realizado agrupaciones y clasificaciones que faciliten la exposición. Es evidente que ello ha implicado una selección en lo que respecta a la evolución de ideas que se presentan, los hechos asociados y sus protagonistas. En consecuencia, han quedado sin tratar las contribuciones de muchos otros científicos; tampoco ha podido tener el espacio que se merece el análisis de otros campos importantes de estudio. Además, cuando esto último sí que se ha hecho, necesariamente la presentación realizada no ha tenido el grado de profundidad que posibilite la comprensión completa de todos los elementos conceptuales

y metodológicos asociados. Sin embargo, esta agrupación permite, desde una perspectiva básica, proporcionar una visión general, ordenada y sistemática de la evolución de esta rama de la ciencia desde su nacimiento hasta los primeros años del siglo xx. Se ha intentado, en consecuencia, evitar transmitir simplificaciones que distorsionen procesos de construcción complejos que requerirían mucho más espacio para su análisis profundo. En este sentido, se debe mencionar que algunos de los puntos tratados en este trabajo ya han sido analizados con mayor detalle en otros estudios previos.^[21-25] También se debe señalar que la inclusión de pequeñas lecturas de la historia de la química^[26] de algunos aspectos examinados en este artículo se ha empleado previamente como recurso didáctico en la introducción de conceptos y procesos para alumnos de Bachillerato.^[27-28] En concreto, la estructura de este trabajo se corresponde con los siguientes epígrafes:

1. Los orígenes de la química moderna.
2. Inicios de la teoría atómica y desarrollo de la química orgánica.
3. Diálogos de la química con la física: química-física y química cuántica.

La bibliografía que acompaña a este trabajo puede servir de base para un estudio posterior en profundidad pausado y amplio. De esta forma, con este breve examen histórico y el material que lo soporta se ha pretendido realizar un aporte para el profesorado de química de niveles preuniversitarios que le posibilite encontrar elementos de interés que le animen a profundizar en su conocimiento histórico de la química. Estos aspectos básicos pueden ayudarle a encontrar la necesidad y a valorar la utilidad de introducir la historia de la química en sus clases con la intención de apoyar y de guiar a su alumna-do en la construcción de los conocimientos que se estén trabajando en clase.^[29]

LOS ORÍGENES DE LA QUÍMICA MODERNA

Los pilares de la química moderna

El “nacimiento” de la química moderna fue posible gracias a la gran cantidad de conocimiento empírico acumulado previamente. Podemos mencionar como ejemplos la utilización de pigmentos y de tintes para las prendas de vestir, la fabricación de jabón y de explosivos, la obtención de perfumes y cosméticos, la construcción de nuevos aparatos y el desarrollo de técnicas experimentales relacionadas con la cerámica y la obtención y tratamiento de metales. Todo este conocimiento previo provenía básicamente de las contribuciones realizadas por la alquimia, la metalurgia, y la medicina y la farmacia^[30-32] (Figura 1).



Figura 1. Los pilares de la química moderna^[30]

Alquimia

El interés de los alquimistas se centraba en la transmutación de los metales en plata y oro y en encontrar el “elixir de la vida”. Sus diferentes tradiciones (china, hindú, griega, egipcia) desarrollaron todo un saber práctico en forma de procedimientos (destilación, sublimación, disolución, filtración, calcinación, etc.), así como otros más específicos como el de las aleaciones metálicas (las famosas espadas de Toledo) o el tratamiento del vidrio. También progresaron en el conocimiento de técnicas acerca de la obtención y el comportamiento de sustancias: álcalis (hidróxido de potasio y de calcio), ácidos (acético), alcohol, etcétera. A partir del siglo XIV los alquimistas medievales aprendieron a preparar ácidos fuertes (ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico) y desarrollaron técnicas de autenticación del oro (agua regia).

La alquimia árabe se encuentra compilada en los escritos del siglo X atribuidos a Jabir ibn Hayyan (Geber en la tradición cristiana). Estos conocimientos encontraron continuidad en el mundo cristiano gracias a las traducciones del *corpus* árabe realizadas a partir del siglo XII. Geber defendió las ideas aristotélicas de los cuatro elementos y sus correspondientes cualidades. Este marco teórico fue un importante obstáculo que limitó el desarrollo de la alquimia.^[33] Otro impedimento que tuvo que superar la química moderna está relacionado con el lenguaje empleado por la alquimia, ya que utilizó la alegoría y la analogía como formas de expresión, desarrollando un vocabulario arcano y secreto para impedir la entrada de intrusos y ocultar información a los no iniciados.^[34]

Metalurgia

Por su parte, los metalúrgicos, a diferencia de los alquimistas, eran personas incultas, preocupadas fundamentalmente por el desarrollo de las artes prácticas

relacionadas con el tratamiento de los metales y de sus minerales. Eran artesanos interesados en el desarrollo de unas técnicas, sin que ello supusiera la existencia de ningún marco filosófico o conceptual que guiase su trabajo.

En el siglo XVI las operaciones relacionadas con la minería y la fundición alcanzaron una gran importancia. Entre los metalúrgicos se generó la necesidad de registrar los detalles técnicos de su oficio, lo que posibilitó un conocimiento práctico con el que instruir a los demás. Ello originó la publicación de los primeros manuales acerca de los procesos asociados a la obtención y tratamiento de los metales. Vanoccio Biringuccio (1480-1539) desarrolló un conocimiento práctico de la fundición de metales, que recogió en su *De la pirotechnia* (1540). En esta publicación ridiculizó las ideas alquimistas de producción de oro a partir de otros metales y describió las principales operaciones metalúrgicas (ensayo, refinado, aleación y fundición), para las que registró los detalles técnicos de la química aplicada en este campo. Por su parte, del médico Georgius Agricola (1494-1555), gracias a su conocimiento generado en su estrecho contacto entre mineros publicó el libro *De re metallica* (1556) en el que describía los ensayos de análisis de minerales y de refinado de los metales.

Medicina, farmacia y primeros pasos de la química como disciplina autónoma

El principal interés de los médicos y de los boticarios se centraba en el tratamiento de la enfermedad. Los orígenes de la química moderna relacionados con la medicina se conocen con el nombre de *iatroquímica*. El máximo representante de esta tradición es Paracelso (1493-1541). Este médico y sus seguidores son los que otorgan a la química un papel importante en la preparación de medicinas. Paracelso conmina a los médicos a que aprendan química; anuncia remedios milagrosos como la sal de mercurio con la que trata con éxito la sífilis y diagnostica el origen externo de ciertas enfermedades, como la “enfermedad de los mineros”, la silicosis.

El médico Jean-Baptiste van Helmont (1577-1640), es considerado como un representante destacado de la transición de la alquimia a la química.^[35] En su revisión cuidadosa de los escritos de Paracelso encontró muchos errores. Sus prácticas tenían un marcado carácter cuantitativo, empleando para ello la balanza, interesándose además por el estudio y caracterización de los gases. Esta práctica experimental sería origen de nuevos problemas y de nuevas técnicas: el equipamiento de los laboratorios empezó a enriquecerse con “campanas” destinadas a recoger e identificar los gases formados en las reacciones químicas.

