

Moléculas mononucleares o átomos en la enseñanza de la química

Mononuclear molecules or atoms in chemistry teaching

José Antonio Chamizo Guerrero

Instituto de Investigaciones Filosóficas, Universidad Nacional Autónoma de México.

PALABRAS CLAVE:

Moléculas
Átomos químicos
Moléculas uninucleares
Prácticas químicas
Enseñanza de la química

RESUMEN:

La química está integrada por un sistema de prácticas científicas e industriales desarrolladas a lo largo de siglos. Es pragmática, experimental y relacional. A partir de las ideas de W. Jensen, sus revoluciones químicas y su jerarquía de composición/estructura de las sustancias, así como de la caracterización nuclear de elemento químico establecida por la IUPAC, es pertinente considerar en la enseñanza de la química la sustitución del concepto de átomo por el de molécula mononuclear.

KEYWORDS:

Molecules
Chemical atoms
Single-nuclear molecules
Chemical practices
Chemistry teaching

ABSTRACT:

Chemistry has been integrated through a system of scientific and industrial practices developed over centuries. It is pragmatic, experimental, and relational. Drawing on W. Jensen's ideas, his chemical revolutions, and his hierarchy of composition/structure of substances, as well as the IUPAC characterization of the chemical elements as atomic nucleus, it is relevant to consider replacing the concept of atom with that of the mononuclear molecule in chemistry teaching.

A la memoria de Bill Jensen, profesor y amigo

El uso de orbitales en el lenguaje convencional en los cursos de química para principiantes propicia que dichos cursos estén basados en la fe, con resultados lamentables. En lugar de ser uno de los cursos más populares en los campus (con sus impactantes experimentos de demostración) y uno de los más relevantes (ya que todo está hecho de átomos, y la química es la ciencia de la teoría atómica de los elementos y compuestos, y las cosas que se forman a partir de ellos), en lugar de considerarse emocionantes y pertinentes, los cursos de química para principiantes son ampliamente temidos.

Pueden ocurrir cosas lamentables cuando uno se desvía del relato histórico de una ciencia inductiva (p. 4).^[1]

Henry A. Bent

Introducción

Aquí se presentará una posición marginal alrededor del aprendizaje de la química. Una que rescata la historia y la filosofía, y con ello la particularidad de nuestra disciplina. Así, lo que hoy conocemos como química es resultado de una multitud de herencias sociales que, concretadas en oficios, influyeron en la

vida cotidiana de todas las culturas. No deja de ser sorprendente que prácticas tan diferentes como la del herrero –y la metalurgia–, el curandero –y la farmacia–, el alfarero –y la cerámica–, el panadero –y la bioquímica– hayan podido estar reunidas y terminar por fundirse en un campo común, la química, donde se estudia, se practica y se transmite cómo transformar las sustancias. En pequeñas y en muy grandes cantidades. Por ello, una posición para facilitar el aprendizaje de las prácticas químicas, tanto académicas como industriales, incluyendo temas relacionados con la estructura atómica y molecular de las sustancias, y como se indica en el epígrafe, apela a hacerlo a partir de su historia y filosofía.^[2-4]

Por prácticas se entiende la serie de actividades coordinadas y compartidas (procedimientos, propósitos, creencias) que se disciplinan mediante el cambio de normas o procedimientos “correctos” en el interior de una determinada comunidad, que es la que identifica y corrige los “errores”.^[5] Así, una práctica tiene una estructura estable con capacidad de reproducirse a través de diferentes procesos de aprendizaje, algunos de ellos experimentales.^[6,7] Las prácticas de la química tienen su propio método: análisis y síntesis, muchas veces en una combinación dialéctica.^[8,9] Más aún, a través de sus prácticas las comunidades químicas han establecido el carácter relacional de las

sustancias, por ejemplo en la diversa y compleja cantidad de reacciones ácido-base actuales, conceptualizadas a través de diferentes modelos,^[10] siendo el de Lewis el de mayor alcance.^a Dependiendo de con que otra sustancia reaccione y en el medio en que lo haga, una sustancia considerada generalmente ácida puede reaccionar como una básica.^[11] El comportamiento de las sustancias no es absoluto y por ello usamos modelos, que como todos los modelos son parciales respecto a lo que se modela. Finalmente se defenderá la idea de uno de los más destacados divulgadores de la química actuales:

Las moléculas son las unidades de significado más pequeñas en química. Es a través de las moléculas, no de los átomos, que se pueden contar historias en el mundo submicroscópico. Ellas son las palabras; los átomos, sólo las letras. Por supuesto, a veces una sola letra constituye una palabra, pero la mayoría de las palabras son agregados distintos de varias letras dispuestas en un orden particular.^[14]

La mayoría de las sustancias con las que han trabajado y trabajan hoy en día las comunidades de prácticas químicas son moleculares. Es decir, en el sentido más simple, son agregados de elementos químicos enlazados. Y con Greenwood y Earnshaw,^[15] hay que recordar que la propiedad química más importante de los elementos es la valencia, su capacidad de combinación, su capacidad de enlazarse con otros elementos.

Átomos y moléculas a lo largo de la historia de las prácticas químicas

La química consiste en crear formas de materia inéditas. Estas nuevas formas de materia, desde plásticos y detergentes hasta anticonceptivos y medicamentos contra el cáncer, han tenido un impacto extraordinario en la vida de todos. En un plano más filosófico, la química busca una comprensión más profunda de nuestro lugar en el gran esquema de las cosas, al deleitarnos con la complejidad molecular del mundo que nos rodea y sus sutiles relaciones con nosotros mismos y con otros organismos vivos.^[16]

Nina Hall

La química, como hoy la conocemos, es el resultado del trabajo de un grupo de individuos que terminaron compartiendo prácticas experimentales, robustas y estabilizadas, un lenguaje común, modelos para explicar reacciones y una entidad característica: el átomo. Se puede identificar su inicio cuando el holandés H. Boerhaave publicó el libro *Elementa Chimiae*, en 1732, y con ello consolidó, por primera vez, la enseñanza de la química en la Universidad de Leiden.^b Entre otros de los individuos "fundadores" se pueden identificar a J. Black (primera reacción cuantitativa), A. Lavoisier (lenguaje, explicación de la combustión, principio de conservación), A. Volta, (pila) J. Dalton (átomos) y J.J. Berzelius. Este último reunió, en 1818, la mayor cantidad de pesos atómicos que se tenía en ese tiempo. Hay que reconocer que en aquel momento había una importante

^a La importancia de entender las reacciones químicas a partir del modelo de Lewis se ejemplifica detenidamente en la obra de M.R. Leach y en el libro 'Química General' de J.A. Chamizo.^[11-13]

^b Este es el inicio descrito por J.C. Powers.^[17] Al menos otro autor ubica su origen didáctico en el texto 'Alchemia' de A. Libavius publicado en 1597.^[18] Aunque como su mismo nombre lo indica el texto de Libavius se refería a la alquimia, el autor comparte la idea, en su capítulo VI, de que la química se inventó y el importante papel que jugó en ello Boerhaave.

confusión entre átomos y moléculas que no se resolvió hasta el Congreso de Karlsruhe, en 1860. Una vez que la química no es únicamente teoría, su surgimiento fue acompañado por la producción industrial patentada de ácido sulfúrico mediante el proceso de las cámaras de plomo (Roebuck y Garbett) y la producción a gran escala de carbonato de sodio patentada por N. LeBlanc. La química es una ciencia y una industria en la que se transforman sustancias.^[13]

Hay una gran cantidad de libros y artículos relacionados con la historia y filosofía alrededor de los átomos y las moléculas, algunos de ellos publicados en esta revista,^[19-26] sin embargo, la aproximación de W. B. Jensen,^[27-30] concebida para enseñar las prácticas químicas y asumida posteriormente, parcial o totalmente, por diversos colegas con las mismas intenciones pedagógicas, es valiosamente provocativa.^[31-33] Uno de ellos, experto en estrategias didácticas para enfrentar las ideas previas de los jóvenes,^[33] indicó:

Los estudiantes de química que luego llegan a convertirse en estudiantes de química exitosos y, finalmente, en los profesionales de la química, ciertamente aprenden a usar la palabra "átomo" sin creer que hay átomos en el metano o el cloruro de sodio (p. 52).^[31]

