

La Caracterización Estructural del Benceno de Kekulé: un Ejemplo de Creatividad y Heurística en la Construcción del Conocimiento Químico

Structural Characterization of Kekulé's Benzene: an Example of Creativity and Heuristics in the Construction of Chemical Knowledge

 Jorge Meinguer Ledesma

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México.
E-mail: jorge.meinguer@cch.unam.mx

Resumen: En este artículo se presenta una revisión histórica de los conocimientos, hechos, controversias y personajes que influenciaron al químico August Kekulé al desarrollar la primera caracterización química aceptada del benceno, la unidad estructural de los compuestos aromáticos. Por la naturaleza de los conocimientos implicados, la fuerte connotación creativa y heurística, este episodio en particular constituye un referente para impulsar en las aulas saberes metacientíficos relacionados con la construcción, validación y evolución del conocimiento químico. Elementos necesarios para emprender una enseñanza contextualizada del tema en las clases de química, la cual dote de significado y reflexión a su aprendizaje. Este trabajo pretende también, fungir como guía para el análisis histórico y epistemológico de otros contenidos que se develan como relevantes en la educación química.

Palabras-clave: Educación química; Epistemología; Benceno; Historia de la ciencia; Compuestos aromáticos.

Abstract: This article presents a historical review of the knowledge, facts, controversies and characters that influenced chemist August Kekulé in order to establish the first accepted chemical characterization of benzene, the structural unit of aromatic compounds. Due to the nature of the knowledge involved, the strong creative and heuristic connotation, this particular episode constitutes a reference to promote meta-scientific knowledge related to the construction, validation and evolution of chemical knowledge in the classroom. These are necessary elements to undertake a contextualized teaching of the topic in chemistry classes, which affords meaning and reflection in the learning. This paper also aims to serve as a guide for historical and epistemological analysis of other contents that are relevant in chemical education.

Keywords: Chemical education; Epistemology; Benzene; History of science; Aromatic compounds.

Recibido en: 22/02/2019

Aprobado en: 11/10/2019



El Valor de la Historia en la Enseñanza de la Química

El conocimiento científico se ha construido a través de los siglos con el transitar y evolución de varias culturas. Su desarrollo ha sido influenciado por sistemas de creencias, conflictos de poder, crisis políticas y por la espontaneidad creativa que ha hecho posible que las rutas de sistematización de la ciencia tomarán determinados caminos y no otros, como es el caso del tema abordado en este escrito. Por otro lado, las teorías, los métodos, las estrategias, los recursos y el lenguaje que dan cauce a la enseñanza de la ciencia se han transformado en las últimas décadas, dando lugar a una visión constructivista del proceso educativo. En esta óptica se invita a incorporar aspectos socioculturales como la historia, la filosofía y la epistemología de la ciencia para contextualizar el aprendizaje y hacerlo significativo al estudiantado.

El reto actual de la educación química es presentar a esta disciplina en las aulas y laboratorios como una ciencia razonable, la cual genere opinión y contribuya al desarrollo técnico, cultural y humano de la sociedad (MEINGUER LEDESMA, 2015). La incorporación de la historia de la ciencia en la práctica docente permite darle concreción a este objetivo porque incentiva la reflexión sobre aspectos relacionados con la evolución y consolidación tanto de las teorías como de los modelos que resultan claves en la enseñanza. También es de gran utilidad para presentar a esta ciencia en particular como una actividad humana en construcción, cuyos productos y conocimientos son el resultado del trabajo colectivo, el debate, la deliberación, así como los intereses que diversos grupos ponen en juego al establecer consensos. Una cuestión que hace menos formal y más cercano el conocimiento químico al estudiantado (CUELLAR FERNANDEZ; QUINTANILLA GATICA; BLANCAFORT, 2010). Finalmente, evita el desarrollo de cualquier tipo de dogmatismo en el salón de clases y contribuye a fortalecer la reflexión, la organización, así como la toma de decisiones en torno a los contenidos curriculares en la práctica docente (SOLBES; SINARCAS, 2009).

En síntesis, se puede afirmar que acudir a la historia posibilita dotar de sentido, pluralidad y horizontalidad al proceso de enseñanza-aprendizaje de la química. En este trabajo se sostiene que, revisar y comunicar el contexto, los cursos de acción, así como los obstáculos que tuvo que superar el químico August Kekulé (1829-1896) para establecer la estructura del benceno en la segunda mitad del siglo XIX, robustece la enseñanza de los compuestos aromáticos, uno de los temas más relevantes en el campo de la química orgánica.