Robert Boyle (1627-1691), influenciado por van Helmont, es otro de los autores impulsores del experimentalismo en la química. Sus rigurosos procedimientos experimentales, su interés por la química como campo de conocimiento autónomo, más allá de su relación con la

medicina, así como su definición de elemento químico, superando con ello las ideas aristotélicas, han supuesto considerar a Boyle como uno de los más destacados fundadores de la química moderna.^[35] En su libro *The Sceptical Chymist* (1661) presenta una imagen del químico escéptico, que pide demostraciones, en su objetivo de convertir a la química en ciencia respetable, basada en determinaciones cuantitativas y reproducibles. Como aspecto destacable resultó su clasificación experimental de las disoluciones ácidas, alcalinas y neutras, así como el desarrollo de indicadores. El estudio de las sales obtenidas por reacción de ácidos y bases marcaría una importante área de estudio de la química en el siglo XVIII.^[36]

La necesidad de transmitir el conocimiento de química generado por el interés que despertaron el reconocimiento y la preparación de sustancias propició la publicación de distintos manuales de química con fines pedagógicos, contribuyendo de esta forma a consolidar la química como disciplina.^[37] En el año 1597, Andreas Libavius (1540-1616) publicó el libro *Alchemia*, que es considerado el primer manual de química, en el que destaca su voluntad de enseñar distintos procesos experimentales. Si bien Libavius todavía creía en la idea de trasmutación, su libro es relevante por contener diferentes técnicas analíticas y métodos de laboratorio de preparación de medicamentos. Esa voluntad didáctica de enseñanza de la química la continuó unos años más tarde Jean Beguin (1550-1620) mediante la publicación en 1610 de su libro *Tyrocinium Chymicum (Química para principiantes)*. Nuevos autores contribuyeron durante el siglo XVII a la formación de médicos y boticarios mediante la publicación de sus propios textos de enseñanza de la química. Esta tarea se desarrolló fundamentalmente en el *Jardin du Roi* de París, en el que existían profesores encargados de impartir enseñanzas químicas. Christopher Glaser publicó *Traité de chymie* (1663) y Nicholas Lemery consiguió un gran éxito con su *Curs de Chymie* (1675), que alcanzó un total de treinta ediciones, traducándose al latín, inglés, alemán, italiano y español.

Estos esfuerzos iniciales de institucionalización de la química, materializada a través de los textos publicados para su enseñanza, fueron cristalizando en los siglos XVIII y XIX con la publicación de destacados manuales pensados para la formación de los químicos. Entre los autores más sobresalientes de este tipo de publicaciones que se mencionan en este trabajo se encuentran Lavoisier, Dalton, Berthollet, Mendeléiev, van't Hoff y Pauling.

Clasificación de las sustancias atendiendo a su reactividad relativa en torno al concepto de afinidad

La química de la primera mitad del siglo XVIII se centró fundamentalmente en el estudio experimental de dos tipos de reacciones:^[36,38]

- a) La formación de sales por reacción de ácidos y bases.

- b) Las reacciones de desplazamiento entre metales (que hoy clasificaríamos como redox).

El conocimiento empírico de las reacciones químicas desarrollado con anterioridad al siglo XVIII tuvo un intento de explicación teórica por parte de Isaac Newton. En el año 1704 publicó su libro *Optics*.^[39] En su cuestión 31 propuso que los procesos químicos de desplazamiento se debían a un cierto tipo de fuerzas de atracción de corto alcance, similares a las gravitacionales.

Por otro lado, el intento de sistematización de estas reacciones supuso el desarrollo de las denominadas tablas de afinidad química. Estas primeras ordenaciones son un claro ejemplo del papel esencial que a lo largo de la historia de la química han desempeñado para el desarrollo de su conocimiento (tanto desde el punto de vista pedagógico como del teórico) los distintos esfuerzos de organización de sustancias y de sus reacciones. La primera de estas taxonomías de reactividad relativa fue la tabla elaborada en 1718 por el científico francés E. F. Geoffroy (1772-1844)^[40] como guía de la práctica de laboratorio^[41] al tratar de sistematizar y ordenar el conocimiento existente sobre los cambios químicos, actuando de esta forma como un intento de compilación visual de todo el conocimiento experimental que se poseía acerca de las reacciones químicas, según los dos grupos de reacción señalados previamente. Esta visión empírica de la química como ciencia del laboratorio se encontraba muy arraigada en la época.

Si bien esta primera tabla tuvo escasa continuidad durante unos cincuenta años, a partir de 1775 la publicación de la tabla del químico sueco T. Bergman (1735-1784) dio un nuevo impulso a este tipo de clasificaciones de afinidades electivas. Esta tabla, así como varias de las que siguieron, tomó como marco teórico el intento de extender a la química el paradigma newtoniano. Como objetivo último se pretendía medir esas fuerzas de atracción que se ponían de manifiesto a corto alcance. La determinación de las distintas afinidades permitiría que la química pasase a ser una disciplina rigurosa equiparable a la mecánica.^[42] Entre otros, destacaron en este intento Wenzel, Elliot, Kirwan y Guyton de Morveau. Pero ese sueño newtoniano de medición de las afinidades químicas (cuantificar sus valores mediante ecuaciones matemáticas) no produjo los resultados esperados.^[33] A pesar de ello, la idea de fuerza newtoniana siguió dando soporte teórico a la explicación de las reacciones químicas hasta pasada la segunda mitad del siglo XIX, lo que impidió, como se verá más adelante, el avance del concepto de equilibrio químico en un primer momento hasta que nuevos elementos teóricos se pudieron ir incorporando.

La interpretación de las tablas de afinidad implicaba que todas las reacciones eran completas, estando teóricamente prohibido el proceso inverso de la reacción predicha en estas tablas. Como veremos, estas ideas se cuestionaron a partir de principios del siglo XIX con los trabajos de C. L. Berthollet (1748-1822), desarrollados

en muchos casos a gran escala^[43] e incorporados en su programa de enseñanza en la *École Normale*,^[44] lo que representó la base que inició la introducción de los conceptos relacionados con el equilibrio químico (reacciones incompletas y reversibles), expuestos, entre otros, en su libro *Essai de Statique Chimique* (1803).

Un origen para la química moderna. Hacia un marco teórico unificador y el empleo de un lenguaje preciso sobre sustancias elementales y compuestos

A principios del siglo XVIII el “aire” era considerado como un medio en el que tenían lugar las reacciones químicas. Los químicos de la época no se habían preocupado ni por establecer su composición ni por pesarlo.^[45] La situación cambió a partir de la construcción por S. Hales (1677-1761) del primer aparato diseñado para el manejo de gases. Hales conminó a los químicos al estudio de estas sustancias. Cincuenta años después de su invención, este instrumento se convirtió en una pieza corriente del laboratorio de química. La capacidad de medir cantidades de gas y de establecer su composición introdujo un elemento esencial para el desarrollo del pensamiento químico.

Aunque puede resultar algo simplificador, podemos situar el inicio de la química moderna a mediados del siglo XVIII a partir de las investigaciones fundamentales llevadas a cabo, entre otros, por J. Black (1728-1799), H. Cavendish (1731-1810), J. Priestley (1733-1804) y Carl W. Scheele (1742-1786) sobre el comportamiento y caracterización de los gases –*química pneumática*–,^[46] y de la síntesis conceptual liderada por A. L. Lavoisier (1743-1794) (Figura 2).

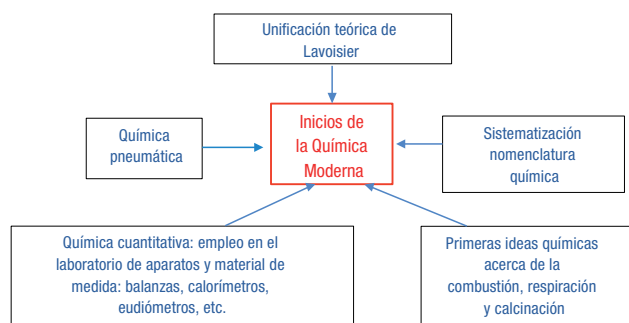


Figura 2. Principales factores que contribuyeron al nacimiento de la química moderna

Una teoría de la reacción química, denominada *teoría del flogisto*, que explicaba los procesos de combustión y calcinación, sirvió de marco de desarrollo de muchos procesos estudiados en los laboratorios de química en el siglo XVIII. Georg Ernest Stahl (1660-1734) supuso que todos los cuerpos inflamables contenían una sustancia (flogisto) que se desprendía y se perdía en la atmósfera en estos procesos químicos.

