



Desarrollo histórico y epistemológico de los conceptos elemento químico, sustancia y sustancia simple (Primera parte)

Dulce María López Valentín¹ y Carles Furió Más²

Recepción: 2020-03-06

Aceptación: 2020-08-21

Resumen

La epistemología de cualquier concepto científico adquiere su pleno significado teniendo en cuenta el problema que hizo posible su conceptualización en un momento histórico dado y su posterior desarrollo. El objetivo de este artículo consistirá en recordar el problema que originó la necesidad epistemológica de introducir la idea de elemento químico a lo largo de la historia y cómo se ha ido desarrollando hasta el siglo XVIII para incidir en la epistemología del concepto de sustancia (pura) y cómo fue cambiando su relación con la del elemento químico. Este manuscrito está dividido en cuatro apartados principales, el primero de ellos titulado “El mundo natural de los filósofos griegos del siglo IV a.C.”, seguido del apartado “Aristotelismo y alquimia”, para continuar con el tercer apartado “Construcción del concepto empírico de sustancia (pura) en los siglos XVI y XVII”, y finalmente el último apartado sobre “Los conceptos de sustancia simple y elemento químico en el siglo XVIII”.

Palabras clave

Desarrollo histórico, concepto de elemento químico, concepto de sustancia, concepto de sustancia simple, enseñanza del concepto de elemento químico.

Historical and epistemological development of the concepts chemical element, substance and simple substance (First part)

Abstract

The epistemology of any scientific concept acquires its full meaning taking into account the problem that made its conceptualization possible at a given historical moment and its subsequent development. The objective of this article will be to recall the problem that originated the epistemological need to introduce the idea of the chemical element throughout history and how it has developed until the 18th century to influence the epistemology of the concept of (pure) substance and how its relationship with the chemical element changed. This manuscript is divided into four main sections, the first one entitled “The natural world of the Greek philosophers of the 4th century BC”, followed by the section “Aristotelianism and alchemy”, to continue with the third section “Construction of the empirical concept of substance (pure) in the 16th and 17th centuries”, and finally the last section on “The concepts of simple substance and chemical element in the 18th century”.

Keywords

Historical development, chemical element concept, substance concept, simple substance concept, chemical element concept teaching.

¹ Valentín, Universidad Pedagógica Nacional, México. Correo: dvalentin@upn.mx

² Universidad de Valencia, España-Correo: carles.furio@uv.es

Introducción

El concepto de elemento químico es considerado un prerrequisito para el estudio de la química, esencial para comprender la idea daltoniana sobre el cambio químico y, por lo tanto, comprender conceptos posteriores y más complejos, tales como: reacciones químicas, cantidad de sustancia y todos los problemas estequiométricos que se derivan de él. El concepto de elemento químico es fundamental para comprender la química y para interpretar correctamente sus transformaciones (López, 2008; López y Furió, 2013). Consideramos que el concepto de elemento químico es estructurante por las siguientes razones (López, 2008):

1. Permite explicar la diversidad de materiales ordinarios existentes con unos pocos elementos químicos, constituyendo este conjunto una estructura unitaria.
2. Estructura unitaria que también posibilita la explicación de los cambios materiales en las transformaciones químicas al suponer que en ellas se conservan los diferentes elementos químicos que intervienen.

Por otro lado, la carencia generalizada del aprendizaje significativo de cualquier concepto científico, como se ha visto en la investigación, ha de relacionarse con análisis crítico de cómo se realiza su enseñanza. Se cree que una de tantas razones de esta falta de aprendizaje significativo en los estudiantes, pudiese deberse al desconocimiento de los profesores sobre la historia de la ciencia (evolución de los modelos históricos hasta los actuales), así como a la existencia de visiones epistemológicas deformadas sobre la naturaleza de la ciencia y la actividad científica (Furió, 1994; McComas *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 2002). La transmisión de estas visiones deformadas, específicamente en la enseñanza de la química, se manifiesta muchas veces de manera implícita en la organización y secuenciación de los contenidos de los libros de texto y en el profesorado, y se supone que también se transmitirá en la enseñanza del concepto de elemento químico. En general, se considera que se transmite una visión *aprobemática o ahistórica* de la ciencia cuando se transfieren conocimientos ya elaborados, sin mostrar cuáles fueron los problemas que generaron su construcción, cuál ha sido su evolución, ni mucho menos, las limitaciones del conocimiento científico actual o las perspectivas abiertas. Se pierde de vista que, como afirma Bachelard (1983), “*todo conocimiento es la respuesta a una cuestión*”, lo que dificulta captar la racionalidad del proceso científico y hace que los conocimientos aparezcan como construcciones arbitrarias (Fernández *et al.*, 2002, p. 480). Por otra parte, al no contemplar la evolución de los conocimientos, es decir, al no tener en cuenta la historia de las ciencias, se desconoce cuáles fueron las dificultades, los obstáculos epistemológicos que fue preciso superar, lo que resulta fundamental para comprender las dificultades de los alumnos (Saltiel y Viennot, 1985). Es por ello que es importante tener conocimiento sobre la historia de la química ya que los profesores de nivel medio superior y superior, podemos utilizarla como una herramienta para definir los conceptos estructurantes, en este caso el concepto de elemento químico, y también como un tema de clase en donde se pueden analizar o indicar las dificultades que hubo para desarrollarlos, los problemas conceptuales y los obstáculos que fue necesario superar (López, 2013).

Antecedentes

Este concepto de elemento químico ha sido revisado desde diversos puntos de vista: filosófico, histórico y conceptual. Varios autores han estudiado su desarrollo histórico a lo largo del tiempo (Partington, 1948; Holton y Roller, 1963; Rocke, 1986; Mierzecki, 1991; Bensaude-Vincent y Stengers, 1997; Brock, 1998; Jensen, 1998; McEvoy, 2000; Paneth, 2003; Hendry, 2005; Scerri,

2007; Ruthenberg, 2009; Chamizo, 2011, 2014, 2017a, 2017b, 2018, 2019; van Brakel, 2012; Chamizo y Garritz, 2014).

