



El concepto actual de elemento químico: ¿uno o dos significados? Implicaciones en su enseñanza (Segunda parte)

The current chemical element concept: one or two meanings? Implications in its teaching (Second part)

Dulce María López Valentín¹ y Carles Furió Más²

Recepción: 2020-02-15

Aceptación: 2020-10-12

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 revisar cómo ha cambiado el concepto de elemento químico del siglo XIX al siglo XX y cómo puede interpretarse la definición actual del concepto de elemento químico y las implicaciones que puede tener para su enseñanza. Este manuscrito está dividido en tres apartados, el primero de ellos titulado “El concepto de elemento químico en el modelo atómico clásico del siglo XIX”, seguido del apartado “La conceptualización del elemento químico en el siglo XX: ¿uno o dos significados?” y finalmente se desarrolla el último apartado sobre “Algunas visiones deformadas del concepto de elemento químico a tener en cuenta en su enseñanza”.

Palabras clave

Concepto de elemento químico, enseñanza del concepto de elemento químico

Abstract

The epistemology of any scientific concept acquires its full meaning taking into account the problem that made possible its conceptualization at a given historical moment and its subsequent development. The objective of this paper will be to review how the chemical element concept has changed from the 19th to the 20th century and how the current definition of the chemical element concept can be interpreted and the implications it may have for its teaching. This manuscript is divided into three sections, the first of them entitled “The concept of chemical element in the classical atomic model of 19th century”, followed by the section “The conceptualization of the chemical element in the 20th century: one or two meanings? And finally, the last section is developed “Some distorted views of the chemical element concept to be taken into account in its teaching.”

Keywords

Chemical element concept, chemical element concept teaching

¹ Área académica 3. Aprendizaje y enseñanza en ciencias, humanidades y artes. Universidad Pedagógica Nacional, México. Contacto: dvalentin@upn.mx

² Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales. Universidad de Valencia, España.

Introducción

En el primer artículo titulado “*Desarrollo histórico y epistemológico de los conceptos elemento químico, sustancia y sustancia simple (Primera parte)*” se hizo un recorrido histórico y epistemológico sobre el desarrollo de estos conceptos a través del tiempo, desde los filósofos griegos hasta el siglo XVIII. Para esta segunda parte nos detendremos a revisar el concepto del elemento químico en el modelo atómico clásico de Dalton del siglo XIX, el cual aportó un marco teórico adecuado para explicar la ley de Proust y la ley de la conservación de la materia de Lavoisier. Décadas más tarde se descubrieron los isótopos, situación que obligó a “reajustar” nuevamente el concepto de elemento químico y adoptar su conceptualización dual según Mendeleev. Actualmente la IUPAC comparte esta idea, define al elemento químico como conjunto de átomos con el mismo número de protones y también lo define como sustancia o como sustancia elemental. En palabras de Jensen y citado por Chamizo (2019) la palabra elemento corresponde a la idea de átomo y la sustancia simple es algo material con propiedades físicas y capaz de reaccionar en las reacciones químicas. Esta dualidad del concepto ha ocasionado y genera confusiones para su enseñanza y aprendizaje, pues al no tener claridad, es fácil incurrir en las visiones deformadas de la ciencia, como lo explicaremos en el último apartado de este manuscrito.