Datos Biográficos de August Kekulé

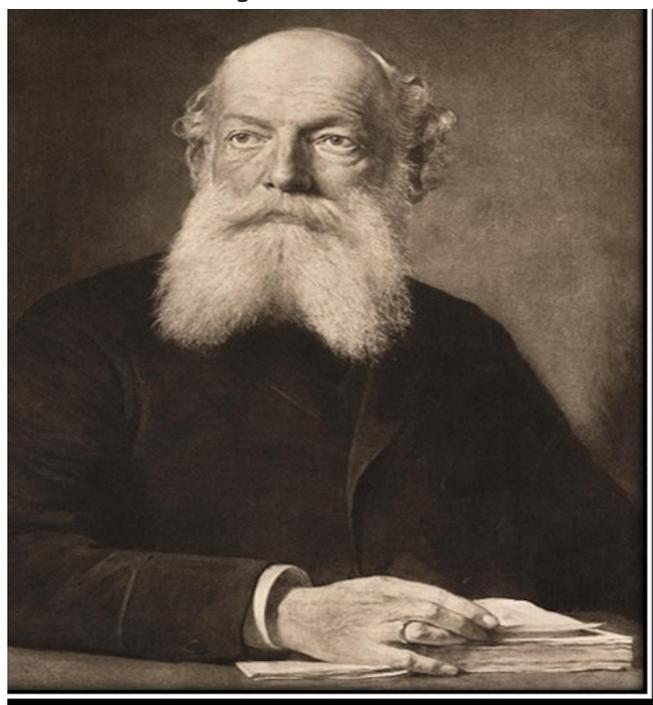
Friedrich August Kekulé von Stradonitz nació el 7 de septiembre de 1829 en Darmstadt Alemania, provenía de una familia de ascendencia noble de la región de Bohemia. Desde temprana edad mostró talento para el dibujo y el diseño. Un hecho que lo condujo en 1847 a matricularse en la Universidad de Giessen para estudiar arquitectura. En esta institución académica presenció dos conferencias del connotado químico Justus von Liebig (1803-1873), estas charlas le impactaron a tal grado que decidió abandonar la carrera arquitectura para dedicarse por completo al estudio de la química. Se graduó como químico en 1851 y se trasladó a Francia a realizar sus estudios de doctorado.

En París Kekulé tuvo como profesor al ilustre Charles Gerhardt (1816-1856) con quien estrechó una cercana amistad y compartió el interés por el estudio de las reacciones orgánicas. En 1853 obtuvo el grado de doctor y se estableció por una corta temporada en

Londres donde conoció Alexander W. Williamson (1824-1904) con quién inicio el estudio de las propiedades estructurales de los compuestos alifáticos. Tres años después regresó a Alemania para conducir varios cursos de verano de química orgánica en la Universidad de Hieldenberg. Durante su estancia en este recinto académico, Kekulé publicó un par de artículos donde reportó el carácter tetravalente del carbono y perfeccionó la noción de valencia en la explicación de los enlaces químicos. Estas publicaciones junto con las de Archival S. Couper (1831-1892) y Aleksandr Bútlerov (1828-1886) constituyeron el basamento teórico de la denominada teoría estructural, un cuerpo de conocimientos que potenció el desarrollo y el apuntalamiento del campo de la química orgánica.

Para el año de 1858, el químico alemán es nombrado profesor titular en la Universidad de Ghent en Bélgica. En esta institución construye un talentoso grupo de trabajo constituido por Alfred von Baeyer (1835-1917), Wilhelm Körner (1839-1925), Albert Ladenburg (1842-1911) y James Dewar (1842-1923). Todos ellos, químicos que contribuyeron significativamente al desarrollo de sus investigaciones sobre los compuestos aromáticos. En el período de tiempo comprendido entre 1865 a 1872 Kekulé desarrolla la obra que le confirió prestigio, fama y múltiples reconocimientos a nivel internacional, lo concerniente a la caracterización estructural del benceno. Sus aportes sobre la estructura de este compuesto aparecen en tres publicaciones. La primera de ellas dirigida a la revista de la Sociedad Química Francesa – *Bulletin de la Societé Chimique de Paris* – en 1865, mientras las dos restantes a la publicación alemana fundada y editada por Justus von Liebig (*Annalen der Chemie und Pharmacie*) en 1866 y 1872 respectivamente.

Figura 1 – Retrato de August Kekulé von Stradonitz a los 60 años



Fuente: Colección Edgar F. Smith, Universidad de Pennsylvania.¹

¹Recuperado el 25 abr. 2020 de: <https://www.chem.upenn.edu/edgar-fahs-smith-collection>

En 1867 se le otorga a Kekulé la cátedra de química orgánica en la Universidad de Bonn donde trabajó en la síntesis de compuestos aromáticos hasta su muerte. Durante esta etapa fue nombrado caballero por el Kaiser Guillermo II (1859-1941). Para tener una idea de la importante labor que desempeñó Kekulé en el desarrollo de la química en el siglo XIX, debe tomarse en cuenta el siguiente dato, de los primeros cinco premios Nobel de Química otorgados por la Real Academia Sueca de Ciencias, sus alumnos ganaron tres. Los correspondientes a Jacobus van 't Hoff en 1901, Hermann Fisher en 1902 y Alfred von Baeyer en 1905. Hoy se le reconoce como una de las mentes más creativas, brillantes y representativas de lo que en la literatura se denomina como la segunda revolución química (JENSEN, 1998).

El Contexto que Precedió la Elucidación Estructural del Benceno

La química orgánica tiene su origen en el siglo XIX, cuando varias academias europeas contaban con especialistas que además de realizar estudios sobre sustancias minerales, desarrollaban métodos de análisis de compuestos extraídos tanto de vegetales como de animales con ayuda de disolventes como el alcohol, el formol y el éter. Formalmente se considera que esta rama del conocimiento químico emergió en 1928, cuando el químico Friedrich Whöler (1800-1882) comunica la síntesis de la urea a partir de la vaporización de sales de amonio (MORENO MARTÍNEZ; CALVO PASCUAL, 2018). La obtención de la urea representa un hito de la química porque se le considera la primera sustancia de orden natural elaborada a partir de compuestos sintéticos. Whöler junto con Justus von Liebig son considerados los fundadores de la química orgánica, ya que a ambos se les debe la sistematización de los primeros métodos de síntesis y análisis de los compuestos hidrocarbonados, así como la inclusión de este tipo de estudios en las universidades europeas.