Por otro lado, el empleo sistemático de la balanza, de eudiómetros y gasómetros, así como otros instrumentos de medida,^[47] permitió que la química se empezara a consolidar como ciencia cuantitativa. Este carácter cuantitativo posibilitaba la reproducibilidad de los diferentes experimentos para su contrastación o refutación.

Antoine L. Lavoisier, destacado líder de la comunidad científica de la época, mandó construir y utilizó una gran cantidad de instrumentos y de sofisticados aparatos de laboratorio, mejorando la precisión de los ya existentes, con los que medir tanto las cantidades de reactivos como las de los productos formados, contribuyendo de forma decisiva a transformar la química en una ciencia cuantitativa.^[33] Además, desde el punto de vista teórico, reconoció que los procesos de combustión, calcinación y respiración, no eran sino manifestaciones de un mismo proceso (oxidación) en los que siempre participaba una misma sustancia, a la que denominó oxígeno. Esta nueva interpretación se enmarca en el contexto del proceso de construcción conceptual, metodológico y terminológico del descubrimiento de esta sustancia (oxígeno –Lavoisier–, aire desflogisticado –Priestley– y aire puro de fuego –Scheele–) realizado por sus tres protagonistas:^[48] el propio Lavoisier, defensor de la teoría del oxígeno, al establecer a esta sustancia como elemental y los otros dos, defensores de la teoría del flogisto (el sueco Scheele, que aisló el oxígeno, y el británico Priestley, que lo caracterizó).

Lavoisier, como miembro destacado de un grupo importante de investigadores, defendió su teoría de la reacción química en contraposición a la del flogisto. Este nuevo marco conceptual superaba una limitación importante de la teoría del flogisto al tener que admitir que en algunos procesos su masa era negativa.^[49] También cabe destacar que en su libro *Tratado elemental de química* (1789) incluyó el principio, ya conocido en la época, de conservación de la masa. El balance de las masas de los reactivos y de los productos le permitieron desarrollar sus importantes trabajos experimentales. Además, clasificó a las sustancias como simples y compuestas, lo que invitaba a los químicos a desarrollar no sólo métodos de estudio de su composición, sino que les sugería cómo concebir *a priori* posibles reacciones químicas.^[50] Todas estas nuevas ideas necesitaban la constitución de un nuevo lenguaje químico que fuese preciso, sistemático y normalizado.^[33-34] En este sentido, Lavoisier también participó en una propuesta de sistematización del lenguaje químico que consiguió mediante la publicación del *Méthode de nomenclature chimique* (1787) (publicado junto a Guyton de Morveau, Berthollet y Fourcroy), lo que supuso el abandono paulatino de la nomenclatura antigua (*azúcar de saturno, gas hediondo, sal de Inglaterra, vitriolo verde*, etc.). Ahora, la idea clave para nombrar los compuestos era la composición de cada sustancia y la proporción de sus constituyentes.

INICIOS DE LA TEORÍA ATÓMICA Y DESARROLLO DE LA QUÍMICA ORGÁNICA

Determinación de pesos atómicos y construcción de la primera tabla periódica

A principios del siglo XIX, John Dalton (1766-1844) formuló su teoría atómica que se materializó en su libro *A new system of chemical philosophy* (1808). Según este científico inglés, la materia estaba formada por átomos indestructibles e indivisibles, caracterizados por su masa. Esta característica cuantitativa propia, que podía determinarse de forma relativa, daba a los átomos una prueba de su existencia. Este modelo permitía explicar las leyes ponderales (Lavoisier, Proust, Richter y Dalton).^[51] La importancia del trabajo de Dalton para la química del siglo XIX fue que:

Entre otras cosas, cuantificó la idea que se tenía de los átomos, concretó el concepto de elemento químico, explicó la discontinuidad de las proporciones dentro de los compuestos según las leyes de las proporciones constantes y múltiples, y sugirió que la disposición de los átomos en un compuesto podía representarse esquemáticamente para indicar la posible estructura real¹.

Pero el modelo de Dalton estaba limitado para explicar la ley de los volúmenes de combinación de gases de J. L. Gay-Lussac (1778-1850). Esta limitación llevó a Dalton a cuestionar los valores experimentales obtenidos por Gay-Lussac. En cambio, el científico italiano Amedeo Avogadro (1776-1856) pudo explicar esta ley de los gases mediante la hipótesis de que volúmenes iguales de gases distintos, en las mismas condiciones de presión y de temperatura, contienen el mismo número de moléculas. Contrariamente a lo defendido por Dalton (para este químico los átomos de un mismo elemento se repelían entre sí), según Avogadro, las sustancias elementales podían estar formadas por moléculas de más de un mismo átomo. Por ejemplo, para el hidrógeno y el oxígeno postuló la existencia de moléculas diatómicas (H_2 y O_2 , respectivamente). Aceptar la hipótesis de Avogadro tuvo consecuencias importantes en el posterior desarrollo de la química en el aspecto clave de la determinación de los denominados pesos atómicos. Por ejemplo, la teoría de Dalton establecía para el agua la fórmula que correspondía a la relación más simple entre sus elementos constituyentes, HO, lo que implicaba que el peso atómico del oxígeno debía ser 8, mientras que si se admitía la hipótesis de Avogadro entonces la fórmula pasaba a ser H_2O , lo que significaba un peso atómico del oxígeno de 16. Un caso parecido se puede decir para el nitrógeno, ya que su peso atómico dependía de que el amoníaco fuese la combinación más simple de nitrógeno e hidrógeno, NH (como defendía Dalton), o NH_3 , según correspondía a la interpretación de Avogadro.

¹ Ref. 51, pág. 68.

El problema de la determinación de pesos atómicos fue un asunto que ocupó a buena parte de los químicos durante la primera mitad del siglo XIX. El químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) fue uno de los científicos más productivos en este campo. Sin embargo, sus valores de pesos atómicos de los metales alcalinos y de la plata fueron cuestionados por el químico francés Charles F. Gerhardt (1816-1856).^[35] Estas cantidades diferentes implicaban que los pesos moleculares de los ácidos que se derivaban del estudio cuantitativo de las reacciones de estas sustancias con los metales también debían corregirse. Estos nuevos valores conllevaban que las fórmulas de estas sustancias también se debían reconsiderar.

A mitad del siglo XIX los químicos todavía no se habían puesto de acuerdo sobre estos aspectos fundamentales. Este problema generó una gran confusión,^[52] ya que cada elemento todavía no tenía asignado su peso atómico de forma uniforme por la comunidad científica (por ejemplo, en química inorgánica el peso atómico de carbono era 6, pero en orgánica había consenso de que su valor debía ser el doble, 12) y para un mismo compuesto cada autor se sentía libre de emplear su propia fórmula. Tan importante resultó dilucidar este problema que los principales químicos de la época decidieron reunirse para debatir estos puntos de controversia en el *Primer Congreso de Química* celebrado en Karlsruhe en el año 1860.^[53-57] En este congreso se discutió, aunque sin llegar a ningún tipo de acuerdo, la comunicación presentada por el químico italiano S. Cannizzaro (1826-1910), que utilizaba la hipótesis de Avogadro, para establecer una escala unitaria de pesos atómicos. En su argumentación, que correspondía al trabajo *Sunto di un corso di filosofia chimica* publicado dos años antes, defendió el método empleado por Gerhardt. En concreto, admitiendo que el hidrógeno gas está compuesto por moléculas diatómicas, H_2 , comparó las densidades de los vapores de compuestos orgánicos con la densidad del hidrógeno, obteniendo valores de pesos moleculares de sustancias orgánicas. Este cálculo posibilitó discernir entre la fórmula empírica de cada compuesto orgánico y su fórmula molecular.