El concepto de elemento químico en el modelo atómico clásico del siglo XIX

La hipótesis atómica de la materia, propuesta por Dalton, nació a principios del siglo XIX, pero su consolidación no fue sencilla, abarcando todo el siglo XIX (Rocke, 1986; Brock, 1998), a lo largo del cual se produjeron crisis entre los representantes de los dos paradigmas existentes: el equivalentista y el atomista (Moreno, 2006; Furió y Domínguez, 2007; Padilla y Furió, 2008; Chamizo y Garritz, 2014). El paradigma equivalentista tenía como principal objetivo la obtención empírica de las relaciones ponderales de combinación de los elementos en los compuestos. En este sentido, Richter pensaba que obteniendo estas relaciones matemáticas se llegaría a inducir el cuerpo teórico de la Química siguiendo los mismos pasos que se dieron en los orígenes de la Física como ciencia moderna. Para ello los equivalentistas orientaban sus trabajos hacia la búsqueda de los elementos químicos, poniendo en cuestión la hipótesis atómica. Por su parte, los atomistas proponían la explicación ontológica de la tradición filosófica mecanicista, según la cual la materia estaría dividida en partículas ínfimas, indivisibles, idénticas para el mismo cuerpo simple, que se agruparían de manera diferente en cada compuesto. Dalton publica la hipótesis atómica en su obra *A New System of Chemical Philosophy* (1808-1810) y en ella incluye en forma de postulados que todos los átomos de un mismo elemento tienen la misma masa y distinta a la de los átomos de otro elemento. Dalton dio por sentado la noción de elemento químico y el hecho de que el peso de cada elemento se conserva en reacciones químicas (Chalmers, 2009). Esta hipótesis aportó un marco teórico adecuado para explicar las leyes de las proporciones constantes de combinación de Proust y la de la conservación de la materia de Lavoisier “... *nada se crea en las operaciones del arte o de la naturaleza, y puede admitirse como axioma que en toda operación existe la misma cantidad de materia antes y después de la operación*” (Cruz et al, 1988, p. 3) y para predecir posteriormente la ley de las proporciones múltiples. Dalton utilizó representaciones gráficas o diferentes símbolos para los átomos de los 20 elementos conocidos, a diferencia de la simbología de Lavoisier y, también, a la de los alquimistas que representaban de manera distinta a las sustancias. Este nuevo modelo submicroscópico aportó concreción y comprensión a la idea de elemento químico al asociarlo a un conjunto de átomos iguales en masa y se impulsó el descubrimiento de nuevos elementos.

“No obstante que la teoría de Dalton era errónea en varios aspectos, ofreció a los científicos de su época cierto número de conceptos nuevos e importantes de manera que gran parte del progreso de la química en el siglo XIX se debió a la expansión de sus ideas. Por supuesto, la aceptación del modelo de Dalton en cuanto a la existencia de los átomos no fue inmediata. Por el contrario, muchos científicos se resistieron a la idea de aceptar la existencia de dichas partículas y, a lo largo de muchos años, habrían de sucederse multitud de debates al respecto”.

(Cruz *et al.*, 1988, pp. 5-6).

Sin embargo, se identificó más aún la sustancia simple con el elemento químico. Esta confusión sigue siendo actual como puede comprobarse en muchos gráficos de la Tabla Periódica de los Elementos donde se incluyen, para darle más realismo a los elementos, las propiedades características de las sustancias simples más conocidas.

“Como resultado de la formulación de la teoría atómica de Dalton, en 1808, surgen dos grandes corrientes de investigación científica estrechamente relacionadas. La primera se dedica a la determinación de pesos atómicos y a estudiar las relaciones que guardan las propiedades de los elementos entre sí, trabajo que alcanza su culminación con la elaboración de la ley periódica de Mendeleief.

Por otro lado, el surgimiento del concepto valencia lleva a la química estructural, de manera empírica, a comprender y predecir el comportamiento de los diferentes sistemas químicos” (Cruz *et al.*, 1988, p.38).

Es en el Congreso de Karlsruhe (1860) cuando Mendeleev propone distinguir claramente las dos conceptualizaciones que se ha de dar al concepto de elemento químico: la de la sustancia simple y la de una sustancia abstracta sin propiedades. La sustancia simple es real y no se conserva en el compuesto mientras sí que lo hace la sustancia abstracta. Este elemento abstracto es concebido como una sustancia o material invisible común a sustancias, simples y compuestas, y que se caracteriza por el tamaño del peso atómico. Ghibaudi *et al.* (2013, p. 1627)¹ incluyen el siguiente párrafo de Mendeleev donde propone su conceptualización de elemento:

“En este sentido, es útil hacer una clara distinción entre las concepciones sobre un elemento como una sustancia homogénea separada y una parte material, pero invisible del compuesto (...). El óxido de mercurio no contiene mercurio como metal ni oxígeno como gas; sólo contiene la sustancia del elemento, así como el vapor sólo contiene la sustancia del hielo, pero no el hielo en sí, o como el maíz contiene la sustancia de la semilla, pero no la semilla misma.