Para 1850, la incipiente comunidad de químicos orgánicos se esforzaba por construir y amalgamar un cuerpo teórico que les permitiera clasificar, explicar las propiedades y modelar a los compuestos naturales, tal como ocurría con la química de los metales. Este proyecto adquirió sentido con el establecimiento de la denominada teoría estructural, en la que August Kekulé tuvo una participación destacada. La teoría estructural es un compendio en el que se ordenan las ideas expresadas de manera independiente por tres jóvenes químicos – Archibald Couper, August Kekulé y Aleksandr Bútlarov –, en el periodo de tiempo comprendido entre 1858 a 1861. A groso modo, la teoría estructural permitió refinar uno de los conceptos más representativos de la química decimonónica, la denominada valencia para explicar el fenómeno de concatenación e insaturación que experimentan numerosos grupos de compuestos que tienen como base al carbono, le atribuyó importantes propiedades como la reactividad a la arquitectura espacial de las moléculas e incentivó su representación (ASIMOV, 1990).

En lo concerniente al benceno, al inicio de la segunda mitad del siglo XIX se le conceptualizaba como una cadena de seis átomos de carbono altamente insaturada, esto es, con la presencia de dobles y triples enlaces (TOBARES, 2003). El aislamiento del benceno fue reportado por primera vez en 1825 por el connotado Michael Faraday (1791-1867) quién lo separó de los residuos del gas de alumbrado público y le asoció una composición de carbono e hidrógeno 1:1. Una década más tarde el químico Eilhard Mitscherlich (1794-1863) reporta su obtención al vaporizar el ácido benzoico proveniente de la goma de *Benjuí* (un árbol nativo de Sumatra) y le asocia por gasometría un peso molecular de 78 unidades. En 1845 Wilhelm von Hoffman (1818-1892) comunica su síntesis a partir del alquitrán de hulla, un método que

posibilitó su obtención a escala industrial. Hoffman fue el primero en asociar y difundir la fórmula C_6H_6 para representar al benceno.

Trabajos publicados en 1860 revelan que el benceno no experimenta las reacciones de oxidación, hidratación y halogenación como lo hacen los compuestos insaturados de cadena lineal, por lo que la elucidación de su estructura se convierte nuevamente en un programa de investigación abierto (DAYAN, 2006). Las anomalías informadas sobre la reactividad del benceno atraen la atención de A. Kekulé, quién prontamente advierte el desafío epistémico y la relevancia disciplinar del problema. Desde entonces, Kekulé se esfuerza por explicar las propiedades de este compuesto en el marco de acción de la emergente teoría estructural. Un reto que se convertiría en una obsesión intelectual con una fuerte connotación creativa.

Experiencia Onírica, Heurística y Consistencia Empírica: el camino seguido por Kekulé en la caracterización del benceno

En el desarrollo de la obra de Kekulé sobre el benceno pueden reconocerse al menos tres fases: (1) la conceptualización del benceno como una entidad química con un núcleo de seis átomos de carbono con tres dobles enlaces y fórmula C_6H_6 (KEKULÉ, 1865); (2) una descripción más detallada de este compuesto al que asocia una estructura cíclica con tres dobles enlaces alternados y donde cada átomo de carbono posee una estructura trivalente como el hipotético ciclohexatrieno (KEKULÉ, 1866); (3) la formulación de la hipótesis oscilante (KEKULÉ, 1872), según la cual, los enlaces del benceno intercambian posiciones en lapsos cortos de tiempo. Una tesis que es continuamente referenciada en los libros de texto (FARRÉ; LORENZO, 2012).

Los trabajos de Kekulé fueron abriendo una nueva brecha dentro de la química orgánica. Prueba de ello, fue el gran número de adeptos que en un lapso corto de tiempo atrajo el estudio de los compuestos aromáticos. Una buena cantidad de químicos jóvenes y talentosos decidieron especializarse en esta nueva ruta de conocimiento influenciados por las publicaciones del químico alemán (ROCKE, 1998). El rápido avance de la obra de Kekulé se debió en gran medida, al vacío conceptual sobre el comportamiento del nuevo grupo de compuestos reportado, a que sus postulados mostraron consistencia con las pocas pero suficientes evidencias empíricas que se contaban en la época y con el marco teórico aceptado para su explicación (la teoría estructural).

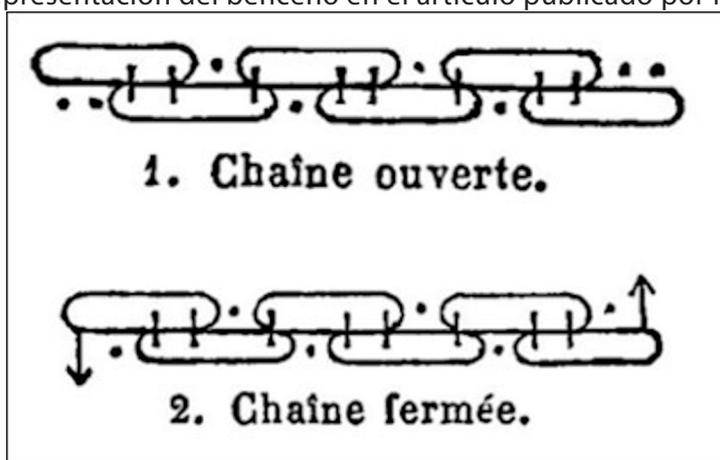
El Benceno como un Núcleo de Seis Átomos de Carbono

En la década de 1860 Kekulé no es el único especialista que dedica su trabajo a indagar sobre las propiedades estructurales del benceno, en la Universidad de Viena se encuentra el químico austriaco Josef Loschmidt (1821-1895) a quién diversas fuentes sitúan como el primero en reportar una estructura cíclica de este compuesto en el año de 1861 (NOE; BADER, 1993). Sin embargo, el trabajo de Loschmidt (1861) tuvo una repercusión mínima entre la comunidad de especialistas. Un hecho que se debió a la ambigua descripción de los átomos de carbono en su propuesta, su poca consistencia con la teoría estructural, la imposibilidad de explicar de forma coherente los isómeros disustituídos del benceno que fueron reportados años después a su publicación y que su artículo apareció en una revista de corto alcance y prestigio académico. En pocos años este trabajo sobre el benceno fue olvidado casi por completo.