Para el historiador y profesor de química de la Universidad de Cincinnati, William B. Jensen, las prácticas químicas actuales son el resultado de un proceso histórico en el que él identificó tres grandes periodos que constituyen otros tantos niveles, que de manera implícita se manifiestan en los currículos actuales. Marcó el inicio de cada periodo con otras tantas revoluciones químicas, arbitrariamente acotadas a periodos de veinte años. De acuerdo con las ideas de T. Kuhn,^[34] a partir de cada revolución reconoció el establecimiento de una forma particular de entender los fenómenos químicos, la llamada "química normal". Estas tres revoluciones y su manera de entender el mundo son:

- Primera revolución química (1770-1790). Nivel molar.
- Segunda revolución química (1855-1875). Nivel molecular.
- Tercera revolución química (1904-1924). Nivel eléctrico.

Además identificó tres grandes dimensiones a través de las cuales se interpretan las prácticas químicas: estructura, energía y tiempo, asociadas a las reacciones químicas. Todo lo anterior se resume en la Tabla 1, en lo que Jensen llamó la estructura lógica de la química.

Así, la mayoría de las prácticas químicas que se discuten en el bachillerato y en los primeros cursos universitarios pueden abordarse desde un entramado de tres dimensiones (molar, molecular y eléctrico) y tres niveles del discurso (composición/estructura, energía y tiempo). Una idea fundamental en la enseñanza de la química y que se desprende de dicho entramado es la jerarquía que se establece entre las sustancias (nivel molar), las moléculas (nivel molecular) y los electrones y núcleos con sus respectivos protones y neutrones (nivel eléctrico). Es decir, él asume que los átomos en las moléculas han perdido su identidad. Y hay que recordar, como indican los epígrafes de las diferentes secciones del presente texto, que lo que nos importa a los químicos son las moléculas, porque es con lo que principalmente trabajamos. Nunca, salvo cuando utilizamos gases nobles, accedimos a los átomos. Otra idea importante es el concepto de elemento químico como una clase de núcleo que tiene un número atómico particular, una vez que:

Todos los químicos estarían de acuerdo en que el elemento cobre está presente no sólo en el metal cobre, sino también

en el dicloruro de cobre; en un átomo de cobre gaseoso, neutro y aislado; en un ion Cu^{2+} ; y en un núcleo desnudo Cu^{29+} encontrado en el núcleo de una estrella a muy altas temperaturas.^[28]

Esta identificación del elemento químico con el núcleo atómico, es decir con el número atómico, es la misma que acepta la IUPAC y que ha sido discutida por varios profesores de química y publicada en revistas especializadas en educación.^[32,35,36] Lo que sobrevive en las reacciones químicas son los núcleos, no los átomos. De acuerdo con lo anterior Jensen propone que:

- Deberíamos abandonar el uso de términos como diatómico, poliatómico, etc., y en su lugar hablar de moléculas dinucleares y polinucleares. Asimismo, deberíamos hablar de la caracterización de la composición y la estructura molecular en términos del tipo, número y disposición de los núcleos que los componen, en lugar de los átomos que los componen.
- Deberíamos incluir los átomos neutros aislados bajo la categoría de moléculas mononucleares. En otras palabras, el término "molécula" debería dissociarse del requisito de finales del siglo XIX de que debía ser necesariamente polinuclear y, en su lugar, debería utilizarse como término general para cualquier unidad neutra, cinéticamente independiente y submicroscópica.^[28]

Desde la publicación de sus tres artículos en el *Journal of Chemical Education* el concepto de revolución química ha sido