Parece que en esta definición el autor propone una conceptualización dual para el elemento en la que hay que diferenciar claramente: la de la sustancia simple con sus propiedades características y la de una sustancia esencial, invisible, que también forma parte de los compuestos. Esta diferenciación fue oportuna para superar la confusión entre sustancia simple y el concepto abstracto de elemento químico considerado como átomos aislados con el mismo peso atómico. Así pues, en este modelo atómico clásico, se acepta, por ejemplo, al elemento oxígeno como conjunto de átomos aislados todos ellos con una misma masa de 16 u.m.a., pero considerando que puede constituir varias sustancias, simples y compuestas, con propiedades características diferenciadas. Por otra parte, se comprende que Mendeleev considerará al elemento químico como un material abstracto formado por átomos aislados puesto que, entonces, no se disponía de suficientes conocimientos sobre la estructura interna del átomo para dar una explicación teórica coherente a los enlaces interatómicos y a la ordenación de los elementos de la Tabla Periódica que solo estaba basada en un razonamiento hipotético inductivo.

¹ “It is useful in this sense to make a clear distinction between the conceptions on an element as a separate homogeneous substance, and a material but invisible part of compound (...). Neither mercury as a metal nor oxygen as a gas is contained in mercury oxide; it only contains the substance of element, just as steam only contains the substance of ice, but not ice itself, or as corn contains the substance of the seed but not the seed itself”.

Durante la segunda revolución química (1828-1874) se consolidaron los conceptos de molécula, isomería y valencia en el Congreso de Karlsruhe (1860) y también aparece la química orgánica (Chamizo, 2019).

La conceptualización del elemento químico en el siglo XX: ¿uno o dos significados?

Aunque la definición de elemento químico asumida en el modelo atómico daltoniano permaneció vigente durante todo el siglo XIX, el descubrimiento de los rayos X, la radiactividad y el electrón, el modelo nuclear de átomo, la división nuclear, así como el descubrimiento de isótopos en una misma sustancia simple, plantearon el debate sobre la necesidad de cambiar el concepto de elemento como átomos iguales en masa (Cruz *et al*, 1988; López-Valentín, 2008). Es importante aclarar que este análisis no seguirá un curso cronológico estricto ni tampoco abarcará a todos los científicos involucrados. Si el lector desea revisar un análisis más exhaustivo, le recomendamos los textos de Chamizo y Garritz (2014) y Chamizo (2017a y b). En efecto, Soddy a comienzo del siglo XX denominó ‘isótopos’ a los átomos de una misma sustancia simple que tenían distintas masas atómicas para expresar que habían de ocupar el mismo lugar en la Tabla Periódica porque tenían el mismo número de protones, o sea el mismo número atómico Z (López-Valentín, 2008). Por ello, Soddy (1913) propuso como nueva definición de elemento químico: “*Elemento: una clase de núcleos, todos los cuales tienen el mismo número atómico*”, teniendo en cuenta que lo que permanece constante en el cambio químico es la carga nuclear aunque hayan núcleos en el mismo átomo con distintas masas (isótopos) o que cambie la carga eléctrica del átomo o del ion en el cambio químico. Por el contrario, Paneth (1916 y 2003) adoptó la conceptualización dual del elemento químico según Mendeleev, es decir, el elemento como sustancia simple y como ‘sustancia básica’ en el sentido de entidad abstracta, inobservable, o sea sin propiedades características, pero portadora de múltiples propiedades, dado que entra en la composición de muchas sustancias con propiedades distintas. La sustancia simple es considerada por Paneth como una concreción macroscópica del elemento subordinada a la sustancia básica concebida como elemento abstracto. Posteriormente, la IUPAC (1997)² aceptó la conceptualización dual del elemento químico como sigue:

1. *Una especie de átomos, todos átomos con el mismo número de protones en el núcleo atómico.*
2. *Una sustancia química pura compuesta por átomos con el mismo número de protones en el núcleo atómico. A veces, este concepto se denomina sustancia elemental a diferencia del elemento químico definido en 1, pero principalmente el término elemento químico se utiliza para ambos conceptos.*

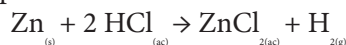
Si se está de acuerdo con la definición 2 el término elemento químico se utilizará, desde el punto de vista epistémico, indistintamente para significar la idea de sustancia elemental y la de elemento químico como sucedía en el siglo XVIII. En la actualidad la mayoría de los textos universitarios y no universitarios de química suelen iniciar el estudio descriptivo de los materiales con un capítulo titulado ‘*Elementos y compuestos*’ lo que implica que se asume la identificación entre sustancia elemental y elemento químico (LópezValentín, 2008).