La historia puede contarse de diversas maneras, en términos históricos se reconoce la llamada anacrónica en donde se estudia el pasado y se valida a la luz del presente y, la diacrónica consiste en estudiar la ciencia del pasado con las condiciones que se vivían en el mismo (Chamizo, 2018). Cualquiera de las dos maneras, no es sencilla, pues los historiadores siempre estarán influenciados por el tiempo que viven y, es muy probable, que su postura sea subjetiva. Afortunadamente, para el estudio de la historia de las ciencias se reconocen dos tendencias, la primera, identifica la continuidad de formas o estilos de conocer y la segunda, de cambio o ruptura, cuando hay una revolución científica u obstáculo epistemológico (Chamizo, 2018). Para efectos de esta contribución, elegimos la ruptura o revolución científica. El filósofo e historiador Thomas Kuhn, define una revolución científica como “*la transición resultante a un nuevo paradigma*” (Kuhn, 2004, p. 162) y a su vez, define paradigma como “... *es lo que comparten los miembros de una comunidad científica y, a la inversa, una comunidad científica consta de personas que comparten un paradigma*” (p. 293). Y para entender esta idea, define comunidad científica:

...una comunidad científica consta de profesionales de una especialidad científica. En una medida sin paragon en la mayoría de los demás campos, estas personas han pasado por procesos semejantes de educación e iniciación profesional, merced a lo cual han absorbido la misma bibliografía técnica, extrayendo de ella muchas lecciones en común (...) los miembros de una comunidad científica se ven a sí mismos y son vistos por los demás como las únicas personas responsables de la prosecución de un conjunto de metas compartidas, incluyendo entre ellas la formación de sus sucesores. Entre dichos grupos la comunicación es relativamente plena y los juicios profesionales, relativamente unánimes (p.295).

Y a su vez, la ciencia normal como

...la actividad en la que la mayoría de los científicos emplean inevitablemente casi todo su tiempo, se asienta en el supuesto de que la comunidad científica sabe cómo es el mundo. Gran parte del éxito de la empresa deriva de la disposición de la comunidad para defender dicha suposición, pagando por ello un considerable precio si fuera necesario. Así, por ejemplo, es frecuente que la ciencia normal suprima novedades fundamentales porque necesariamente son subversivas en lo que respecta a sus compromisos básicos (pp. 29-30).

La ciencia normal es empleada por una comunidad científica en sus actividades diarias, en función de sus logros anteriores. La ciencia revolucionaria se desarrolla cuando ocurre una crisis en la ciencia normal, lo que origina un nuevo paradigma que desplaza al anterior, modificando las actividades relacionadas con la ciencia normal y, por lo tanto, también cambiará su enseñanza, ya que después de la revolución se escribirán nuevos libros de texto (Chamizo, 2014 y 2018). Por otro lado, las comunidades que asumen paradigmas o marcos conceptuales diferentes encuentran dificultades para comunicarse entre sí. “*Aunque a veces habrá hechos reconocibles desde un punto de vista que no puede identificarse ni concebirse desde algún otro. Esto es lo que Thomas Kuhn llamó inconmensurabilidad de paradigmas*” (Olivé, 2013, p. 145), concepto que retomaremos más adelante.

Con base en Chamizo (2017b), una revolución científica ocurre cuando se presenta uno o varios de los siguientes acontecimientos (p.162):

1. *Una reinterpretación radical del pensamiento existente reconocido por los propios contemporáneos*
2. *La resolución de un largo debate cuya solución revoluciona el tipo de problemas que los científicos pueden atacar con éxito de manera rutinaria*
3. *El uso de nuevos instrumentos cambia la forma en que sus profesionales se ven y trabajan en el mundo*

4. *La apertura de un nuevo nivel de comprensión teórica que subsume las teorías más antiguas como casos especiales*
5. *La apertura de una nueva subdisciplina que produce comunidades científicas separadas con sus propios vocabularios*

Con esta aproximación al estudio de la historia, es posible reconocer que las épocas históricas están marcadas no sólo por personas, instituciones o subdisciplinas, sino también por objetos epistémicos, es decir, entidades que identificamos como partes constitutivas de la realidad (Chamizo, 2018). Para el caso de la química se reconocen cinco revoluciones cada una de ellas caracterizadas por instrumentos, conceptos y la emergencia de nuevas disciplinas (Jensen, 1998; Chamizo, 2017b y 2018).

Respecto a la *incommensurabilidad*, se dice que para llegar a comprender un concepto en términos kuhnianos, es necesario realizar un análisis histórico que profundice en cómo se ha llegado a la construcción del concepto actual, en este caso, del elemento químico, por lo que será necesario conocer en qué marcos teóricos se introduce y, cuál ha sido su significado en cada uno de los modelos históricos previos al actual. La revisión histórica de este artículo únicamente hará referencia a la protoquímica, es decir desde los griegos hasta la alquimia, y a la primera revolución de la química (1754-1818) donde tiene su auge la química cuantitativa y el lenguaje químico.