ampliado y cuestionado, precisándose así las condiciones que permiten identificar el proceso de cambio en las prácticas químicas, como el uso de nuevos instrumentos, la incorporación de nuevas entidades o el surgimiento de diferentes subdisciplinas. Más aún, reconociendo que a pesar del cambio hay prácticas que subsisten, el término que mejor caracteriza los procesos de cambio es el de transformación. La transformación incorpora la novedad en la persistencia. Transformamos lo que ya está, lo que tenemos, y después de hacerlo siempre queda algo de lo que teníamos, un mínimo terreno común que en el caso de la química se refiere a su método: análisis y síntesis.^[37] La química surge en Europa en el periodo que va de 1732 a 1818 y desde entonces ha tenido cuatro transformaciones. La primera de ellas se identifica con el surgimiento de la química orgánica, tanto académica como industrial, y el establecimiento de la molécula como una entidad distintiva. La segunda, identificada como revolución del número atómico, va acompañada por la aceptación y el uso en las prácticas químicas de las partículas subatómicas, y por la precisión en la identificación del elemento químico. La tercera, conocida como revolución instrumental por diversos autores, marca el surgimiento de importantes subdisciplinas como la química cuántica y la biología molecular, con lo que los orbitales y los espines aparecen en los libros de texto. La industria de los plásticos se vuelve mundial. Finalmente, durante la cuarta transformación se atestigua el surgimiento y consolidación de al menos cinco subdisciplinas importantes que llevan el conocimiento químico hasta sus propios límites, incorporando nuevas entidades que se agregan a las anteriores, Tabla 2.

Tabla 1. Estructura lógica de la química.

Revoluciones químicas	Dimensión de composición y estructura	Dimensión de energía	Dimensión de tiempo
Primera. Nivel molar	Composición relativa de sustancias simples, compuestos, disoluciones y mezclas. Designación empírica de alomorfos (estado, color, forma cristalina, etcétera).	Entropías y calores de formación. Calorimetría. Energía libre y constantes de equilibrio.	Leyes experimentales de velocidad. Parámetros experimentales de Arrhenius y entropías y calores de activación.
Segunda. Nivel molecular	Fórmulas absolutas y estructurales. Racionalización de los alomorfos como variación de su composición absoluta (polímeros) o estructural (isómeros).	Interpretación molecular de la entropía. Interpretación de los calores de formación en términos de calores de atomización y de energías promedio de enlace.	Mecanismos de reacción moleculares. Interpretación molecular de entropías de activación y complejos activados.
Tercera. Nivel eléctrico	Fórmulas electrónicas (Lewis y configuraciones electrónicas). Variaciones en composición electrónica o nuclear (iones o isótopos) o estructural (estados excitados).	Cálculo de energías a partir de estructuras electrónicas. Interpretación de los espectros. Cálculo de los calores de atomización, etcétera.	Mecanismos de reacción iónicos y fotoquímicos. Efectos isotópicos, cálculo de energías de activación. índices electrónicos de reactividad.

Tabla 2. Transformaciones de las prácticas químicas.

Transformaciones	Nuevas subdisciplinas	Nuevas entidades	Nombre alternativo
Primera	Química Orgánica	Molécula	Revolución silenciosa ^[38]
Segunda	Fisicoquímica Químico-física	Electrón, núcleo atómico, isótopo, ión, radical libre	Revolución del número atómico ^[39]
Tercera	Química instrumental, química cuántica, biología molecular	Orbital, espín	Revolución instrumental ^[40,41]
Cuarta	Química organometálica, química verde, química supramolecular, nanoquímica, femtoquímica	Nanopartícula, supramolécula	Regimen histórico organometálico ^[42]

En la Figura 1 se ejemplifica lo previamente discutido por Jensen, agregando una "rama" adicional a sus diagramas jerárquicos de composición/estructura, que corresponde al trabajo desarrollado, durante la cuarta transformación química, alrededor de las supramoléculas.

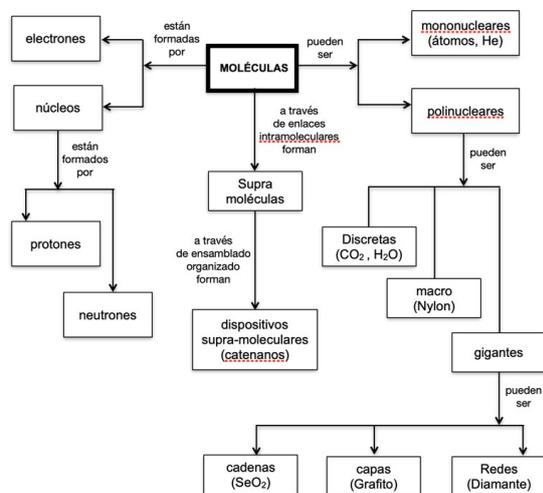


Figura 1. Estructura jerárquica de composición/estructura de las moléculas. Las moléculas son el centro de las prácticas químicas.