A pesar de contar con el antecedente de la estructura de Loschmidt (1861), algunos autores afirman que, la famosa experiencia onírica de Kekulé en donde una serpiente se muerde la cola como elemento importante en la elucidación de la estructura del benceno, fue un hecho verídico que ocurrió a principios de 1862 (ROCKE, 2014). Este episodio fue popularizado por el propio Kekulé en 1890 cuando la Sociedad Química Alemana le rindió un homenaje por los 25 años de su primera publicación sobre la química de los compuestos aromáticos. Hoy en día existen diversas versiones de esta anécdota, algunas incluso poco creíbles e irresponsables provenientes de la pseudociencia. Por lo que resulta pertinente señalar que, si el sueño de la serpiente es veraz, este únicamente fungió en el mejor de los casos como una guía o complementó a los arduos conocimientos tanto teóricos como empíricos que Kekulé había reunido sobre el benceno. En consecuencia, resulta imposible sostener que sus trabajos sobre la química de los compuestos aromáticos son producto de mera casualidad o inspiración onírica.

A pesar que desde 1862 Kekulé contemplaba la posibilidad de que el benceno adoptara una estructura cíclica, en su primer artículo sobre las propiedades de los compuestos aromáticos publicado en 1865 adopta una posición sumamente conservadora al respecto. Pues se mantiene en la línea de la época de describir al benceno como un núcleo cerrado de seis átomos de carbono altamente insaturado. La razón de este cauteloso posicionamiento obedeció a que las evidencias empíricas que podían respaldar su visión de un ciclo aromático comenzaban apenas a ser comunicadas por Albert Ladenburg (1842-1911) y Wilhelm Körner (1839-1925). Para modelar la estructura del benceno en el escrito dirigido al *Bulletin de la Société Chimique de Paris*, el químico alemán se valió de un peculiar diagrama en donde presenta a los átomos de carbono con elipses, el tipo de enlaces (sencillos y dobles) con pequeñas líneas verticales, las uniones carbono-hidrogeno con pequeños puntos e hizo uso de flechas para indicar los sitios de unión entre los átomos terminales de la estructura, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2 – Representación del benceno en el artículo publicado por Kekulé en 1865



Fuente: adaptada de Roche (2010, p. 200).

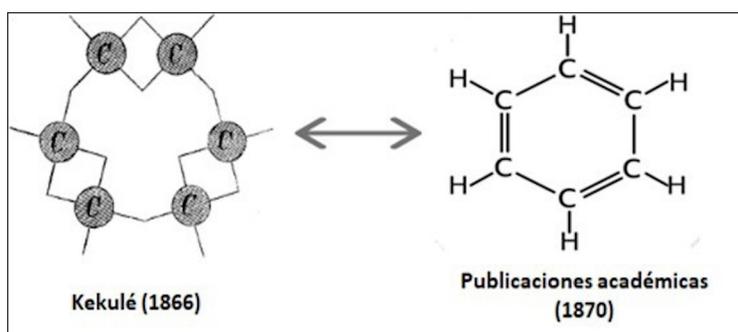
Además de esta peculiar descripción estructural, en el texto se informa que los derivados del benceno son el resultado de sustituir hidrógenos por diversos grupos funcionales, como es el caso de alcoholes, aminas, grupos carboxilos, etc. Aunque para Kekulé este artículo representó solamente el prelude de su obra en torno a la descripción estructural del benceno, para varios autores es considerado un hito porque con este se da inicio al estudio formal de los compuestos aromáticos (KIKUCHI, 1997).

La Representación Cíclica del Benceno

En 1866 aparece en una prestigiosa revista alemana, un extenso trabajo de Kekulé en donde presenta por vez primera su modelo cíclico del benceno. En este artículo además de ofrecer una explicación más refinada de la química de los compuestos aromáticos, utiliza las evidencias empíricas recientemente obtenidas en este campo como defensa de su propuesta del ciclo aromático. Entre los experimentos mencionados se encuentran los realizados por sus alumnos A. Ladenburg (1869) y W. Körner (1867). En el primero se informa la equivalencia de los seis hidrógenos presentes en el benceno, mientras que en el segundo, la existencia de un solo producto monosustituido y tres isómeros disustituidos en las reacciones de síntesis de los derivados del C_6H_6 .