Tampoco es admisible el argumento de que, según Paneth (2003, p.131), en el lenguaje químico, solamente se diferencian terminológicamente el elemento carbono de las sustancias elementales alomorfos: carbón, grafito, diamante, fullerenos y, ahora, grafeno. Se olvida que

² 1. “A species of atoms, all atoms with the same number of protons in the atomic nucleus.

2. A pure chemical substance composed of atoms with the same number of protons in the atomic nucleus. Sometimes this concept is called elementary substance as distinct from the chemical element as defined under 1, but mostly the term chemical element is used for both concepts”.

la idea, el nombre y el símbolo del elemento es un concepto que trata de explicar las distintas propiedades de las sustancias, elementales y compuestas, con las distintas estructuras que pueden formar los átomos de C que tienen el mismo Z. Y, aunque a veces el nombre y el símbolo de la especie atómica que usamos son distintos, como ocurre con los isótopos del H (hidrógeno, deuterio y tritio), todos ellos entran en el concepto del elemento hidrógeno. Como tampoco es lógico que, desde un punto de vista filosófico, se acepte que la sustancia elemental pertenece a un mundo 'realista *naive*' con sus cualidades perceptibles y la sustancia básica a un mundo trascendental desprovisto de cualidades (Paneth, 2003, p.130). Esta es una idea evocada por Mendeleev donde suponemos que la acepción del término 'sustancia' que usó es el de un 'tipo de materia' desconocida, pero totalmente distinta al de 'sustancia pura' de los filósofos mecanicistas que todavía usamos en química. Hace más de 60 años que sabemos que el átomo no es indivisible sino que tiene una estructura interna compleja y con base en este conocimiento se ha introducido la nueva definición 1 de elemento químico. La pregunta a hacerse es cómo interpretar la conservación de los elementos en una reacción química, por ejemplo: ¿qué es lo que se conserva, por ejemplo, al hacer reaccionar polvo metálico de zinc con ácido clorhídrico?



No podemos aceptar ahora la conservación de los átomos como sugería el *Modelo atómico clásico* ya que sabemos que los átomos de Zn se transforman en iones Zn^{2+} . Lo que se conserva en este proceso de transferencia electrónica son precisamente los iones Zn^{2+} que también coexisten en los átomos iniciales. Por tanto, el elemento químico según la definición 1 de la IUPAC no solamente incluirá a los átomos de Zn sino también a los iones Zn^{2+} ya que, en ambos casos, tienen el mismo núcleo. Es decir, el término 'átomo' en la definición 1 de elemento químico de la IUPAC no solo se extiende a los átomos, libres o ligados, sino también a los iones y a los distintos isótopos que suele haber en la misma especie atómica o iónica (López-Valentín, 2008; Ghibaudi *et al.*, 2013).

Algunas visiones deformadas del concepto de elemento químico a tener en cuenta en su enseñanza

La inclusión de la historia y filosofía de la ciencia al proceso de enseñanza y aprendizaje de la ciencia es ya una tradición en algunos países. Los educadores en ciencia han destacado el valor de este enfoque: la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia como un proceso; para promover el cambio conceptual y una comprensión más profunda de las ideas científicas; para apoyar el aprendizaje sobre la naturaleza de la ciencia; para fomentar la comprensión pública de la ciencia y para impactar positivamente las actitudes y el interés de los estudiantes hacia la ciencia. Por otro lado, la historia de la ciencia también puede aportar modelos a seguir de mujeres científicas para mejorar las actitudes de las niñas hacia la ciencia. Dado que la educación científica también es parte de la educación general, se ha argumentado que la historia de la ciencia contribuye a la ciencia para la ciudadanía (Höttecke & Celestino, 2011, pp. 293-294).

Hay muchas dificultades para enseñar historia de la química. Höttecke & Celestino (2011) han identificado las siguientes: habilidades, actitudes, creencias y epistemología de los profesores sobre la enseñanza; marco institucional de la enseñanza de las ciencias y falta de contenido adecuado sobre historia y filosofía de las ciencias en los libros de texto.

En este apartado, nos enfocaremos en las concepciones docentes sobre la naturaleza de la ciencia y en particular, sobre las posibles concepciones que incluyen reduccionismos y deformaciones que pueden obstaculizar, por acción u omisión, la enseñanza del concepto de elemento químico.