Más de una década después de enseñar química a nivel universitario partiendo de lo aquí indicado, Jensen encontró que la *utilización explícita de la energía y el tiempo como dimensiones conceptuales o categorías, aunque lógicamente viables, era muy abstracta para los niveles iniciales y se requería una aproximación menos compleja*. Dicha aproximación, empezaba con las preguntas que un practicante de la química se puede hacer ante una sustancia:

1. ¿De qué está hecha?
2. ¿Cómo está constituida espacialmente?
3. ¿A qué otra u otras sustancias puede cambiar?
4. ¿Qué tan rápido cambia?
5. ¿Qué tan completo es el cambio?

Estas cinco preguntas están presentes, de una manera u otra, en casi todos los temas de un curso introductorio de química.

Particularmente para el tema del presente texto precisó:

De forma similar, otro hallazgo inicial fue que los tres niveles (molar molecular y eléctrico) necesitaban también una mayor elaboración para acomodarse al conjunto de temas que se encuentran en los textos convencionales. En este caso, introduje el concepto jerarquía física u organizativa, según el cual las entidades en un nivel dado de la jerarquía sirven como los componentes de las entidades de un nivel superior. Así, los nucleones (protones y neutrones) son los componentes de los núcleos atómicos; núcleos y electrones son los componentes de los átomos; los átomos son los componentes de las moléculas; las moléculas son los componentes de las fases; las fases son los componentes de los materiales; y los materiales son los componentes de los objetos macroscópicos cotidianos.

Desde luego, los niveles mencionados son sólo un pequeño segmento de la jerarquía física completa de las ciencias modernas. En el nivel inferior, los nucleones están

hechos de quarks, y los quarks se componen de partes aún más pequeñas, etc., mientras que en el nivel superior, los objetos macroscópicos individuales son los componentes de las economías, y los ecosistemas, y todos ellos a su vez son los componentes de los planetas, los planetas son los componentes de los sistemas solares, los sistemas solares son los componentes de las galaxias, etc. Esos niveles, por encima y por debajo de nuestra jerarquía, son objeto de estudio de otras ciencias y, por supuesto, la química se solapa con muchas de ellas a medida que se aproxima a uno de los extremos de la jerarquía, en los cursos tradicionales de química, sobre todo con la física nuclear en el extremo inferior y con la ciencia de los materiales en el extremo superior.^[30]

Es importante insistir en que la propuesta de Jensen cuestiona frontalmente la manera común de enseñar química en los cursos preuniversitarios e universitarios, pero que no por ello son menos actuales o importantes. Por ejemplo, y de acuerdo con sus ideas, el profesor estadounidense H.A Bent en su inspirador libro *Molecules and the Chemical Bond* indica que el calcio metálico está formado por núcleos de Ca^{+2} en un arreglo cúbico centrado en el cuerpo, no por átomos de calcio.^[1] En el prólogo de dicho libro el mismo Jensen indicó:

Siempre he dicho a mis alumnos que el uso adecuado de los modelos de enlace no reside en usar siempre el modelo más complejo y sofisticado disponible, sino en aprender a elegir la aproximación correcta para la situación específica. Por muy accesibles y automatizados que se vuelvan los cálculos de mecánica cuántica computarizada, estoy convencido de que los químicos, y en especial los estudiantes preuniversitarios y de los primeros cursos de la universidad, tendrán la necesidad psicológica de un modelo cualitativo simple y, sobre todo, fácilmente visualizable que puedan llevar consigo y con el que puedan experimentar en sus momentos de ocio creativo.^[1]

La investigación educativa ha demostrado la enorme dificultad de que los jóvenes aprendan a interpretar el mundo a través de modelos, y que la química es diferente de la física, asunto que pocos currículos abordan con profundidad, provocando a profesores y alumnos a que reciten las verdades adecuadas en el menor tiempo posible.^[43-45]