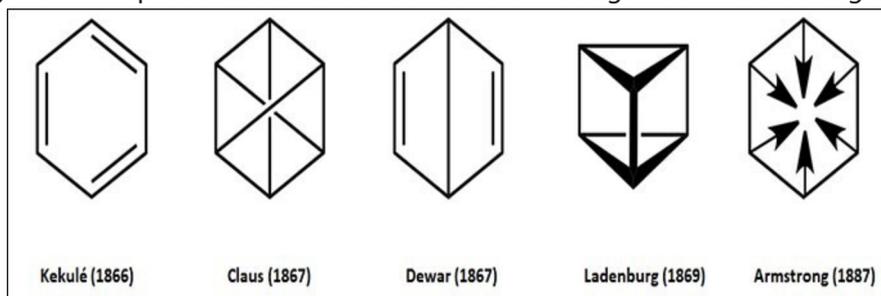
Es importante mencionar que, la versátil propuesta de Kekulé en este artículo no pasa por alto ningún postulado del núcleo duro de la teoría estructural. Por el contrario, la fortalece y amplía su marco explicativo. A pesar de ello, Kekulé era consiente que estaba abriendo un nuevo sendero en el ámbito de la química orgánica y se limitó a calificar su propuesta como una formulación elegante que mostraba los contornos de una nueva teoría (KEKULÉ, 1866).

Figura 3 – Representación cíclica del benceno (KEKULÉ, 1866) y como fue popularizada en las publicaciones académicas de años posteriores



Fuente: reelaborada de Tobares (2003).

Como resultado de la anterior afirmación, en cuestión de meses comenzaron a reportarse formulaciones alternativas para competir o completar el modelo cíclico del benceno propuesto por Kekulé – figura 4. Algunas de las más citadas son la de J. Dewar, A. Claus, A. Ladenburg y Armstrong-Baeyer (FARRÉ; LORENZO, 2012). La mayoría de estas propuestas estructurales resultaron ser competidoras débiles con la representación de Kekulé, ya que resultaban inconsistentes con el acervo de experimentos que respaldaban la existencia de tres isómeros disustituidos del ciclo aromático (orto, meta y para). Otras como la de Armstrong-Baeyer resultaban poco ortodoxas y sobresaturadas de hipótesis auxiliares en su defensa. En la literatura se menciona al prisma de Ladenburg como la única estructura que logró rivalizar significativamente con la de Kekulé, pero al presentar problemas para explicar tanto la formación como la reactividad de los derivados aromáticos complejos como la naftalina y el antraceno poco a poco fue perdiendo vigencia (ROCKE, 1988).

Figura 4 – Representaciones del benceno en la segunda mitad del siglo XIX

Fuente: adaptada de Farré y Lorenzo (2012).

En realidad, el ataque severo que recibió la estructura cíclica del benceno y la obra en general de Kekulé provino del grupo de trabajo de Herman Kolbe (1818-1884) de la Universidad de Leipzig. Kolbe fue un distinguido alumno de F. Whöler, así como un químico ampliamente reconocido por sus conocimientos en las reacciones de alcoholes y ácidos grasos. Desarrolló uno de los primeros métodos en la síntesis del ácido salicílico (la base de la aspirina) y era un defensor férreo de la teoría de radicales². Por tal razón, llegó a afirmar que la visión de Kekulé de vincular la reactividad de las moléculas orgánicas con su arquitectura espacial era un asunto menor al que no se le debía otorgar tiempo ni recursos. Concretamente sobre el benceno, en un principio se negó rotundamente a aceptar la equivalencia de los seis átomos de hidrógeno en la estructura cíclica, cuestión que abría pauta para considerar la posibilidad de dos o más isómeros en los derivados monosustituídos como el ácido benzoico (KOLBE, 1869). Un resultado que nunca se pudo probar experimentalmente. Sus ideas, aunque eran recibidas con atención por su reconocido prestigio en menos de una década fueron refutadas. La estructura del benceno propuesta por Kekulé en 1866, pronto se convirtió en el modelo más fuerte y popular en las academias europeas de química.

La Hipótesis Oscilante como Punto Final en la Elucidación Estructural del Benceno

A pesar de la amplia difusión que gozaban los trabajos de Kekulé sobre el benceno, para inicios de 1870 su representación estructural era un asunto que estaba lejos de ser generalizable. La razón es que daba lugar a dos anomalías importantes. La primera de ellas era que admitía desde el punto de vista teórico, la posibilidad de un cuarto isómero de los derivados disustituídos, específicamente, cuando los sustituyentes se encontraban en posiciones adyacentes (orto). Sin embargo, ningún químico de la época había podido sintetizar o dar cuenta de la existencia de dicho isómero. La segunda cuestión problemática tenía que ver con la clara distinción que ya existía entre el comportamiento químico de los dienos y trienos conjugados con el benceno. Por consiguiente, resultaba insostenible seguir afirmando que el benceno y sus derivados formaban parte de los alquenos. Para brindar una solución a estas anomalías, Kekulé envía nuevamente un manuscrito a la revista editada por J. Liebig, el cual aparece publicado en el año de 1872. En este artículo plantea la famosa y polémica tesis oscilante. Una suposición que considera que los enlaces en la molécula del benceno se intercambian continuamente dando lugar a una oscilación entre dos estructuras equivalentes.

²La teoría de radicales fue acuñada por J. Berzelius (1779-1848) al inicio del siglo XIX. Se sustentaba en la presencia de un grupo de átomos y moléculas de composición fija e invariable al explicar la síntesis de compuestos orgánicos.

Si la propuesta cíclica-hexagonal defendida en 1866 fue considerada en un inicio como demasiado aventurada o creativa, la hipótesis oscilante era calificada de descabellada y aberrante por los oponentes de la obra de Kekulé. Con el paso del tiempo esta conjetura se develó como un recurso heurístico sin precedentes, pues nadie antes de Kekulé había atribuido con tal elocuencia propiedades dinámicas en la descripción molecular (BERSON, 2003). Un salto epistémico que merece ser divulgado y analizado con mayor atención por los filósofos de la química. La nueva explicación de la molécula del benceno resolvía con cierta coherencia los dos obstáculos antes mencionados. Sin embargo, como se ha mencionado fue recibida con mucho escepticismo por la comunidad de químicos.