Por otro lado, la epistemología de cualquier concepto científico adquiere su pleno significado teniendo en cuenta el problema que hizo posible su conceptualización en un momento histórico dado y su posterior desarrollo en los modelos preteóricos o teóricos en los que habitualmente se ha utilizado (Erduran y Duschl, 2004). De acuerdo con Caldin (2002) los conceptos fundamentales que desarrollaron la química actual desde la mitad del siglo XVIII fueron: (a) sustancia pura; (b) elementos y compuesto; (c) molécula, átomo y partícula subatómica y (d) energía. En la historia de la química hace tiempo que se planteó la necesidad e importancia que tenía para los químicos y filósofos aclarar los conceptos de elemento químico y sustancia (Partington, 1948). Así pues para comprender cómo se ha desarrollado la historia y epistemología del concepto de elemento químico será esencial conocer, también, cómo surgieron y se fueron construyendo los conceptos de sustancia (pura), sustancia simple, compuesto y átomo y, cuáles han sido sus relaciones con el de elemento. El objetivo de este primer trabajo consistirá en analizar el problema que originó la necesidad epistemológica de introducir la idea de elemento a lo largo de la historia y cómo se fue construyendo hasta el siglo XVIII. Es importante recordar la historia de los materiales de los siglos XVII y XVIII para incidir en la epistemología del concepto de sustancia (pura) y cómo fue cambiando su relación con la del elemento químico. Este conocimiento histórico y epistemológico de los conceptos de elemento y sustancia será esencial para que el profesor de química nivel medio superior y superior pueda salir al paso de una *visión empirista y ateórica* de la química (Furió *et al.*, 2005; López, 2008).¹

Respecto al origen de los materiales sabemos que en el siglo V a.C. los filósofos presocráticos de la antigua Grecia se plantearon cómo explicar la gran diversidad de materiales y objetos existentes así como las transformaciones que se producían en la naturaleza. Una primera cuestión que se plantearon consistía en argumentar si lo esencial era la permanencia de la materia o, por el contrario, se aceptaba que el cambio era continuo. Para los Eleáticos, defensores de la permanencia, los cambios percibidos por los sentidos eran meras apariencias mientras que para Heráclito, lo esencial era el cambio argumentando que cada material podía transformarse en otro cualquiera. Este problema de explicar tanto las propiedades perceptibles de los objetos reales

¹ En un segundo trabajo se continuará el estudio histórico y epistemológico del concepto de elemento químico durante los siglos XIX y XX y los posibles problemas que pueden presentarse en la enseñanza actual del elemento químico si el profesorado desconoce la historia de los orígenes de la química como ciencia.

como los cambios en la naturaleza llevó a filósofos griegos del siglo IV a.C., como Aristóteles, a plantearse la búsqueda de unos pocos componentes básicos de la materia a los que denominaron elementos o principios. En cambio otros filósofos, como Demócrito y Leucipo, proponían la existencia de átomos para explicar los objetos y cambios naturales. En este trabajo trataremos de presentar una breve historia del concepto de elemento aceptado como principio filosófico aristotélico hasta, prácticamente, el siglo XVII y cómo se construyó en este siglo y el XVIII hacia la idea de sustancia simple que se inició en el marco de la denominada filosofía mecánica experimental (Boas, 1966).

El mundo natural de los filósofos griegos del siglo IV a.C.

La mayoría de los antiguos griegos pensaban que la Tierra estaba inmóvil en el centro del universo y el sol, y el resto de los astros, se movían a su alrededor (sistema geocéntrico). Los dos principales visiones filosóficas del mundo natural, como hemos citado, que se identificaron en aquella época fueron la de un modelo constituido por elementos o principios (que podemos denominar *modelo hylemórfico*, de *hyle*, materia, y forma) y la de un modelo formado por partículas o átomos (*hylomérico*, es decir, materia y partículas).

Para Aristóteles existía una diferencia fundamental entre la física de los cielos y la del mundo terrestre. En el mundo celeste se concebía a los objetos dotados de movimientos periódicos permanentes, eran inmutables y puros, es decir, formados por un único elemento, el éter. En cambio, los objetos del mundo terrestre estaban sujetos a cambios continuos y eran impuros, es decir, estaban formados por una primera materia amorfa (*materia prima*) como sustrato común y la *'forma'* lograda por la mezcla de los cuatro elementos de Empédocles (tierra, agua, aire y fuego) que podían transmutarse (Aristóteles, 1875). Cada elemento era abstracto y representaba una combinación binaria de dos cualidades no antagónicas (caliente-frío y seco-húmedo). Por ejemplo, el elemento tierra se asociaba a las cualidades frío y seco del objeto material y el elemento contiguo agua era fría y húmeda. El elemento agua no debía confundirse con el agua 'real' que, como todos los cuerpos naturales, era una mezcla compuesta principalmente del elemento agua y los otros elementos en mucha menor proporción. Esta proporción en la mezcla es la que explicaba las cualidades perceptibles e imperceptibles de los objetos. Por ejemplo, la materia se clasificaba en *'corpórea'* que pesaba, se podía tocar y apresar como los cuerpos sólidos y líquidos y *'rara'*, espiritual (con *pneuma*), que flotaba, no se podía ver ni atrapar como los vapores y gases y, donde abundaban los elementos aire y fuego. Basándose en la observación, las mezclas corpóreas se clasificaban en heterogéneas y homogéneas, dentro de éstas últimas estaban los *"mixtos"*, considerados como resultado de la unión de dos sólidos para obtener otro con nuevas cualidades. La explicación de los cambios naturales se basaba en la visión animista de Empédocles según la cual se debían al amor o al odio de los materiales que se combinaban logrando el cambio de cualidades mediante la transmutación de sus elementos. Por ejemplo, la *'rarefacción'* (vaporización) del agua líquida al ser calentada se explicaba porque el fuego (caliente y seco) favorecía la transmutación del elemento agua (fría y húmeda) del material en elemento aire (caliente y húmedo) obteniéndose el vapor. Las ideas sobre estos cambios se encuentran plasmadas en la parte de la Física de Aristóteles denominada *"De generatione et de corruptione"* (Aristóteles, 1875; La Croce y Bernabé, 1987).