A este congreso asistió el científico ruso Dimitri Mendeléiev, quien usó los valores obtenidos por el método de Cannizzaro para construir la primera tabla periódica en 1869, en su intento de sistematizar la enseñanza de los distintos elementos. El creciente número de elementos químicos que se fueron descubriendo desde los primeros años del siglo XIX hacía necesaria su agrupación con fines didácticos. En 1869 Mendeléiev, culminando otras ordenaciones publicadas a partir de 1862 que también atendían a los pesos atómicos de los elementos como criterio de clasificación (Newlands, de Chancourtois, Odling, Hinrich y Meyer),^[58] diseñó su primera tabla periódica. Posteriormente publicó una segunda tabla en 1871 en la que aparecían los elementos agrupados en ocho columnas según el tipo de compuestos que formaban con el oxígeno y el hidrógeno. Además, dejó huecos, prediciendo las propiedades de elementos todavía no descubiertos (correspondientes a Sc,

Ga, Ge y Tc), asignándoles su peso atómico. Esta tarea predictiva la siguió desarrollando en sucesivos trabajos, aunque en varios casos con menor éxito,^[59-60] como intento de perfección de su ordenación. De todas formas, el carácter predictivo de la clasificación teórica realizada desempeñó un papel importante en el desarrollo de la tabla periódica.^[61] También cuestionaba algunos valores experimentales de elementos por no ajustarse a su ley periódica. Por ejemplo, la necesidad de cambiar el orden de los elementos Te y I, le llevó a no aceptar el calor experimental del Te, otorgándole un valor de 125 en su primera tabla de 1869, un valor de 128 (con el signo ?) en la segunda publicación y finalmente de 127, idéntico al del I, en la de 1904. Esta representación se mostró de capital importancia para la enseñanza de la química, ya que su desarrollo posterior no sólo ha permitido acomodar el descubrimiento de nuevos tipos de átomos, sino que se ha revelado como un elemento didáctico^[62] que permite explicar de forma resumida el comportamiento químico de los distintos elementos químicos, atendiendo a su posición en la tabla. En la actualidad, existen múltiples presentaciones,^[63] siendo su forma más extendida, que consta de 18 columnas, la que se ha convertido en el icono más reconocible de la química.^[62]

Química orgánica: síntesis y determinación de la estructura molecular

A principios del siglo XIX todavía no se había encontrado un método de laboratorio que permitiese obtener de forma sintética alguna de las sustancias halladas en animales y plantas. Esta aparente imposibilidad se explicó mediante la teoría de la *fuerza vital* que establecía que algún tipo de “fuerza”, exclusiva de los seres vivos, era la responsable de que sólo estos organismos fueran capaces de formar las sustancias presentes en los mismos.

En el año 1828 se dio el primer paso que puso en cuestión la teoría de la fuerza vital. F. Wöhler (1800-1882) obtuvo urea (una sustancia hasta entonces sólo hallada en la orina de los animales) a partir del calentamiento de otra sustancia de procedencia inorgánica, el cianato de amonio. Nuevos procesos de síntesis mostraron la posibilidad de obtención de sustancias orgánicas en el laboratorio. En 1845 Adolph W. Kolbe (1818-1884) sintetizó el ácido acético; y en la década de 1850 Marcellin Berthelot (1827-1907) realizó síntesis de diversos compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas. De esta forma, a mediados del siglo XIX parecía existir suficiente evidencia que auguraba la definitiva desaparición de la teoría vitalista. Pero nuevas ideas propiciaron que su vigencia se alargase unas décadas más.^[64-65] En el año 1860 Louis Pasteur (1822-1895) publicó un artículo sobre isomería en el que apoyaba la teoría de la fuerza vital. En concreto, al haber sido incapaz de obtener compuestos ópticamente activos en el laboratorio, asumió que sólo los seres vivos eran capaces de crearlos. Con ello, numerosos

neovitalistas encontraron en esta teoría un soporte para sus investigaciones sobre la estereoquímica de las moléculas orgánicas. Aunque a finales del siglo XIX ya existía un amplio consenso acerca del fin de la teoría vitalista, esta concepción siguió presente en algunos estudios. Por ejemplo, el químico británico Frances Japp (1848-1928) todavía defendió en 1898 en un artículo los postulados de Pasteur.

En 1784 Lavoisier ya había demostrado que los tres elementos más frecuentes en los compuestos orgánicos eran el carbono, el hidrógeno y el oxígeno. Estos métodos analíticos fueron mejorados posteriormente, de forma sucesiva, por Berzelius, Liebig y Dumas. A partir del consenso científico logrado con posterioridad al *Congreso de Karlsruhe*, se facilitó la elucidación de las fórmulas moleculares de las sustancias orgánicas al poder distinguir entre fórmulas empíricas y moleculares.

En la Figura 3 se encuentra esquematizado el desarrollo de la química en el período 1800-1875.

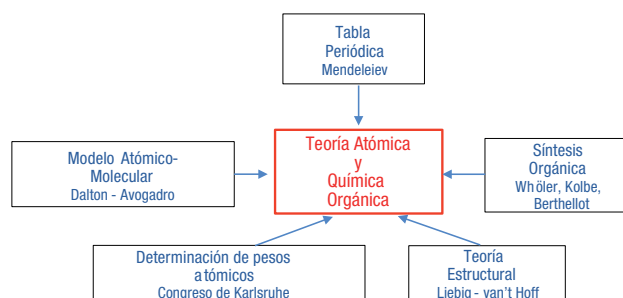


Figura 3. Consolidación de la química: teoría atómica y síntesis orgánica

A principios de la segunda mitad del siglo XIX, el desarrollo de la química orgánica centró la atención en el carbono. A. Kekulé (1829-1896), en su tratado de cuatro volúmenes *Lehrbuch der organischen Chemie* (1861-1867), dio a la ciencia de la química orgánica su definición moderna: un estudio de los compuestos del carbono. Este químico propuso que el átomo de carbono es tetravalente, añadiendo, además, que el átomo de carbono podía emplear una o más de sus cuatro valencias para unirse a otro(s) átomo(s) de carbono, sentando con ello las bases de la moderna teoría estructural, a la que también contribuyeron de forma importante Archivald S. Couper (1831-1892) y Aleksandr M. Bútlerov (1828-1886). De esta forma, quedaron establecidas las reglas generales de los enlaces de valencia, así como la representación gráfica de la molécula orgánica como un conjunto de átomos agrupados mediante uniones químicas. Por ejemplo, la primera representación cíclica del benceno la proporciónó Kekulé en el año 1865.

La segunda mitad del siglo XIX significó un impulso decisivo a la química orgánica por el desarrollo de los métodos de síntesis. En el año 1860 M. Berthelot (1827-1907) publicó su libro *Chimie organique fondée sur la synthèse*, iniciando un nuevo programa de investigación, de forma que el análisis químico dio el relevo a nuevos

métodos de obtención de sustancias orgánicas. Estas vías sintéticas si bien demostraron gran utilidad práctica para el desarrollo de la industria química, se debe destacar que se convirtieron en un elemento conceptual que permitió al químico pensar en nuevas formas de construcción de la arquitectura molecular. Con ello se posibilitó también obtener sintéticamente sustancias completamente nuevas. Podemos citar como ejemplos la reacción de condensación de Claisen, las reacciones de compuestos aromáticos realizadas por Friedel y Crafts, la obtención de alcoholes primarios y secundarios mediante el método propuesto por Saytzeff o los reactivos descubiertos por Grignard.^[53]

A partir de 1874, las fórmulas estructurales debieron considerar las tres dimensiones del espacio, debido a las aportaciones de J. H. van't Hoff (1852-1911) y Le Bel (1847-1930). Se resolvía de esta forma el problema de la isomería óptica mediante las dos representaciones especulares que proporcionaba una molécula con un carbono activo. Con todo ello quedó establecido que el objetivo básico en el estudio de las propiedades de las sustancias orgánicas implica conocer la secuencia de átomos de carbono, la fortaleza de sus distintos tipos de uniones (bien consigo mismo o con otros átomos) y la distribución espacial de todos los elementos que las forman. La obtención de sustancias orgánicas por vía sintética parte, necesariamente, de este triple conocimiento previo. Con ello, las fórmulas de compuestos orgánicos pasaron a ser objetos de entendimiento hipotético-deductivo que permitían a los químicos realizar predicciones teóricas.^[66]