A continuación presentamos algunas de las deformaciones más comunes que proporcionan una imagen de la naturaleza de la ciencia (Fernández, *et al.*, 2002) señalando concretamente, en qué medida pueden influir en deficiencias didácticas en la introducción del concepto de elemento químico en la enseñanza convencional con base en el desarrollo histórico del manuscrito anterior titulado “*Desarrollo histórico y epistemológico de los conceptos elemento químico, sustancia y sustancia simple*” (López-Valentín y Furió Más, 2020a) y del actual. Se presentará a qué se refiere la visión deformada en general, lo que se espera de esta visión al introducir el concepto de elemento químico en particular y algunos resultados de la investigación de esa visión específicamente:

- a) *Visión aproblemática y ahistórica*: se transmiten los conocimientos ya elaborados sin mostrar cuáles fueron los problemas que generaron su construcción, qué ha pasado en su evolución, las dificultades, etc., ni mucho menos las limitaciones del conocimiento actual o las perspectivas abiertas. Se pierde de vista que, como afirma Bachelard (1983) “*todo conocimiento es la respuesta a una cuestión*”, a un problema, lo que dificulta captar la racionalidad del proceso científico (Fernández, *et al.*, 2002, p. 480).

En particular, se espera que:

- No se harán comentarios históricos sobre los orígenes y evolución de este concepto o si se hacen sólo serán de forma anecdótica
- No se explicita cuál es el problema estructurante que trata o ha tratado de resolver el concepto de elemento químico a lo largo de los distintos modelos conceptuales que ha habido en la historia de la ciencia (López Valentín, 2008)

Específicamente, *la visión ahistórica y aproblemática* de la química, a manera de hipótesis, se manifiesta cuando se concibe actualmente al elemento químico como sustancia (pura) y/o se asume que esta conceptualización fue descubierta por Boyle o Lavoisier (López Valentín, 2013). El profesor desconoce los problemas históricos de la filosofía aristotélica de los siglos XVI y XVII que originaron la construcción del concepto de sustancia (pura) debidos al cuestionamiento de los elementos aristotélicos porque no ayudaban a resolver las dudas de los filósofos mecánicos ni las de los iatroquímicos preocupados por mejorar la obtención de extractos cada vez más puros para curar a los enfermos (Klein y Lefèvre, 2007). También el profesorado desconoce la importancia dada en el siglo XVIII por los químicos a las clasificaciones de las sustancias con el fin de explicar sus afinidades en procesos químicos (Kim, 2003).

Se ha demostrado en investigaciones previas (López Valentín, 2013; López-Valentín y Furió Más, 2017) que *la visión ahistórica y aproblemática* de la química está presente en el profesorado. Una de las preguntas que se le hizo al profesorado para confirmar esta visión fue:

¿Haces algún comentario histórico o referencia de algún científico o científica que haya contribuido a la introducción del concepto de elemento químico? En caso afirmativo, ¿con cuál o cuáles lo asocias? Dicha pregunta tenía como objetivo conocer si los profesores utilizaban referencias o comentarios históricos sobre las diferentes definiciones de elemento químico saliendo al paso de una visión ahistórica de la química. Los resultados indican que la visión ahistórica está presente, pues prácticamente la mitad de los profesores (43,7%) asocian algún nombre a la idea de elemento químico sin estar seguros de lo que contestan, sólo indican anecdóticamente nombres de científicos(as) de forma superficial. Como la siguiente respuesta: “*El científico que lo descubrió. Algunos elementos químicos llevan el nombre del científico*”.

En la misma investigación (López-Valentín, 2013; López-Valentín y Furió Más, 2017) se solicitó al profesorado contestar un grupo de 3 ítems relacionados con la interpretación de un cambio químico a través de la recombinación y conservación de sus elementos y, se encontró lo siguiente:

El profesorado...