Por el contrario, para los primeros atomistas, Leucipo y Demócrito, no era lógico relacionar la existencia de un sustrato permanente en los cuerpos con el mundo de las apariencias basadas en las percepciones. Percepciones que los filósofos dividían en cualidades primarias (las físicas como el tamaño, la forma geométrica y el movimiento) y secundarias (las químicas como el

color, el sabor y la textura). Para los atomistas, los cuerpos habrían de estar formados por átomos con cualidades primarias, pero sin cualidades secundarias. En este mundo de los átomos se aceptaba que las cualidades secundarias de un cuerpo se debían no a los propios átomos sino a configuraciones determinadas de conjuntos de átomos y el cambio químico se explicaba por la conservación de los átomos, pero no de su distribución y, por tanto, era lógico que cambiaran las cualidades secundarias de los cuerpos obtenidos.

Antes de iniciar el siguiente apartado, es importante tener en cuenta, como lo menciona Chalmers (2009), “... *la historia del camino desde lo filosófico hasta el atomismo científico implicará la identificación de la aparición del adecuado tipo de experimentación y los modos apropiados de conceptualización. La evidencia relacionada con las leyes y teorías científicas, generalmente implica intervenir e interrogar a la naturaleza de manera deliberada*” (p.10).

Aristotelismo y alquimia

El atomismo griego de Demócrito y Epicuro no atrajo a muchos seguidores antes de su renacimiento en el siglo XVII. Fue principalmente el sistema filosófico de Aristóteles el que fue asumido y desarrollado, primero por los árabes, que se convirtieron en propietarios de la filosofía griega después de la caída del Imperio Romano y, luego por los filósofos en Occidente a medida que el conocimiento de la filosofía griega llegó a Europa occidental durante la Edad Media. A partir del siglo XIII la filosofía aristotélica se integró con el cristianismo, a través de Alberto Magno y Tomás de Aquino, para formar la ortodoxia contra la cual los filósofos del Renacimiento y del siglo XVII reaccionarían (Chalmers, 2009).

La alquimia floreció en Alejandría en donde se unieron el pensamiento griego con los saberes egipcios en el periodo helénico que marcó el final de la era griega. Los tratados alquímicos se tradujeron al árabe desde el siglo VIII y se convirtieron en un foco de atención para los filósofos occidentales en el siglo XIII. En ese momento existía una tradición alquímica práctica bien desarrollada como resultado del contacto con otras culturas de tradición más artesanal y con aprecio por el trabajo manual, se concretó una actividad práctica que desde entonces conocemos como alquimia. Implicó la manipulación experimental de materiales, su preparación y descomposición en componentes mediante una variedad de técnicas como tostado, destilación, sublimación y disolución. El objetivo pragmático era producir materiales, de uso o valor, especialmente, pero de ninguna manera exclusivamente, oro. La transformación de materiales, correspondiente a lo que hoy llamamos reacciones químicas, planteó un enigma filosófico que Aristóteles había identificado: cuando dos componentes se combinan para formar un compuesto, el resultado es una sustancia cuyas propiedades difieren de las de sus componentes. Sin embargo, hay un sentido en el que los componentes persisten en el compuesto en la medida en que pueden recuperarse. Aristóteles no da un ejemplo, pero la composición del bronce a partir del cobre y estaño habría servido para su propósito. Las transformaciones de los materiales por los alquimistas provocó un desafío fundamental para los aristotélicos (Chalmers, 2009; Chamizo, 2018).

En el siglo X...

...Rhazes, uno de los importantes alquimistas y médico islámico, estableció por primera vez la separación de las sustancias con base en su origen (minerales, vegetales, animales y artificiales). Además identificó al menos 53 de ellas como hoy las conocemos y dejó instrucciones de cómo obtenerlas en su famoso Libro de los secretos, dividido en tres partes (aparatos y utensilios, recetas y sustancias) y que puede entenderse hoy como antecedentes de los manuales de química. Clasificó las técnicas de laboratorio conocidas en la época en cuatro grupos: procedimientos de purificación; de separación; de mezcla y, finalmente, de eliminación de agua o solidificación (Chamizo, 2018, p.26).

Muchos años después del inicio de la alquimia en Alejandría, el alambique se perfeccionó, se preparaban medicinas y surgió la primera farmacia.

En el siglo XI se publicaron las primeras recetas para producir pólvora en China. Años después, la Europa medieval mantuvo relaciones con China y de pronto, el papel, la brújula, la seda y la pólvora se instalaron en lo que hoy se conoce como Occidente. En el Renacimiento (1500 aproximadamente), la alquimia en sus diferentes versiones, se practicaba desde Inglaterra hasta China, pero poco a poco cedió el paso a la iatroquímica, cuyos intereses medicinales intentaba explicar la diferencia entre venenos y medicamentos (Chamizo, 2018).

Construcción del concepto empírico de sustancia (pura) en los siglos XVI y XVII

Respecto a la estructura de la materia en los siglos XVI y XVII convivían varias posturas filosóficas, entre las cuales destacamos: las pluralistas y las mecanicistas. Desde principios del siglo XVI una de las filosofías pluralistas seguía la tradición aristotélica alquímica, basada en la aceptación de los cuatro elementos que perduró hasta mediados del siglo XVIII. Por ejemplo, las prácticas metalúrgicas en la extracción de metales y la preparación de aleaciones seguían esta tradición alquímica donde predominaba la visión animista según la cual cuando un metal ordinario imperfecto se tenía que transformar en oro, metal perfecto, había de pasar por una serie de etapas de crecimiento como las de un niño. Para estas transmutaciones metálicas los árabes de la Edad Media ya habían recurrido al origen aristotélico de los minerales considerando dos exhalaciones: una húmeda (el mercurio) y otra seca y humeante (el azufre). De ahí que surgieran los dos primeros principios hipostáticos de la *tria prima*: el azufre (inflamabilidad) y el mercurio (fusibilidad). A mediados del siglo XVI, Paracelso agregó el tercer principio, la sal (sabor) y extendió la *tria prima* a la composición de todos los cuerpos (Grapi, 2012). Los paracelsianos conocidos como iatroquímicos vinculaban su práctica médica a la preparación de medicinas específicas de origen vegetal o mineral con el fin de eliminar el veneno que había en el enfermo y parece ser que fueron los primeros en enfatizar la pureza de los materiales debido a su mayor eficacia. Por ello hay autores (Chalmers, 1990) que atribuyen a los iatroquímicos, la conceptualización empírica de sustancia como cuerpo puro, no mezclado, que tenía propiedades observables e inobservables (simpatía, afinidad y otras fuerzas ocultas) que permitían tanto su reconocimiento como la interpretación de los cambios químicos.