Conviene finalmente realizar una breve reflexión sobre el avance del conocimiento científico, ya que el camino descrito hasta aquí no fue en modo alguno sencillo ni lineal. Ya hemos comentado algunos de estos problemas al tratar la teoría vitalista o la idea daltoniana que impedía que un mismo tipo átomo pudiera combinarse consigo mismo (que quedaba cuestionada por la teoría estructural en la que el carbono se combinaba consigo mismo). Un nuevo ejemplo de disputa de ideas y de controversia científica lo podemos encontrar en el contexto descrito anteriormente.^[67] La publicación de van't Hoff del año 1875, titulada *La Chimie dans l'Espace*, recibió una considerable crítica por parte de Kolbe, quien como editor de la revista *Journal fur praktische Chemie*, se pronunció en los siguientes términos en el número de mayo de 1877:^[68]

Un tal J. H. van't Hoff de la Escuela Veterinaria de Utrech, no encuentra, según parece, ningún gusto por la investigación química exacta. Ha juzgado más conveniente montar a lomos de Pegaso (que obviamente ha tomado prestado de la Escuela Veterinaria) y proclamar en su obra *La Chimie dans l'Espace* cómo, durante su arriesgado vuelo hacia la cima del Parnaso químico, se le aparecieron los átomos agrupados por todo el espacio del universo.

DIÁLOGOS DE LA QUÍMICA CON LA FÍSICA: QUÍMICA FÍSICA Y QUÍMICA CUÁNTICA

¿Cuál es la estructura de la materia? ¿Qué fuerzas actúan entre los componentes de las sustancias? ¿Por qué se producen las reacciones químicas? ¿Cómo ocurren las reacciones químicas? son problemas teóricos que los químicos de finales del siglo XIX y principios del siglo XX intentaron resolver mediante un diálogo con campos de estudio de la física que hasta entonces se habían desarrollado de forma autónoma. Este nuevo pensamiento químico propició el nacimiento de dos nuevas áreas de conocimiento: la Química Física y la Química Cuántica (Figura 4).

Desarrollo de la Termodinámica en Química: nacimiento de la Química Física

El estudio de las reacciones químicas reversibles e incompletas (equilibrio químico) iniciado por el químico francés C. L. Berthollet (1748-1822) a principios del siglo XIX sólo tuvo especial interés a partir de los trabajos realizados por Friedrich W. Ostwald (1853-1932) a finales de ese siglo. Este científico alemán desarrolló la idea de constante de equilibrio (como expresión matemática entre las concentraciones de reactivos y productos), introducida por vez primera en 1864 por los científicos noruegos Guldberg y Waage.^[69] En este trabajo y en otro posterior de 1867^[70] todavía estaba presente el concepto de fuerza en su explicación teórica de los procesos de equilibrio químico, lo que limitó su desarrollo posterior. Sin embargo, el empleo de las matemáticas en su discusión sí que representó una cierta novedad en el campo de la química. Estos primeros trabajos pasaron un tanto desapercibidos por la comunidad científica^[71] hasta que nuevos tratamientos matemáticos y nuevas ideas fueron empleadas. Jacobus H. van't Hoff (1852-1911) retomó la idea de constante de equilibrio, destacando su publicación *Études de dynamique chimique* (1884).^[72] Este científico proporcionó la primera explicación teórica de los procesos de equilibrio químico mediante la utilización sistemática de un lenguaje algebraico y de ecuaciones diferenciales, empleando para ello dos aproximaciones: una termodinámica y la otra cinética.^[25] Su libro fue considerado por Laidler^[73] como el primer libro de cinética

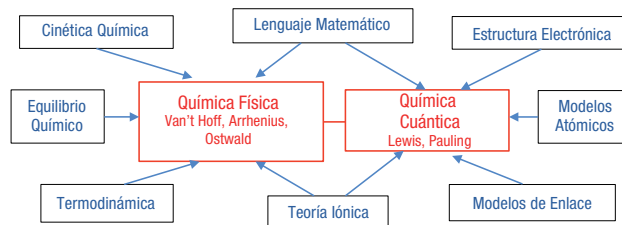


Figura 4. Diálogos de la química con la física

química, así como uno de los más originales de esta disciplina, asentando en el mismo sus principios fundamentales.^[74]

Hasta el último cuarto del siglo XIX, la física y la química se habían desarrollado por caminos paralelos. Un primer punto de encuentro entre ambas disciplinas fue el inicio del empleo del lenguaje matemático por parte de la química, lo que le proporcionó una nueva herramienta tanto conceptual como metodológica. El acercamiento de la física a la química se produjo mediante la contribución especial de van't Hoff, quien a diferencia de G. Gibbs (cuyo formalismo matemático era muy abstracto), empleó un lenguaje matemático sencillo para que los químicos de la época fueran capaces de entender las ideas de la termodinámica, de forma que pudieran aplicarlas al estudio de las reacciones químicas. Por ejemplo, van't Hoff se basó en los dos principios de la termodinámica para una de sus aproximaciones teóricas del equilibrio químico (la otra empleaba consideraciones de cinética química), pero sin hacer mención al concepto de entropía, ya que el mismo se presentaba a los químicos de este tiempo como de difícil comprensión y de escasa utilidad.^[75]

La aproximación física a los estudios de la química propició que surgiera un nuevo campo de estudio de la química denominado *Química Física*. Ostwald, van't Hoff y Svante A. Arrhenius (1859-1927) fundaron en 1887 la revista científica *Zeitschrift für Physikalische Chemie* como medio de expresión de este nuevo ámbito de conocimiento. Buena prueba de la importancia^[45] de este nuevo campo de investigación es que el primer premio Nobel de Química (1901) recayó en van't Hoff; posteriormente, también lo recibieron Svante Arrhenius (1859-1927) en 1903 y Wilhelm Ostwald (1853-1932) en 1909, si bien habría que tener en cuenta la influencia que tuvo el propio Arrhenius sobre el comité encargado de otorgar estos premios.^[76] Otros destacados químico-físicos fueron Fritz Haber (1868-1934), quien recibió el premio Nobel de 1918 por establecer las bases teóricas de la síntesis del amoníaco (materia prima importante para la fabricación de fertilizantes, colorantes, explosivos y medicamentos) y Walther Nernst (1864-1941), que lo recibió en 1920 por sus contribuciones teóricas termodinámicas.

Carácter eléctrico de la materia: composición y estructura Química Cuántica

Antecedentes: procesos electroquímicos

A pesar de los éxitos de la teoría atómica, la propia existencia de los átomos sólo fue unánimemente admitida por la comunidad científica a finales del siglo XIX,^[77] casi cien años después de que fuera formulada por Dalton. Entre los destacados anti atomistas podemos mencionar al químico orgánico Justus von Liebig (1803-1873) y al químico-físico Ostwald, quien aceptó su existencia a principios del siglo XX, después de una frontal oposición.

Paradójicamente, el término átomo (etimológicamente, sin partes) finalmente se aceptó cuando estas partículas dejaron de ser indivisibles. En este sentido, el descubrimiento del electrón a finales del siglo XIX como partícula universal de todos los átomos introdujo nuevas explicaciones teóricas acerca de la formación de uniones químicas y de las propiedades que se derivan de las mismas.