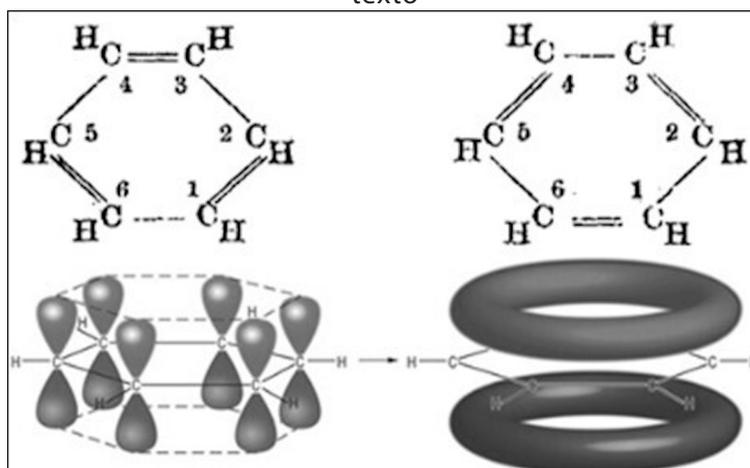
El serio problema que enfrentó Kekulé con su explicación oscilante fue la exacerbada univocidad y la posición conservadora que caracteriza a las academias al valorar los nuevos constructos científicos. Si bien es cierto, que no había pruebas experimentales ni recursos tecnológicos para la validación fáctica de esta idea, esta no contradecía la evidencia empírica disponible sobre los compuestos aromáticos. Por el contrario fortalecía su explicación. Tampoco se contaba con una formulación teórica más elocuente y poderosa para refutar la hipótesis oscilante. La gran contribución de Kekulé en su texto de 1872 fue el plantear un modelo altamente refinado para crear accesos epistémicos a un campo de conocimientos en construcción. Hoy es ampliamente compartido que, los modelos son recursos con una amplia connotación simbólica cuya relación con la verdad es relativa. Puesto que su valor no reside exclusivamente en la consistencia de dicha relación sino en su capacidad de robustecer nuestro entendimiento sobre diversos fenómenos (ELGIN, 2006).

Ante la imposibilidad de ser refutada, la descripción oscilante poco a poco fue ganando adeptos, tal como ocurrió con la estructura hexagonal. Dos años después de su formulación en 1874, el propio H. Kolbe (KOLBE, 1874) reconoció a la obra de Kekulé como la más completa y coherente para abordar el estudio de los compuestos aromáticos. El haber resistido el ataque del prestigioso grupo de trabajo del químico de la Universidad de Leipzig e inclusive haber obtenido su reconocimiento público, le confirió fama, renombre y fortaleza al trabajo desarrollado por Kekulé en todo el mundo.

Con el descubrimiento del electrón a comienzos del siglo XX y el advenimiento de la mecánica cuántica, la explicación de las propiedades de los enlaces presentes en la molécula del benceno se perfeccionó como producto de una disputa entre la teoría de enlace valencia (TEV) desarrollada por Linus Pauling (1901-1994) y la teoría de orbitales moleculares (TOM) defendida por Charles Coulson (1910-1974). En ambos casos, la tesis oscilante de Kekulé constituyó un referente o punto de partida.

Pauling al comienzo de la década de los treinta analizó la estabilidad de los electrones pi (π) del benceno y concluyó que el comportamiento químico de esta sustancia orgánica se debe a un fenómeno que denominó resonancia (PAULING; WHELAND, 1933). Una propiedad que alude a la combinación lineal de los orbitales presentes en estructuras parciales. Pragmáticamente, esta noción se ha utilizado para explicar el fenómeno de distribución electrónica en moléculas que poseen dobles y triples enlaces. El concepto de resonancia ha sido ampliamente aceptado por los químicos porque tanto su utilización como su explicación prescinde del tratamiento matemático. En décadas posteriores, la TOM reestructuró significativamente el marco explicativo para entender el enlace químico. En este contexto, Charles Coulson (1910-1974) propuso sustituir el concepto de resonancia y utilizar la noción de deslocalización electrónica para describir la estabilidad del anillo aromático (COULSON, 1956).

Figura 5 – Representación del benceno usada por Kekulé e diagramas utilizados en los libros de texto



Nota sobre la figura 5: arriba, representación del benceno usada por Kekulé (1872) para explicar la oscilación de dobles enlaces. En la misma figura, abajo de la representación del benceno, diagramas utilizados en los libros de texto al abordar la deslocalización de los electrones π (π) en el benceno.

Fuente: reelaborada de Rocke (2014) y Farré y Lorenzo (2012).