Por otra parte, en el siglo XVI también estaban presentes las filosofías mecanicistas, derivadas de la antigua doctrina corpuscular de Demócrito popularizada siglos después por el poeta Lucrecio, en las que se aceptaba como natural el movimiento de los átomos en el vacío. Conviene recordar que uno de los primeros filósofos mecánicos que puso en cuestión la existencia de los elementos y principios hipostáticos en el siglo XVII fue Robert Boyle, como puede leerse en la segunda parte de su obra *'The Sceptical Chymist'* (1661). Según Boas este rechazo de Boyle fue debido a razones de tipo experimental, es decir, los elementos y principios aristotélicos no se podían extraer de los cuerpos naturales como expresó Boyle en su ensayo *'Of the imperfection of the chymist's doctrine of qualities'* en su *'Mechanical Origin and Production of Qualities'* (1675). Boas (1966, pp. 217-219) reproduce las selecciones (1) y (2) de aquel ensayo de Boyle. En la (1) se clasifican los materiales en *mezclas*, '*cuerpos perfectamente mezclados*' (mixtos) y *cuerpos perfectamente sin mezcla* (sugiriendo que estos últimos podían ser los elementos) y en la (2), expone las ideas entonces vigentes de la filosofía mecánica de partículas y sus agrupaciones variables para interpretar los cambios en las propiedades o cualidades de los productos obtenidos en una reacción química.

La influencia de la filosofía mecánica de Boyle fue determinante no solo en la física sino también en la evolución del pensamiento químico ya que supuso un cambio de orientación durante el siglo XVII que influyó, por ejemplo, en el *Optics* de Newton y, posteriormente, en el siglo XVIII en los trabajos de Lavoisier. Boyle también influyó en autores contemporáneos de libros de química sobre materiales que se popularizaron en el mismo siglo XVII como el *Traité* de Nicaise Le Fevre (1664) y el *Cours de Chimie* de Nicolás Lemery (1675) en los que podemos ver el significado dado a la idea de sustancia. Según Klein y Lefèvre (2007) en el *Traité* de Le Fevre encontramos la clasificación paracelsiana de los materiales en dos grupos: los ‘*mixtos naturales*’ y las ‘*sustancias puras*’. Las denominadas ‘*sustancias puras*’ eran aquellos materiales obtenidos al procesar los mixtos en laboratorios de químicos, farmacéuticos, ceramistas o de otras artes industriales para utilizarlos en la práctica. Esta tradición investigadora consistía, según Klein y Lefèvre, en elaborar ‘*experimental histories of substances*’ con el fin de acumular datos perceptibles e imperceptibles sobre materiales de uso cotidiano. Hay que tener en cuenta que la clasificación de las ‘*sustancias puras*’ dependía no solo de sus propiedades empíricas sino también de la interpretación filosófica de sus procesos de obtención, como se expresa en este fragmento:²

Su clasificación de sustancias puras —cierto tipo de preparaciones químicas— se basaba en un criterio taxonómico que combinaba características perceptibles de las operaciones químicas con su interpretación de ‘purificación’ o ‘exaltación’, un modo de clasificación también elegido por Libavius. La subdivisión adicional de esencias y otros tipos de sustancias puras se basó en sus propiedades perceptibles y virtudes médicas.

(Klein y Lefèvre, 2007, p. 55) —traducción propia—.

Respecto a los elementos y principios hipostáticos que entraban en la composición de los mixtos naturales es interesante mostrar cómo los mismos filósofos pluralistas del siglo XVII relativizaban su importancia. En una de las primeras ediciones del ‘*Course de Chimie*’ de Lemery (1687), contemporáneo de Boyle, se indica explícitamente que “*el primer principio de la química era un ‘espíritu universal’ de carácter metafísico que daba lugar a la diversidad de materiales y que era mejor considerar principios más accesibles a los sentidos*”. Después señalaba que “*lo que habitualmente se denominan ‘principios químicos’ no son más que sustancias separadas y divididas hasta el límite en que los débiles esfuerzos humanos eran capaces de hacerlo*” (Bertomeu y García, 2006, p. 23). Mientras que Klein y Lefèvre (2007) reiteran que se trataba de una solución práctica adoptada por muchos metalúrgicos, curtidores, boticarios, destiladores, alquimistas y tecnólogos de otras artes durante los siglos XVII para interpretar los resultados obtenidos en sus laboratorios y talleres. No obstante, en el texto de Lemery se insertaban muy pocas explicaciones corpusculares en los procesos que se describían como, por ejemplo, la de atribuir cualidades físicas a las partículas de los ácidos como la de ser puntiagudas para explicar el ataque a los metales. Argumento muy criticado por los filósofos pluralistas.