La dimensión eléctrica de la química nos permite encontrar un segundo tipo de conexión con la física. A partir de 1830, Michael Faraday (1791-1867) desarrolló y amplió los estudios de electroquímica^[54] iniciados con la pila de Alessandro Volta (1745-1827) por Humphrey Davy (1778-1829) en el año 1800 en la *Royal Institution* de Londres,^[78] lo que le permitió descubrir seis elementos químicos, dos alcalinos (sodio y potasio) y cuatro alcalinotérreos (magnesio, calcio, estroncio y bario). Faraday estudió de forma cuantitativa la relación existente entre la intensidad de corriente que circula por una celda electrolítica y la cantidad de materia que se forma en cada uno de los electrodos, acuñando en estos estudios nuevos términos relacionados con estos fenómenos: *ánodo*, *cátodo*, *ion*, *electrodo*, *electrólito*, *electrólisis*, etc.^[52] Por su parte, el término *ion* fue también empleado por Arrhenius para explicar la disolución de una sal en agua, señalando que este proceso supone la formación de iones, por lo que según este científico no era necesario que para su formación existiera una corriente eléctrica, discrepando de esta forma con Faraday, quien pensaba que los iones sólo se creaban cuando una corriente eléctrica empezaba a circular en su seno.

Estructura atómica y enlace químico

Particularmente, la existencia del electrón proporcionó un significado y una comprensión precisa tanto de los procesos de disolución de una sal en agua (formación de cationes y aniones) como del comportamiento de los mismos en el seno de un campo eléctrico (movimiento de cationes y de aniones por existencia de una diferencia de potencial eléctrico) y se reveló como un elemento esencial en la formación de uniones químicas, lo que posibilitó establecer distintos modelos de enlace químico.

La controversia surgida acerca de la naturaleza de los rayos catódicos (ondas, según Hertz, entre otros) o partículas, la resolvió finalmente Joseph J. Thomson (1856-1940), diseñando e interpretando una serie de experimentos en los que los rayos catódicos se desviaban por la acción de campos magnéticos y eléctricos, lo que probaba su carácter de partículas cargadas negativamente; la constancia de la relación carga/masa (q/m) permitió establecer que esas partículas eran comunes a todos los átomos. Esta singularidad marcó en el inicio del siglo XX un proceso de elucidación de la estructura atómica (que implicaba comprender la constitución y organización de los átomos, considerando siempre al electrón como elemento esencial) con nuevas propuestas de modelos atómicos, no exentas de controversias,^[79] que intentaban

superar las limitaciones de los precedentes (modelos atómicos del propio Thomson, de Ernest Rutherford [1871-1937] y Niels Bohr [1885-1962]^[80-81]), hasta llegar al modelo cuántico.^[82-83]

El concepto de estructura electrónica se empezó a desarrollar principalmente a principios del siglo xx con las aportaciones de J. J. Thomson,^[84] lo que permitió dar una nueva interpretación a la tabla periódica. Esta visión encontró su base en las investigaciones realizadas por Henry Moseley (1887-1915) con rayos X que demostraban que la verdadera periodicidad de la tabla periódica se debía al número atómico, Z (número de protones que cada átomo contiene en su núcleo). Asociado al concepto estructura electrónica de los átomos se desarrollaron tanto el concepto de valencia,^[82] como los modelos de enlace iónico y covalente para explicar la estequiometría y estabilidad de las distintas sustancias (tanto simples como compuestas) por las interacciones que se establecían entre sus átomos constituyentes.^[84] Destacaron inicialmente en este aspecto las aportaciones teóricas del alemán Walther L. J. Kössel (1888-1956) y las del estadounidense de Gilbert N. Lewis (1875-1946),^[85] resumidas en su libro *Valence and the Structure of Atoms and Molecules* (1923), continuadas por Irwin Langmuir (1881-1957).^[86] Particularmente, el modelo de enlace por compartición de pares de electrones introducido en 1916 por Lewis,^[87] a partir de un átomo cúbico tridimensional con capacidad de rodearse de ocho electrones, representó un concepto precuántico clave en el desarrollo del pensamiento químico. Por ejemplo, explicaba la ordenación tetraédrica del carbono en los compuestos orgánicos y abría una ventana para establecer los mecanismos de reacción en química orgánica,^[88] aunque su aceptación como programa de investigación únicamente tuvo repercusión relevante en el ámbito británico.^[89] De esta forma, parecía que la química necesitaba un átomo estático para explicar la estructura de las moléculas y los mecanismos de reacción, mientras que la física requería un átomo dinámico para explicar sus propiedades espectroscópicas. Por ello, Lewis trató de reconciliar ambos modelos señalando que cada órbita electrónica, según el modelo de Bohr, tenía cierta orientación fija que coincidía con las posiciones electrónicas en su átomo cúbico. Nuevas discusiones mantuvieron la controversia de los dos tipos de átomo durante unos años.^[71,82,89]

Si bien el átomo cúbico de Lewis fue rápidamente superado, la idea de enlace por pares de electrones siguió presente en el desarrollo posterior del concepto de enlace químico. El químico estadounidense Linus Pauling (1901-1994) encontró que la ecuación de Schrödinger era muy complicada en su aplicación al caso de las moléculas. Después de escribir una serie de artículos sobre la naturaleza del enlace químico, en donde simplificaba el tratamiento cuántico de los distintos orbitales, con la publicación de su libro *The Nature of Chemical Bond* (1939)^[90] trató de acercar a los químicos el complejo lenguaje matemático asociado a la mecánica cuántica. Particularmente, su concepto

de resonancia fue bien integrado en la cultura de los químicos orgánicos.^[91] El contenido y la estructura de este libro produjo un cambio en la enseñanza de la química.^[49] Su aproximación cuántica utilizaba el modelo de enlace por pares de electrones introducido por Lewis para explicar la existencia de moléculas. De esta forma, después de admitirse la hipótesis de Avogadro, defendida por Cannizzaro en el congreso de Karlsruhe, finalmente se daba explicación a la formación de moléculas, cuya existencia había estado controvertida por estar formadas por la combinación de dos o más átomos de un mismo elemento (H_2 , O_2 , O_3 , etc.). Por otro lado, esta explicación también proporcionaba una nueva dimensión a la teoría de afinidad química. Además, su concepto de hibridación de orbitales explicaba la disposición espacial de los átomos de carbono en sus compuestos. En cualquier caso, como aportación más destacada, se puede afirmar que su tratamiento de los enlaces químicos permitió unificar diferentes campos de la química al extender e integrar su aplicación a diferentes ramas como la geoquímica, la metalurgia, la química inorgánica, la química orgánica o la bioquímica.^[71] Este científico recibió el premio Nobel de Química (1954) y el de la Paz (1962), habiendo tenido la posibilidad de un tercer premio Nobel por su participación en la carrera por la elucidación de la estructura del ADN, a lo que se adelantaron Watson y Crick. Sus problemas derivados de su activismo contra pruebas nucleares (se le retiró el pasaporte en 1952) le impidieron asistir a un congreso sobre la estructura de las proteínas, imposibilitándole tener acceso a las fotos de rayos X del ADN realizadas por Rosalind Franklin.^[92] Su trabajo en el desarrollo de la química en su doble faceta de investigador y educador ha hecho que se haya considerado por varios científicos como el químico más importante del siglo xx.^[93-94]

CONCLUSIONES

Las reflexiones y consideraciones históricas realizadas en este estudio son susceptibles de ser incluidas tanto en los cursos de formación del profesorado de química como en los niveles de enseñanza preuniversitarios de esta materia. Estas presentaciones y esquemas organizativos pueden servir de ejemplos para tratar en clase, entre otros aspectos históricos y epistemológicos, los siguientes:

- Cómo se han ido creando los distintos conceptos y cómo han evolucionado (manifestándose este aspecto a través del lenguaje). Ejemplos pueden ser las ideas de reacción química relacionadas con la teoría del flogisto/oxígeno y las asociadas con el concepto de afinidad química (desde las primeras ideas de reacciones de desplazamiento en un solo sentido a las de equilibrio químico que implicaban procesos reversibles e incompletos), así como las distintas visiones del concepto de átomo.