Al dividir la historia de las prácticas químicas en diferentes periodos, llámense revoluciones o transformaciones, se facilita de manera importante la comprensión de los conceptos fundamentales, por parte de sus aprendices-alumnos. Y, de este modo, se reconoce que las entidades de las prácticas químicas se han ido acumulando a lo largo de los años y que sosteniendo su nombre han ido mutando de significado. Así, es posible identificar claramente que la historia de la química, como hoy la conocemos, es también la historia de las moléculas mononucleares, o de los átomos en sus múltiples transformaciones. Todo ello a pesar de las importantes complicaciones que tuvo su aceptación, incluyendo la negación de la existencia de los átomos por algunos químicos prestigiosos del siglo XIX, entre los que se contaba uno galardonado con el premio Nobel.^[46,47] No fue hasta las investigaciones de J. Perrin a principios del siglo XX, es decir más de un siglo después de que Dalton postulara la existencia del átomo, que la comunidad de prácticas químicas unánimemente se declaró atómica. Aceptar crudamente la existencia de los átomos es difícil. Al menos un galardonado con el premio Nobel de Química tuvo que aceptarlo para ganarlo: "sin embargo, Arrhenius logró que le

concedieran un Premio Nobel, pero lo hizo sólo después de que Ostwald anunciara su conversión al atomismo" (p. 33).^[48] Muchos de nuestros alumnos lo aceptan como un dogma, sin comprenderlo y los currícula podrían remediarlo.^c

Conclusiones

Tras cien años de Premios Nobel de Química, sabemos más que nunca sobre el mundo molecular. Nuestros conocimientos crecen rápidamente, pero las preguntas a las que deben responder los futuros químicos apenas disminuyen. Nuestra selección entre los emocionantes descubrimientos se centra en la vida de las moléculas, así como en las moléculas de la vida.^[49]

Estamos en el mundo, rodeados de agregados nucleares, que cuando son neutros los llamamos moléculas. Prácticamente nunca en nuestras vidas accedemos a átomos aislados. La química trata de sustancias, que en decenas de millones son moleculares. Con Ball recordemos: "Las moléculas son las unidades de significado más pequeñas en química. Es a través de las moléculas, no de los átomos, que se pueden contar historias en el mundo submicroscópico".^[14] Lamentablemente no lo hacemos así. La enseñanza de la estructura atómica y molecular en diferentes niveles educativos ha demostrado ser una "retórica de conclusiones" que intentando relacionar fenómenos macroscópicos con partículas microscópicas generalmente fracasa.^[50, 51]

Después de muchos años de asumirse como una ciencia reducida a la física, actualmente se puede interpretar a la química como un sistema de prácticas científicas e industriales desarrolladas a lo largo de varios siglos. Esas prácticas particulares utilizan entidades propias, como las moléculas mono y polinucleares o las supramoléculas, por las que obtuvo el Premio Nobel de Química, en 2016, J.P. Sauvage autor del libro *La elegancia de las moléculas*. Las prácticas químicas, a través de sus moléculas, también consideran la estética. Por ello, la química, pragmática, experimental y relacional debe asumirse como tal. Contra las ideas simples y dogmáticas repetidas una y otra vez,^[2] hay que atreverse a pensar de otra manera. Algunos lo han hecho y así lo han enseñado,^[33] otros no han podido ignorarlo y lo que proponen, criticando a Jensen, no necesariamente es mejor.^[32, 52-54] Sin duda en la enseñanza es muy importante tener términos precisos y útiles para la mayor cantidad de temas que se aborden con ellos. Con su amplio estudio sobre las reacciones ácido-base, su propuesta de periodizar el desarrollo de la química a través de revoluciones,^[27-29] y su destacada labor como historiador de la química, incluyendo la atómica,^[55] para enseñar química, William B. Jensen es un ejemplo a seguir.

Bibliografía

- [1] H.A. Bent, *Molecules and the Chemical Bond*, Trafford, Bloomington, **2011**.
- [2] J.A. Chamizo, A. Garritz, en *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching* (Ed: M.R. Matthews), Springer, Dordrecht, **2014**, pp. 343-374.
- [3] D. Cruz, J.A. Chamizo, A. Garritz, *Estructura atómica. Un enfoque químico*, Fondo Educativo Interamericano, Wilmington, **1986**.