Los conceptos de sustancia simple y elemento químico en el siglo XVIII

A principios del siglo XVIII va cambiando gradualmente la idea de los mixtos en los alquimistas paracelsianos del siglo anterior en el que van desapareciendo algunos de sus atributos filosóficos y se pone el énfasis en que ha de ser una sustancia que no solo se ha de descomponer en otros

² *His classification of pure substances —certain kinds of chemical preparations— relied on a taxonomic criterion that combined perceptible features of chemical operations with their interpretation as either ‘purification’ or exaltation’—a mode of classification also— chosen by Libavius. The further subdivision of essences and other kinds of pure substances relied on their perceptible properties and medical virtues.* (Klein y Lefèvre, 2007, p. 55).

componentes más simples sino que, además, éstos han de poder unirse para sintetizarla. Como Klein y Lefèvre (2007, p. 84) indican, la primera taxonomía para clasificar los materiales conocidos la elaboró el médico y farmacéutico francés Geoffroy en 1718 basándose en la intensidad de las fuerzas (*rappports*) con que se combinaban las sustancias en forma de tablas de afinidades químicas. En esta clasificación Geoffroy (1996) interpretó las reacciones de desplazamiento que se habían utilizado en las síntesis de sales neutras, de óxidos metálicos y de los gases. Clasificación que aumentó el interés por la composición de las sustancias y las reacciones químicas. Durante este siglo se prodigaron estas clasificaciones, pues surgieron más de 20 tablas diferentes de afinidades entre las que destacó la del mineralogo sueco Bergman (1735-1784) con más de 50 columnas con 25 tipos de ácidos, 15 tierras y 16 sales metálicas mediante las cuales podía predecirse, por ejemplo, el resultado de la doble descomposición de dos sales (Bertomeu y García, 2006, p. 23).

En este mismo sentido, según Jensen (1998), es a finales del siglo XVIII cuando, se produce la ‘primera revolución química’ que suele atribuirse a Lavoisier y colegas franceses en la que se presenta un sistema taxonómico que ordena la mayoría de las sustancias conocidas separando las que no se descomponen de las compuestas. En su discurso preliminar del ‘*Traité élémentaire de Chimie*’ (1789), Lavoisier (1799) critica inicialmente la falta de perspectiva en el estudio de la relación entre elementos y átomos como puede observarse en las páginas xxiii-xxiv del Preface de la 4ª edición traducido al inglés por Robert Kerr³:

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

Lavoisier (1799, p. xxiii-xxiv) —traducción propia—.

Y trata de sustituir la concepción filosófica de elemento como idea abstracta contenida en los cuerpos por la idea empírica de sustancia simple concebida como ‘cuerpo puro’ (sustancia) que no puede ser descompuesto por métodos químicos. Sin embargo, en la terminología de las sustancias (puras) usadas por Lavoisier y colegas en el ‘*Tableau de la nomenclature chimique*’ incluido en la ‘*Méthode*’ (Guyton de Morveau *et al.*, 1787), se observa que la columna I está dedicada a las ‘*substances non décomposées*’ (sinónimo de ‘sustancias simples’ aún no descompuestas) y en esta categoría se incluían la luz, el calórico, el oxígeno, el azoe y el hidrógeno como posibles elementos

³ “All that can be said upon the number and nature of elements is, in my opinion, confined to discussions entirely of a metaphysical nature. The subject only furnishes us with indefinite problems, which may be solved in a thousand different ways, not one of which, in all probability, is consistent with nature. I shall, therefore only add upon this subject, that if, by the term elements, we mean to express those simple and indivisible atoms of which matter is composed, it is extremely probable we know nothing at all about them, but, if we apply the term elements or principles of bodies, to express our idea of the last point which analysis is capable of reaching, we must admit, as elements, all the substances into which we are capable, by any means, to reduce bodies by decomposition. Not that we are entitled to affirm, that these substances which we consider as simple, may not be compounded of two, or even of a greater number of principles; but, since these principles cannot be separated, or rather since we have not hitherto discovered the means of separating them, they act with regard to us as simple substances, and we ought never to suppose them compounded until experiment and the observation proved them to be so”. Lavoisier” (1799, p. xxiii-xxiv).

o principios. El mismo Lavoisier al ‘aire vital’ lo denominó oxígeno al considerarlo el ‘principio generador de ácidos’ en consonancia con la tradición paracelsiana. Las otras 5 columnas del *Tableau* se destinan, en general, a los compuestos (*‘substances décomposées’*) entre los cuales se incluyen en la columna II por primera vez a los gases (López, 2008). Conviene observar como los autores tratan de evitar el término ‘elemento’ (Klein y Lefèvre, 2007) y ello ha hecho pensar a historiadores como Rocke (1986) que Lavoisier y Laplace realmente pensaban que no podía haber más de uno o dos elementos y que fueron sus colegas franceses quienes reforzaron la identificación entre los conceptos de elemento químico y sustancia simple.

Por otra parte, Klein y Lefèvre (2007) argumentan en su ontología histórica que durante todo el siglo XVIII se fue consolidando el concepto de *‘stoichiometric compound’* sugiriendo que su origen fue en 1830 cuando los químicos orgánicos empiezan a analizar cuantitativamente la composición de compuestos de carbono de origen vegetal y animal. Sin embargo, cabe indicar que en la historia de la química continuó siendo motivo de polémica el origen y desarrollo del concepto de compuesto químico (Holmes, 1996). Es sabido que, a finales del siglo XVIII, se presentó la controversia entre Proust y Berthollet sobre si la composición del óxido de cobre era fija o dependía del método usado en su síntesis. Controversia que pasó desapercibida para la comunidad química (Bensaude-Vincent y Stengers, 1997; van Brakel, 2012), aceptándose durante todo el siglo XIX las dos posturas con los nombres de *‘compuesto perfecto’* (Proust) y de *‘compuesto imperfecto’* (Berthollet). Por ejemplo, Mendeleev en 1864 asumió de forma ambivalente tanto la validez de los compuestos definidos como la de los indefinidos (Kaji, 2003; Niaz, 2013). Es más, esta controversia continuó en el siglo XX dando el nombre de *‘compuestos Daltónidos’* a los perfectos y *‘Bertólidos’* a los imperfectos (Partington, 1948).