- b) En relación con el apartado anterior, el cambio experimentado en los supuestos ontológicos que fundamentan unos principios teóricos, en donde de nuevo encontraríamos los ejemplos mencionados de conceptualización de las reacciones químicas.
- c) Como continuación de los dos apartados anteriores, el papel jugado por los modelos en su intento de comprender, explicar y predecir las propiedades de la materia, considerando su rango de aplicabilidad y sus limitaciones, lo que ha permitido representar los átomos, las sustancias químicas y sus reacciones. A los ejemplos anteriores podemos añadir la representación de sustancias orgánicas, así como las correspondientes a los distintos modelos de enlace químico.
- d) El carácter predictivo de los distintos modelos teóricos, como fue la predicción tanto de la existencia del neutrón por parte de Rutherford como de nuevos elementos químicos por parte de Mendeléiev.
- e) El carácter colectivo que supone el avance de los conocimientos científicos, los debates y las controversias producidas. Se puede mencionar en este aspecto la paulatina superación de la teoría de la fuerza vital mediante diferentes síntesis de compuestos orgánicos, lo que no impidió ciertos retrocesos o resistencias, así como la controversia sobre las fórmulas de compuestos como el agua o el amoníaco, lo que determinaba distintos valores de los pesos atómicos del oxígeno y del nitrógeno, entre otros elementos. En el campo de la estructura atómica, otros ejemplos de controversias fueron la interpretación de la naturaleza de los rayos catódicos (ondas, según Hertz y partículas, según Thomson) o la diferente interpretación otorgada por Thomson y Rutherford a las desviaciones y los “rebotes” de las partículas alfa en el experimento de la lámina de oro de Geiger y Marsden. En este campo también se puede citar la existencia simultánea de un átomo (químico) estático (Lewis-Langmuir) y un átomo (físico) dinámico (Bohr).
- f) La necesidad de comunicación y de compartir ideas (el primer congreso de química celebrado en Karlsruhe es un importante ejemplo histórico), así como los diálogos que se establecieron entre disciplinas en principio separadas, como la física y la química, lo que dio lugar al nacimiento de una nueva rama de la química a finales del siglo XIX.
- g) El papel que supuso en el desarrollo del conocimiento químico el empleo de nuevos aparatos y de técnicas analíticas. En este aspecto cabría mencionar el desarrollo de la química neumática, así como las técnicas de la electrólisis y de la espectroscopía, que permitieron el descubrimiento de un número suficiente de elementos para que Mendeléiev pudiera configurar su tabla periódica.
- h) La importancia de las clasificaciones como elementos de investigación, comprensión y de generación de conocimiento químico, así como un instrumento muy útil para su enseñanza. Ejemplos representativos son las tablas de afinidad química, la tabla de sustancias elementales de Lavoisier y la tabla periódica de Mendeléiev.
- i) La diversidad de métodos y formas de conocimiento en el avance de la química. Como se ha mostrado al principio de este estudio, el conocimiento empírico de las sustancias que originó el nacimiento de la química moderna se fundamentó a partir de campos sin conexión aparente como fueron la alquimia, la minería y la medicina y la farmacia. Además, se puede también añadir que si bien la química es una ciencia de laboratorio, el empleo del lenguaje matemático se manifestó como un elemento esencial, tanto ontológico como metodológico, a la hora de desarrollar la termodinámica química, el equilibrio químico, la cinética química y la química cuántica.
- j) La necesidad de institucionalizar la química, lo que supuso la publicación de los primeros manuales para su enseñanza, o la creación de cátedras de química y de instituciones como el *Jardin du Roi* o la *Royal Institution*, así como la creación de revistas especializadas como medio de expresión y debate, como fue el *Zeitschrift für Physikalische Chemie*.
- Finalmente, se deben mencionar otros aspectos no tratados en este estudio que también tienen importancia histórica y didáctica. En concreto, los referidos a la actuación de los científicos en los conflictos bélicos^[76] y el papel jugado por las mujeres en la ciencia.^[95-96]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Gooday, J. M. Lynch, K. G. Wilson, C. K. Barsky. *Isis* **2008** 99, 322-330.
- [2] M. R. Matthews. *Science Teaching: The Contribution of History and Philosophy of Science. 20th Anniversary Revised and Expanded Edition*. Routledge, Oxford. 2014.
- [3] M. Quintanilla, S. Daza, H. G. Cabrera. *Historia y Filosofía de la Ciencia. Aportes para una “nueva aula de ciencias”, promotora de ciudadanía y valores*. Santiago de Chile. 2014.
- [4] A. J. Ihde. *J. Chem. Educ.* **1971** 48, 686-687.
- [5] S. G. Brush. *J. Coll. Sci. Teach.* **1978** 7(5), 288-291.
- [6] J. H. Wandersee, P. B. Griffard. En *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust, J. H. van Driel, eds.; Kluwer, Dordrecht, 2002, 29-46.
- [7] K. De Berg. En *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*; M. R. Matthews (ed.), Springer, Dordrecht, 2014, 317-341.
- [8] M. Niaz. *Chemistry Education and Contributions from History and Philosophy of Science*. Springer, Dordrecht. 2016.
- [9] M. Monk, J. Osborne. *Sci. Educ.* **1997** 81(4), 405-424.
- [10] K. A. Olsson, M. M. Balgopal, N. E. Levinger. *J. Chem. Educ.* **2015** 92(11), 1773-1776.