^c Por ejemplo, la Sociedad Catalana de Química publicó un número completo sobre la enseñanza del átomo haciendo hincapié en sus aspectos históricos y filosóficos, *Educació Química EduQ*, **2014**, 19. Así mismo, el autor K.S. Taber lo menciona.^[33]

- [4] A. Tobin, C. Ambrosio (eds.), *Theory Choice in the History of Chemical Practices*, Springer, Switzerland, **2016**.
- [5] S.F. Martínez, X. Huang, *Hacia una filosofía de la ciencia centrada en prácticas*, Bonilla Artigas-ILF-UNAM, México, **2015**.
- [6] J.A. Chamizo, *EduQ*. **2021**, 29, 12-18.
- [7] J.A. Chamizo, *Rev. Soc. Bras. Ensino Quím.* **2024**, 5, <https://doi.org/10.56117/resbenq.2024.v5.e052402>.
- [8] G. Bachelard, *Materialismo Racional*, Paídos, Buenos Aires, **1976**.
- [9] M.G. Kim, *HYLE* **2014**, 20, 117-139.
- [10] C.J. Suckling, K.E. Suckling, C.W. Suckling, *Chemistry through models. Concepts and applications of modelling in chemical science, technology and industry*, Cambridge University Press, Cambridge, **1978**.
- [11] W.B. Jensen, *The Lewis acid-base concepts*, Wiley, New York, **1980**.
- [12] M.R. Leach, *Lewis Acid/Base Reaction Chemistry*, Meta-Synthesis.Com, Brighton, **1999**.
- [13] J.A. Chamizo, *Química General. Una aproximación histórico-filosófica*, FQ-UNAM, México, **2023**.
- [14] P. Ball, *Stories in the invisible. A guided tour of molecules*, Oxford University Press, Oxford, 2001 p. 13.
- [15] N.N. Greenwood, A. Earnshaw, *Chemistry of the Elements*, Pergamon Press, Oxford, **1984**.
- [16] N. Hall, *The age of the molecule*, Royal Society of Chemistry, London, **1999**.
- [17] J.C. Powers, *Inventing Chemistry. Herman Boerhaave and the Reform of the Chemical Arts*, The University of Chicago Press, Chicago, **2012**.
- [18] O. Hannaway, *The chemist and the word*, John Hopkins University Press, Baltimore, **1975**.
- [19] B. Pullman, *The Atom in the history of Human thought*, Oxford University Press, Oxford, **1999**.
- [20] S. Chalmers, *The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone*, Springer, Dordrecht, **2009**.
- [21] C. Giunta, *Atoms in Chemistry: From Dalton's predecessors to Complex Atoms and Beyond*, American Chemical Society-Oxford University Press, Washington, **2010**.
- [22] G. Tsaparis, *J. Chem. Ed.* **1997**, 74, 922-925, <https://doi.org/10.1021/ed074p922>.
- [23] S. Esteban, F. Peral, *An. Quim.* **2007**, 103, 59-69.
- [24] M.M. Boveri, *An. Quim.* **2014**, 110, 162-168.
- [25] J. Quilez, *An. Quim. RSEQ* **2023**, 119, 42-48, <https://doi.org/10.62534/rseq.aq.1857>.
- [26] S. Álvarez, *An. Quim.* **2024**, 120, 219-223, <https://doi.org/10.62534/rseq.aq.2010>.
- [27] W.B. Jensen, *J. Chem. Ed.* **1998**, 75, 679-687, <https://doi.org/10.1021/ed075p679>.
- [28] W.B. Jensen, *J. Chem. Ed.* **1998**, 75, 817-828, <https://doi.org/10.1021/ed075p817>.
- [29] W.B. Jensen, *J. Chem. Ed.* **1998**, 75, 961-969, <https://doi.org/10.1021/ed075p961>.
- [30] W.B. Jensen en *Química: Historia Filosofía y Educación* (Eds.: A. Stip, R. E. Sánchez, M.C. Gamboa), UPN, Bogota, **2011**, pp. 11-23.
- [31] K.S. Taber, *Found. Chem.* **2003**, 5, 43-84, <https://doi.org/10.1023/A:1021995612705>.
- [32] M. Reina, H. This, A. Reina, *J. Chem. Ed.* **2022**, 99, 2999-3006, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00411>.
- [33] K.S. Taber, *Misconceptions in Chemistry: Prevention, ¿Diagnosis and Cure?*, Royal Society of Chemistry, London, **2002**.
- [34] T. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, FCE, México, **1971**.
- [35] P.G. Nelson, *Chem. Educ. Res. Pract.* **2006**, 7, 288-289, <https://doi.org/10.1039/B6RP90015A>.