En resumen, durante los siglos XVII y XVIII, aunque todavía eran hegemónicos los elementos y principios aristotélicos, fueron cuestionados por los filósofos mecanicistas ya que no explicaban los experimentos realizados con materiales en laboratorios y talleres artesanales. Klein y Lefèvre (2007) proponen que, a modo de ontología histórica, aquellos profesionales empiezan a preocuparse por la obtención y clasificación de las sustancias puras opuestas a las mezclas. Se aceptan las ideas de cuerpo puro como sustancia con propiedades características que permiten su reconocimiento, la de sustancia simple que, además de ser sustancia, no se descompone y surge el interés por la composición de las que son compuestas. No obstante, en este largo proceso el concepto de compuesto químico no fue aceptado plenamente hasta el siglo XIX mientras que la sustancia simple sugerida, primero, por Boyle y propuesta, después, por Lavoisier fue identificada como elemento químico sin mucho debate.

Conclusiones y perspectivas

El conocimiento del desarrollo epistemológico de un concepto como el elemento químico que va cambiando a lo largo de la historia según el modelo preteórico o teórico en el que se introdujo, es de vital importancia para que el profesorado conozca a profundidad el contenido científico que ha de ser enseñado. Respecto a lo señalado por Mierzecki (1991) cuando dice que *“ninguna definición de elemento químico es del todo satisfactoria”*, hemos de advertir que no existe una definición única para el elemento químico y que ésta es dependiente del modelo o paradigma histórico en el que se origina (Kuhn, 2004; Erduran & Duschl, 2004). Así, por ejemplo, mientras para la filosofía griega la idea de elemento se concretaba en las 4 formas abstractas aristotélicas para explicar todos los materiales concebidos como mezclas naturales, en cambio para la filosofía mecanicista del siglo XVIII los materiales se clasificaban en mezclas y sustancias puras (simples

y compuestas) asociando la idea de elemento químico al concepto empírico de sustancia simple. En este trabajo se han presentado brevemente los principales modelos, desde el siglo IV a.C. hasta el siglo XVIII, en los que ha ido desarrollando el concepto de elemento químico y cuando se originaron los de sustancia, sustancia simple y compuesto químico con los que está relacionado. El estudio de los materiales centrado en los siglos XVII y XVIII condujo, según los historiadores Klein y Lefèvre (2007), a una ontología histórica donde se fue relativizando la importancia de los elementos y principios hipostáticos con los que se interpretaban las propiedades de los materiales concebidos todos como mezclas hylemórficas. En efecto, se abandona la idea de que todos los materiales eran mezclas de los 4 elementos aristotélicos y se fueron introduciendo los conceptos empíricos de sustancia (pura), de sustancia simple y de compuesto con los que se podían interpretar mejor las propiedades de los cuerpos naturales y los experimentos y prácticas de profesionales que investigaban y trabajaban con aquellos materiales. A finales del siglo XVIII estas investigaciones pragmáticas condujeron a la idea de que los elementos químicos habrían de ser aquellas sustancias simples que se obtenían al descomponer los compuestos y que produjo la primera revolución química atribuida a Lavoisier y colaboradores (Chamizo, 2019). No obstante, subsistía como problema por qué el compuesto tenía propiedades distintas a las de las sustancias simples que lo habían formado. Esta revolución tuvo gran importancia en el establecimiento del modelo atómico clásico a comienzos del siglo XIX con el que la Química pasó de ser considerado, según Kant, un ‘arte sistemático’ a una ciencia moderna como veremos en un próximo trabajo.

Como principales perspectivas tenemos, por una parte, la presentación de las conceptualizaciones de elemento químico en los modelos atómico clásico (siglo XIX) y cuántico (siglo XX) de la materia. Y, por otra parte, poner en cuestión la conceptualización dual del elemento químico aceptada por la IUPAC debido a los problemas epistemológicos que se plantean en la enseñanza actual de la química que los profesores de química de nivel medio superior y superior han de tener presentes (López y Furió, en revisión).

Referencias

- Aristóteles (1875). *Metafísica*, Libro 5º, Parte 3. *Obras de Aristóteles*. Madrid, España: P. de Azcárate.
- Bachelard, G. (1983). *La formation de l'esprit scientifique*. París: Vrin. Texto traducido al castellano como *La formación del espíritu científico*. México: Siglo XXI.
- Bensaude-Vincent, B. y Stengers, I. (1997). *Historia de la Química*. Madrid, España: Addison-Wesley.
- Bertomeu, J.A. y García, A. (2006). *La revolución química. Entre la historia y la memoria*. Valencia, España: Publicaciones de la Universidad de Valencia.
- Boas, M. (1966). *Robert Boyle on natural philosophy*. Bloomington, London: Indiana University Press.
- Brock, W. (1998). *Historia de la Química*. Madrid: Alianza.
- Caldin, F. (2002). The structure of Chemistry in relation to the Philosophy of Science. *HYLE. International Journal for Philosophy of Chemistry*, 8(2), 103-121.
- Chalmers, A. (1990). *La ciencia y cómo se elabora*. Madrid, España: Siglo XXI.
- Chalmers, A. (2009). *The scientist's atom and the philosopher's stone. How science succeeded and philosophy failed to gain knowledge of atoms*. Dordrecht: Springer.