- [11] H. Tümay. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2016** *17*, 229-245.
- [12] F. Abd-El-Khalick, M. Waters, A. Le. *J. Res. Sci. Teach.* **2008** *45*, 835-855.
- [13] M. Niaz, A. Maza. *Nature of Science in General Chemistry Textbooks*. Springer, Dordrecht. 2011.
- [14] L. Moreno, M. A. Calvo. *Rev. Eureka Enseñ. Divulg. Cien.* **2019** *16*, 1101.
- [15] J. L. Doménech, F. Savall, J. Martínez-Torregrosa. *Ens. Cien.* **2013** *31*(1), 29-43.
- [16] J. Quílez. *Sci. & Educ.* **2021**.
- [17] S. Erduran, A. Aduriz-Bravo & R. Mamlok-Naaman. *Sci. & Educ.* **2007** *16*, 975-989.
- [18] H. A. Wang, D. D. Marsh. *Sci. & Educ.* **2002** *11*, 169-189.
- [19] W. B. Jensen. *J. Chem. Educ.* **1998** *75*(8), 961-969.
- [20] J. A. Chamizo, En: Jari, L., Juuti, K., Lampiselkä, J., Uitto, A., Hahl, K. (eds.) *Science Education Research: Engaging Learners for a Sustainable Future*. ESERA, Helsinki. 2016.
- [21] J. Quílez. *Educ. Quím.* **2002** *13*(1), 45-54.
- [22] J. Quílez. *Chem. Educ. Res. Prac.* **2004** *5*(1), 69-87.
- [23] J. Quílez. *Sci. & Educ.* **2009** *18*(9), 1203-1251.
- [24] J. Quílez. *Found. Chem.* **2019** *21*, 221-252.
- [25] J. Quílez. *Found. Chem.* **2021** *23*, 85-103.
- [26] N. Kortam, M. Hugerat, R. Mamlok-Naaman. *Chemistry Teacher International.* **2020**. <https://doi.org/10.1515/cti-2019-0016>
- [27] J. Quílez. *Ed. Quím.* **2005** *16*(3), 114-134.
- [28] J. Quílez, S. Lorente, F. Sendra, E. Enciso. *Afnidad. Química*. ECIR, Valencia. 2009.
- [29] J. Quílez. *Ed. Quím.* **2002** *13*(2), 101-112.
- [30] A. J. Ihde. *J. Chem. Educ.* **1956** *33*(3), 107-110.
- [31] B. T. Moran. *Distilling knowledge. Alchemy, Chemistry, and the Scientific Revolution*. Harvard University Press, Cambridge. 2005.
- [32] R. P. Multhauf. *The Origins of Chemistry*. Oldbourne Book Company, Londres. 1966.
- [33] B. Bensaude-Vincent, I. Stengers. *Historia de la Química*. Addison-Wesley, Madrid. 1997.
- [34] M. P. Crosland. *Estudios históricos en el lenguaje de la química*. UNAM, México. 1988.
- [35] J. R. Partington. *A Short History of Chemistry*. Dover, Nueva York. 1989.
- [36] F. L. Holmes, *Eighteenth-Century Chemistry as an Investigative Enterprise*. University of California Press, Berkeley. 1989.
- [37] O. Hannaway. *The Chemist and the Word; the Didactic Origins of Chemistry*. John Hopkins University Press, Londres. 1975.
- [38] U. Klein. *Ambix* **1995** *42*, 79-100.
- [39] I. Newton. *Optics or a Treatise of the Reflections, Refractions. Inflexions and Colours of Light*. Dover, Nueva York. 1979.
- [40] E. F. Geoffroy. *Memoires de l'Académie Royale des Sciences* **1718** 202-212.
- [41] M. G. Kim. *Affinity, that Elusive Dream. A Genealogy of the Chemical Revolution*. MIT Press, Cambridge. 2003.
- [42] P. Grapí. *La representación de lo invisible. Tabla de los diferentes rapports observados en la química entre diferentes sustancias*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, Alicante. 2012.
- [43] P. Lemay, R. E. Oesper. *J. Chem. Educ.* **1946** *23*, 158-165; 230-236.
- [44] P. Grapí, M. Izquierdo. *Ambix* **1997**, *44*, 113-130.
- [45] T. H. Levere. *Transforming Matter. A History of Chemistry from Alchemy to the Buckyball*. Johns Hopkins, Baltimore. 2001.
- [46] F. L. Holmes. *Isis* **2000** *91*, 735-753.
- [47] P. Grapí, *Inspiring air. A history of air-related science*. Vernon Press, Wilmington. 2019.
- [48] T. Sukopp. En B. Schweitzer, T. Sukopp (eds.) *Knowledge Communities in Europe. Exchange, Integration and Its Limits*. Springer, Wiesbaden. 2018, 15-47.
- [49] W. H. Brock. *Historia de la Química*. Alianza, Madrid. 1998.
- [50] M. Beretta. *The Enlightenment of Matter. The Definition of Chemistry from Agricola to Lavoisier*. Science History Publications, Canton. 1993.
- [51] I. Pellón. *El Atomismo en Química. Un Nuevo Sistema de Filosofía Química*. Publicaciones Universidad de Alicante, Alicante. 2012.
- [52] A. J. Ihde, *The Development of Modern Chemistry*. Harper and Row, Londres. 1964.
- [53] J. Hudson. *The History of Chemistry*. Chapman and Hall, Nueva York. 1992.
- [54] R. G. Ehl, A. J. Ihde. *J. Chem. Educ.* **1954** *31*(5), 226-232.
- [55] R. Cid. *Rev. Eureka Enseñ. Divulg. Cien.* **2009** *6*(3), 396-407.
- [56] P. Román. *An. Quím.* **2010**, *106*(3), 231-239.
- [57] R. Gallego, A. P. Gallego, R. Pérez. *Educ. Quím.* **2012** *23*, 280-289.
- [58] E. R. Scerri. *The Periodic Table. Its Story and Significance*. Oxford University Press, Oxford. 2007.
- [59] G. Lente. *ChemTexts*, **2019** *5*, 17.
- [60] P. J. Stewart. *Found. Chem.* **2019** *21*, 3-9.
- [61] M. Niaz, M. A. Rodríguez, A. Brito. *Studies in History and Philosophy of Science* **2004** *35*, 271-282.
- [62] A. Lykknes, B. Van Tiggelen. *Centaurus* **2019** *61*, 287-298.
- [63] J. Emsley. *Substantia. An International Journal of the History of Chemistry* **2019** *3*(2) Suppl. 5: 15-27.
- [64] P. J. Ramberg. *Ambix* **2000** *47*, 170-195.
- [65] P. J. Ramberg. En R. L. Numbers, K. Kampourakis (Eds.), *Newton's Apple and Other Myths about Science* (pp. 59-66). Cambridge, Harvard University Press. 2015.
- [66] P. Cintas. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2007** *46*, 4016 - 4024.
- [67] S. Esteban, F. Peral. *An. Quím.* **2007** *103*(4), 59-69.
- [68] H. Kolbe. *Journal für praktische Chemie*, **1877** *15*, 473.
- [69] P. Waage, C. M. Guldberg. (Traducido por H. I. Abrash) *J. Chem. Educ.* **1986** *63*, 1044-1047.
- [70] C. M. Guldberg, P. Waage. *Études sur les Affinités Chimiques*. Christiania University, Oslo. 1867.
- [71] J. W. Servos. *Physical Chemistry from Ostwald to Pauling*. Princeton University Press, Princeton. 1990.
- [72] J. H. van't Hoff. *Études de Dynamique Chimique*. Frederik Muller, Amsterdam. 1884.
- [73] K. J. Laidler. En: W. J. Hornix, S. H. W. M. Mannaerts (eds.), *Van't Hoff and the Emergence of Chemical Thermodynamics*. DUP University, Delft. 2001, 243-255.
- [74] K. J. Laidler. *Arch. Hist. Exact Sci.* **1985** *32*, 43-75.
- [75] H. Kragh, E. J. Weininger. *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* **1996** *27*, 91-130.
- [76] P. Coffey. *Cathedrals of Science. The Personalities and Rivalries that Made Modern Chemistry*. Oxford University Press, Oxford. 2008.
- [77] C. Bigg. *Stud. Hist. Phil. Sci.* **2008** *39*, 312-322.
- [78] K. D. C. Vernon. *J. Chem. Educ.* **1957** *34*(12), 607-610.
- [79] M. Niaz. *Sci. Educ.* **1998** *82*, 527-552.
- [80] J. L. Heilbron. *Am. J. Phys.* **1981** *49*(3), 223-231.

- [81] B. L. Haendler. *J. Chem. Educ.* **1982** 59(5), 372-376.
- [82] K. J. Laidler. *The World of Physical Chemistry*. Oxford University Press, Oxford. 1995.
- [83] A. Garritz. *Educ. Quím.* **2014** 25, 170-175.
- [84] W. B. Jensen. *J. Chem. Educ.* **1984** 61(3), 191-200.
- [85] R. E. Kohler. *Historical Studies in the Physical Sciences* **1971** 3, 343-376.
- [86] R. E. Kohler. *Historical Studies in the Physical Sciences* **1974** 4, 39-87.
- [87] G. N. Lewis. *J. Am. Chem. Soc.* **1916** 38, 742-785.
- [88] S. Shaik. *J. Comput. Chem.* **2007** 28, 51-61.
- [89] R. E. Kohler. *Historical Studies in the Physical Sciences* **1975** 6, 431-468.
- [90] L. Pauling. *The Nature of Chemical Bond*. Ithaca, Cornell University Press. 1939.
- [91] K. Gavroglu, A. Simões. *HYLE - International Journal for Philosophy of Chemistry* **2012** 18 (1), 45-68.
- [92] G. B. Kauffman, L. M. Kauffman. *J. Chem. Educ.* **1996** 73(1), 29-32.
- [93] J. A. Chamizo. *Ed. Quím.* **1995** 6(1), 64-70.
- [94] P. M. Zorky. *Crystallogr. Rep.* **2001** 46 (6), 887-890.
- [95] C. T. Eagle, J. Sloan. *The Chemical Educator* **1998** 3(5), 1-18.
- [96] X. Pintos, J. R. Bermejo. *Boletín das Ciencias* **2008** 21(66), 81-83.

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



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



Real Sociedad Española de Química

www.rseq.org