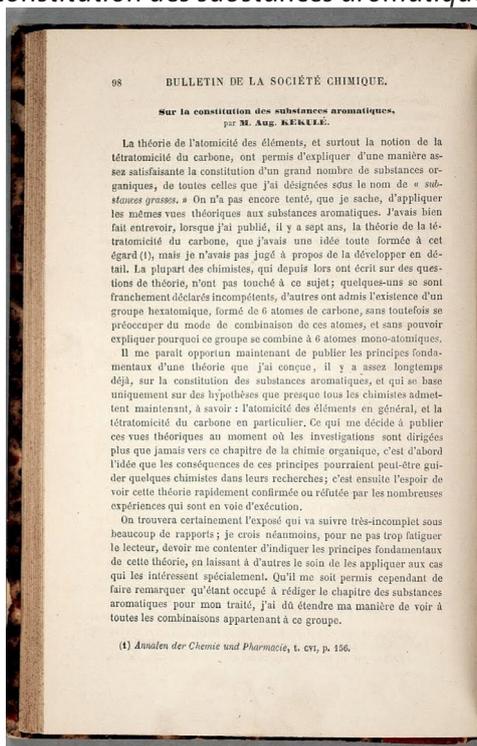
En la actualidad, en los libros de texto de química orgánica permea una visión complementaria proveniente de los enfoques antes mencionados. Ya que, en la mayoría se suele presentar al benceno como un híbrido de resonancia de las dos estructuras que Kekulé modeló en su manuscrito de 1872. Para posteriormente representar por medio de diagramas, la deslocalización electrónica en el marco de la TOM (FARRÉ; LORENZO, 2012).

Implicaciones Educativas del Tema

Los compuestos aromáticos constituyen un tema de referencia obligada en el estudio de la química covalente en la enseñanza de nivel medio y superior. Esto se debe a las fuertes implicaciones industriales, económicas, tecnológicas y sociales asociadas con este tipo de sustancias. En la actualidad, el benceno y sus derivados se utilizan como materia prima en la fabricación de plásticos, caucho, pigmentos, polímeros, fibras sintéticas, pesticidas, detergentes, fármacos y explosivos. También son utilizados como reactivos analíticos – principalmente como disolventes – en los laboratorios de investigación científica, están presentes en importantes productos naturales y son un componente importante del petróleo.

Otro factor a considerar sobre la relevancia educativa del tema es que la elucidación estructural del benceno representa un episodio fascinante en la historia de la química, pues ejemplifica el valor que posee la creatividad y la heurística en la construcción del conocimiento científico. Una cuestión que contribuye a romper con la arraigada visión de que son únicamente los métodos y esquemas rígidos los que hacen posible el avance de la ciencia. En el trabajo docente, la reconstrucción histórica presentada en este escrito permite incentivar en las aulas el reconocimiento de la importancia que posee la incertidumbre, la experimentación, la colectividad, la competencia, los compromisos compartidos y la creación de consensos en el avance tanto de la química como de la ciencia en general. Elementos necesarios para ofrecer una visión contextualizada de esta disciplina, la cual dote de significado a su aprendizaje.

Figura 6 – primera página del artículo de 1865 publicado por A. Kekulé con el título: *Sur la constitution des substances aromatiques*



Fuente: tomada de Rocke (2014).

En este trabajo se considera que, promover la búsqueda de un entendimiento coherente y reflexivo en la revisión de un tema, la consideración de diferentes ópticas en su análisis, el reconocimiento de supuestos e implicaciones, así como el establecimiento de inferencias incentiva el desarrollo del pensamiento crítico en las clases de química. Un objetivo que es referenciado como prioritario en la educación científica en el siglo XXI (MEINGUER LEDESMA, 2019). Finalmente es importante señalar que, fomentar el examen de las controversias que dieron lugar al establecimiento de la estructura del benceno, representa una oportunidad para robustecer el acervo de episodios químicos en el fomento de aprendizajes relacionados con la naturaleza de la ciencia y, evitar con ello, el reduccionismo que suele imperar al referenciar este tipo de contenidos en las aulas.

Conclusiones

Los compuestos aromáticos son en la actualidad un área de conocimientos importante en el campo de la química orgánica y un referente en su enseñanza tanto en el nivel medio como superior. Una ruta para hacer más significativo y reflexivo su aprendizaje es promoviendo el análisis histórico sobre la elucidación de su unidad estructural, el benceno. En este trabajo se ha presentado una breve reconstrucción de los hechos, personajes y controversias que permitieron a August Kekulé desarrollar las bases epistemológicas en la descripción estructural de dicho compuesto. Pues se considera que, el trabajo desarrollado por este químico alemán es uno de los más creativos, elegantes y representativos dentro de la química. En consecuencia, resulta un ejemplo idóneo para mostrar en las aulas el proceso de construcción, validación y evolución del conocimiento químico.

La obra de Kekulé sobre el ciclo aromático fue sumamente creativa porque tomando como base un número reducido de experimentos, pudo elaborar dos postulados que

potenciaron el desarrollo y consolidación de la química orgánica: (1) la existencia de estructuras cerradas con enlaces dobles y alternados para explicar la reactividad de los compuestos aromáticos; y, (2) la atribución de propiedades dinámicas a este tipo de compuestos. Su formulación es descrita como elegante porque como se ha mencionado en este escrito, representa una aplicación refinada de la denominada teoría estructural. También, porque resultó consistente tanto para explicar evidencias nuevas como hechos vigentes de la época y aunque causó fuertes controversias entre la comunidad de especialistas, su descripción estructural del ciclo aromático no pudo ser refutada sino perfeccionada con el tiempo. La obra de Kekulé es catalogada como representativa porque en su construcción, este notable químico se valió de nociones conceptuales y metodológicas que han estado fuertemente arraigadas en el accionar histórico de la química, como es el caso de valencia, composición, equivalencia, isomería, síntesis y reactividad, por mencionar algunas. Otro dato a tomar en cuenta es el importante papel que han jugado los compuestos aromáticos en el desarrollo de esta ciencia.

Finalmente, un aspecto a resaltar es que el trabajo aquí presentado puede contribuir a robustecer el dominio disciplinar del tema en el profesorado, así como servir de guía en la elaboración de futuras investigaciones basadas en el análisis histórico de otros contenidos químicos que se consideran curricularmente relevantes.