- [36] E. Ghibaudi, A. Regis, E. Roletto. *J.Chem.Ed.* **2013**, 90, 1626-1631, <https://doi.org/10.1021/ed3004275>.
- [37] J.A. Chamizo, *Crítica. Revista Hispanoamericana de Filosofía*, **2022**, 54, 57-82, <https://doi.org/10.22201/iifs.18704905e.2022.1389>.
- [38] A.J. Roche, en *Chemical Sciences in the Modern World*, (Ed.: S.H. Mauskopf), University of Pennsylvania Press, Philadelphia, **1993**, pp. 87-118.
- [39] K.B. Wray, *Found. Chem.* **2018**, 20, 209-217.
- [40] P.J.T. Morris (ed.), *From Classical to Modern Chemistry. The Instrumental Revolution*, RSC-Science Museum-CHF, London, **2002**.
- [41] J.I. Seeman, *JACS Au.* **2023**, 3, 2378-2401, <https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00278>.
- [42] E.J. Llanos, W. Leal, D.H. Luu, J. Jost, P.F. Stadler, G. Restrepo, *PNAS*, **2019**, 116, 12660-12665, <https://doi.org/10.1073/pnas.1816039116>.
- [43] B. van Berkel, W. de Vos, A.H. Veronk, A. Pilot, *A. Sci. & Ed.* **2000**, 9, 123-159, <https://doi.org/10.1023/A:1008765531336>.
- [44] J. van Aalsvoort, *I.J.Sci.Ed.* **2004**, 26, 1151-1168, <https://doi.org/10.1080/0950069042000205369>.
- [45] S.R. Singer, N.R. Nielsen, H.A. Schweingruber (eds), *Discipline-Based Education Research, Understanding and Improving Learning in Undergraduate Science and Engineering*, National Research Council, Washington **2012**.
- [46] B. Bensaude-Vincent, *Ann. Sci.* **1999**, 56, 81-94, <https://doi.org/10.1080/000337999296544>.
- [47] M.J. Nye, *Ann.Sci.* **1981**, 38, 585-590, <https://doi.org/10.1080/00033798100200391>.
- [48] P. Coffey, *Cathedrals of Science. The personalities and Rivalries that Made Modern Chemistry*, Oxford University Press, Oxford, **2008**.
- [49] B. Nordén B. et al, *The life of the molecule*. Information Department. The Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, **2001**.
- [50] J.J. Schwab, en *The teaching of science*, (Eds.: J.J. Schwab, P.F. Brandwein), Harvard University Press, Cambridge, **1962**, pp. 3-103.
- [51] P.L. Lijnse, P. Lincht, W. de Vos, A.J. Waarlo (eds.), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles. A central problem in secondary science education*, University of Utrecht, Utrecht, **1990**.
- [52] R.W. Clark, *J. Chem. Educ.* **2010**, 87, 901-902, <https://doi.org/10.1021/ed1002916>.
- [53] R.W. Clark, *J. Chem. Educ.* **2011**, 88, 382, <https://doi.org/10.1021/ed100920p>.
- [54] M.L. Matson, *J. Chem. Educ.* **2011**, 88, 381-382, <https://doi.org/10.1021/ed100878j>.
- [55] Jensen, W.B., en *Atoms in Chemistry. From Dalton's Predecessors to Complex Atoms and Beyond*, (Ed.: C.J. Giunta), American Chemical Society, Washington, **2010**, pp. 7-19.



José Antonio Chamizo

Instituto de Investigaciones Filosóficas, Universidad Nacional Autónoma de México

E-mail: jchamizo@unam.mx

ORCID: 0000-0003-2719-5437

Doctor en química organometálica por la University of Sussex. Profesor de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México desde 1977, ha publicado más de doscientos artículos, capítulos en libros y libros arbitrados sobre química, educación, historia, filosofía y divulgación de la ciencia por lo que ha recibido, entre otras razones, diferentes premios de la UNAM, la Sociedad Química de México, la Academia Mexicana de Ciencias y la Sociedad Mexicana de Historia de la Ciencia y la Tecnología. Actualmente trabaja en filosofía de la química en el Instituto de Investigaciones Filosóficas de la UNAM.