- Chamizo, J. A. (2011). La imagen pública de la química. *Educación Química*, 22(4), 320-331.
- Chamizo, J. A. (2014). The role of instruments in the three chemical' revolutions. *Science & Education*, 23, 955-982.
- Chamizo, J. A. (2017a). La cuarta revolución química (1945-1966). De las sustancias a las especies químicas. *Educación Química*, 28, 202-210.
- Chamizo, J. A. (2017b). The fifth chemical revolution: 1973-1999. *Foundations of Chemistry*, 19, 157-179.
- Chamizo, J. A. (2018). *Química General. Una aproximación histórica*. México: UNAM.
- Chamizo, J. A. (2019). Las sustancias químicas, antes y después de la construcción de la Tabla Periódica. *Educación Química*, 30(4), 98-107.
- Chamizo, J. A. y Garritz, A. (2014). Historical teaching of atomic and molecular structure. In M. Mathews (Ed.), *International Handbook of research in History, Philosophy and Science Teaching* (pp. 343-375). Dordrecht: Springer.
- Erduran, S. & Duschl, R. (2004). Interdisciplinary characterization of models and the nature of chemical knowledge in the classroom. *Studies in Science Education*, 40, 105-138.
- Fernández, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A., Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 477-488.
- Furió, C. (1994). Tendencias actuales en la formación del profesorado de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), 188-199.
- Furió, C., Calatayud, M.L., Guisasaola, J. y Furió-Gómez, C. (2005). How are the concepts and theories of acid-bases reactions presented? Chemistry in textbooks and as presented by teachers. *International Journal of Science Education*, 27(11), 1337-1358.
- Geoffroy, E.F. (1996). Table of the different relations observed in Chemistry between different substances—27August 1718. *Science in Context*, 9(3), 313-319.
- Grapí, P. (2012). *La representación de lo invisible. Tabla de los diferentes rapports observados en la química entre diferentes sustancias de Etienne-François Geoffroy*. Valencia, España: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Guyton de Morveau, L., Lavoisier, A., Berthollet, C. et Fourcroy, A. (1787). *Méthode de nomenclature chimique*. Paris, Francia: Éditions du Seuil- Cuchet.
- Hendry, R. (2005). Lavoisier and Mendeleev on the elements. *Foundations of Chemistry*, 7, 31-48.
- Holmes, F.L. (1996). The communal context for Etienne-François Geoffroy's "Table des rapport". *Science in Context*, 9(3), 289-311.
- Holton, G. y Roller, D. (1963). *Introducción a la Física Moderna*. Barcelona: Reverté.
- Jensen, W.B. (1998). One chemical revolution or three? *Journal of Chemical Education*, 75, 961-969.
- Kaji, M. (2003). Mendeleev's discovery of the Periodic Table. The origin and the reception. *Foundations of Chemistry*, 5, 189-214.
- Klein, U. & Lefèvre, W. (2007). *Materials in eighteenth-century science: a historical ontology*. Cambridge, MA: M.I.T. Press.

- Kuhn, T. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- La Croce, E. y Bernabé, A. (1987). *Aristóteles. Acerca de la generación y la corrupción. Tratados breves de historia natural*. Madrid: Gredos.
- Lavoisier, A.L. (1799). *Elements of Chemistry, in a new systematic order containing all the modern discoveries*. Translated by Robert Kerr (four edition). Edinburgh: reprinted for William Creech.
- López, D.M. (2008). *La enseñanza y el aprendizaje del concepto de elemento químico en la educación secundaria y el bachillerato. Análisis crítico y propuesta de mejora*. Tesis doctoral inédita. Universidad de Valencia, España.
- López, D.M. (2013). Presencia de la visión histórica y aproblemática de la ciencia en la enseñanza del concepto de elemento químico. En C. Celestino y M. Brzenzinki (Org.), *Aprendiendo ciencia e sobre sua natureza: abordagens históricas e filosóficas* (pp. 451-460). São Carlos: Tipographia Editora Expressa.
- López, D.M. y Furió, C. (2013). Diseño de una secuencia de enseñanza para introducir el concepto de elemento químico en la Enseñanza Secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra. pp. 1997-2001.
- López, D.M. y Furió, C. (*En prensa*). El concepto actual de elemento químico: ¿uno o dos significados? Implicaciones en su enseñanza (segunda parte). *Educación Química*.
- McComas, W., Clough, M., Almazroa, H. (1998). The role and character of the nature of science in science education. In W. McComas (Ed.), *The nature of science in education, rationales and strategies* (pp. 3-39). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- McEvoy, J. (2000). In search of the chemical revolution: interpretative strategies in the history of chemistry. *Foundations of Chemistry*, 2, 47-73.
- Mierzecki, R. (1991). *The historical development of chemical concepts*. Poland: Kluwer Academic Publishers.
- Niaz, M. (2013). Mendeleev and the periodic table. A response to Scerri. *Educación Química*, 24(3), 285-287.
- Olivé, L. (2013). La estructura de las revoluciones científicas: cincuenta años. *Revista CTS*, 22(8), 133-151.
- Paneth, F. (2003). The epistemological status of the chemical concept of element. *Foundations of Chemistry*, 5, 113-145.
- Partington, R. (1948). The concepts of substance and chemical element. *Chymia*, 1, 109-121.
- Rocke, A. J. (1986). *Chemical atomism in the nineteenth century*. Columbus, USA: Ohio State University Press.
- Ruthenberg, K. (2009). Paneth, Kant and the philosophy of chemistry. *Foundations of Chemistry*, 11, 79-91.
- Saltiel, E. y Viennot, L. (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 137-144.
- Scerri, E. (2007). *The Periodic Table. Its story and its significance*. Oxford: Oxford University Press.
- van Brakel, J. (2012). Substances: The ontology of chemistry, In A. Woody, R. Findlay, H. Needham & P. Needham (Eds.), *Philosophy of Chemistry* (pp. 191-229). UK: Elsevier.