Referencias

ASIMOV, I. *Breve historia de la química*. Madrid: Alianza, 1990.

BERSON, J. *Chemical discovery and the logicians' program: a problematic pairing*. New York: Wiley-VCH, 2003.

COULSON, C. A. *Valence*. Oxford: Clarendon, 1956.

CUELLAR FERNANDEZ, L.; QUINTANILLA GATICA, M.; BLANCAFORT, A. M. La importancia de la historia de la química en la enseñanza escolar: análisis del pensamiento y elaboración de material didáctico de profesores en formación. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 16, n. 2, p. 277-291, 2010.

DAYAN, A. The circumstances of Kekule's 'molecular dream' in London in 1854. *Bulletin for the History of Chemistry*, Washington, v. 31, n. 1, p. 28-30, 2006.

ELGIN, C. From knowledge to understanding. In: HETHERINGTON, S. (ed.). *Epistemology futures*. Oxford: Oxford University Press, 2006. p. 199-215.

FARRÉ, A.; LORENZO, M. De la construcción del conocimiento científico a su enseñanza: distintas explicaciones sobre la estructura del benceno. *Educación Química*, México, v. 23, p. 271-279, 2012.

JENSEN, W. B. Logic, history, and the teaching of chemistry: III. One chemical revolution or three? *Journal of Chemical Education*, Washington, v. 75, n. 8, p. 961-969, 1998.

KEKULÉ, A. Ueber die constitution und die metamorphosen der chemischen verbindungen und über die chemische natur des kohlenstoffs. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, Weinheim, v. 106, n. 2, p. 129-159, 1858.

KEKULÉ, A. Sur la constitution des substances aromatiques. *Bulletin de la Société Chimique de Paris*, Paris, v. 3, p. 98-110, 1865.

KEKULÉ, A. Untersuchungen über aromatische verbindungen. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, Weinheim, v. 137, n. 2, p. 129-196, 1866.

- KEKULÉ, A. Ueber einige condensationsprodukte des aldehyds. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, Weinheim, v. 162, n. 1, p. 77-123, 1872.
- KIKUCHI, S. A history of the structural theory of benzene-the aromatic sextet rule and Hückel's rule. *Journal of Chemical Education*, Washington, v. 74, n. 2, p. 194-201, 1997.
- KOLBE, H. *Über die chemische constitution der organischen kohlenwasserstoffe: vortrag nebst eröffnungsrede*. Berlin: Vieweg Verlag, 1869.
- KOLBE, H. Ueber eine neue darstellungsmethode und einige bemerkenswerte eigenschaften der salicylsäure. *Journal für Praktische Chemie*, Leipzig, v. 10, n. 1, p. 89-112, 1874.
- KÖRNER, W. Faits pour servir a la determination du lieu chimique dans la serie aromatique. *Bulletin de l'Académie des Sciences de Belgique*, Bruxelles, v. 24, n. 2, p. 166-185, 1867.
- LADENBURG, A. Bemerkungen zur aromatischen theorie. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, Berlin, v. 2, n. 1, p. 140-142, 1869.
- LOSCHMIDT, J. *Chemische studien, v. 1*. Vienna: [s.n], 1861. [Facsimile edition: Milwaukee: Aldrich Chemical Co, 1989].
- MEINGUER LEDESMA, J. La virtud, un paradigma filosófico loable en la educación química. *Educación Química*, México, v. 26, n. 1, p. 43-49, 2015.
- MEINGUER LEDESMA, J. La comunicación de la nanotecnología del carbono a través del análisis crítico de textos informales en la educación química preuniversitaria. *Mundo Nano: revista interdisciplinaria en nanociencia y nanotecnología*, México, v. 12, n. 22, p. 3-35, 2019.
- MORENO MARTÍNEZ, L.; CALVO PASCUAL, M. A. Las narrativas históricas en los libros de texto de ESO y bachillerato: análisis de dos mitos fundacionales de la química. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, Madrid, v. 114, n. 3, p. 172-180. 2018.
- NOE, C.; BADER, A. Facts are better than dreams. *Chemistry in Britain*, London, v. 29, n. 2, p. 126-128, 1993.
- PAULING, L.; WHELAND, G. W. The nature of the chemical bond. V. The quantum-mechanical calculation of the resonance energy of benzene and naphthalene and the hydrocarbon free radicals. *The Journal of Chemical Physics*, New York, v. 1, n. 6, p. 362-374, 1933.
- ROCKE, A. J. *Image and reality: Kekulé, Kopp, and the scientific imagination*. Chicago: University of Chicago Press, 2010.
- ROCKE, A. It began with a daydream: the 150th anniversary of the Kekulé benzene structure. *Angewandte Chemie International Edition*, Weinheim, v. 54, n. 1, p. 46-50, 2014.
- ROCKE, A. J. Kekule's benzene theory and the appraisal of scientific theories. In: DONOVAN, A.; LARRY, L.; LAUDAN, R. (ed.). *Scrutinizing science*. Dordrecht: Springer, 1988. p. 145-161.
- SOLBES, J.; SINARCAS, V. Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, Valencia, v. 23, p. 123-151. 2009.
- TOBARES, L. Evolución histórica de la estructura molecular del benceno. In: GODOY, L. A. (ed.). *Problemas del conocimiento en ingeniería y geología, vol. I*. Córdoba: Editorial Universitatis, 2003. p. 130-147. Recuperado el 25 mayo 2020 de: <https://tinyurl.com/ybnynxu8>