- ... tiene en cuenta que, en general, se conservan los elementos en el cambio químico (77%)
- ... es capaz de interpretar un proceso químico desconocido a través de la recombinación de los elementos en la reducción del CuO (67%)
- ... es capaz de interpretar un proceso químico desconocido a través de la conservación de los elementos en la descomposición del azúcar (35,4%)

Encontramos que el porcentaje de respuestas correctas disminuye conforme el grado de dificultad del ítem aumenta. En el primer caso, el ítem es muy general, pues aplica para cualquier cambio químico. Mientras que para el segundo ítem, se revelaba uno de los reactivos y se decía que el otro reactivo participante era una sustancia compuesta. También se mencionaban los productos obtenidos. Y para el tercer ítem, la única información proporcionada era sobre los productos obtenidos, omitiendo que se partía de una sustancia compuesta. Este porcentaje de respuestas lo que deja ver, es que hay bastantes profesores que no tienen claro que los elementos químicos que participan en una reacción química deben mantenerse, tanto en especie como en número de átomos. Es decir, caen en una visión aporriada, pues el concepto de elemento químico no explica los cambios químicos.

- b) *Visión empirista y ateórica*: ... Una concepción que resalta el papel de la observación y la experimentación “neutras” (no contaminadas por ideas apriorísticas), e incluso del puro azar, olvidando el papel esencial de las hipótesis como focalizadoras de la investigación y de los cuerpos coherentes de conocimientos (teorías), disponibles, que orientan todo el proceso. ... a pesar de la importancia dada (verbalmente) a la observación y a la experimentación, en general la enseñanza es puramente “libresca”, sin apenas trabajo experimental. Ello favorece que la experimentación conserve para profesores y estudiantes el atractivo de una “revolución pendiente”... (Fernández, *et al*, 2002, p. 479).

En particular, se espera que:

- Se identificará la definición operacional de sustancia simple (sustancia elemental, que no puede descomponerse) con la definición teórica de elemento químico en el nivel macroscópico de interpretación. Hay que tener presente que la idea de elemento químico, desde el punto de vista macroscópico, se puede entender como un sistema material básico ideado para explicar la composición de distintas sustancias que son los referentes empíricos (las sustancias elementales y las compuestas). Las definiciones procedimentales están basadas en conocimiento empírico aceptado como evidencias en un modelo histórico determinado que son inconmensurables con definiciones ontológicas pertenecientes a otro modelo histórico que intenta explicar causalmente aquellas evidencias (López-Valentín, 2008).

Específicamente, *la visión empirista y ateórica*, a manera de hipótesis, se manifestará en el profesorado, la confusión filosófica, según Kant, entre realidad empírica (*phenomena*) y modelo teórico (*noumena*) (López-Valentín, 2018). A este respecto conviene resaltar que, si bien existen muchas definiciones y clasificaciones filosóficas de modelo dependientes del campo de investigación en el que se utilicen, sabemos que, desde Galileo, los científicos hacen uso de los modelos concebidos como representaciones hipotéticas de carácter artificial y simplificado de los sistemas que se supone existen en el mundo físico (Del Re, 2000). Estos modelos físicos, químicos o biológicos son herramientas esenciales del pensamiento científico para interpretar las evidencias de la realidad. En el caso de que un profesor confunda el modelo con la realidad

puede fácilmente identificar la idea de elemento químico del modelo atomista clásico con la de sustancia simple introducida en el nivel macroscópico e inducir a sus estudiantes en este error epistemológico (Ruthenberg, 2009). Esta identidad entre elemento químico y sustancia simple fue asumida en la definición 2 de la IUPAC (1997) y está muy extendida en los libros de textos de Química de Bachillerato y Universidad. Por ejemplo, es frecuente encontrar en el primer capítulo de estos textos definiciones básicas de la Química y dentro de él un apartado titulado ‘Elementos y compuestos’ donde se define que: ‘*Un elemento es una sustancia que no se puede separar en sustancias más simples por medios químicos*’. Esta confusión es tradicional en los químicos cuando usan la Tabla Periódica de los Elementos de manera ambivalente tanto para darle significado de tabla de sustancias simples como de clases de átomos de los elementos (Schmidt *et al.*, 2003). Esta ambivalencia ya se reflejó claramente en el conocido Congreso de Karlsruhe, celebrado en 1860, cuando Mendeleev explicó que la segunda acepción del concepto de elemento químico, menos empírica que la primera, consistía en definirse como una sustancia abstracta sin propiedades (macroscópicas) específicas (Scerri, 2008). Esta conceptualización dual de elemento químico también suele encontrarse en artículos de investigación como, por ejemplo, cuando Schwarz y Rich (2010) defienden que la Tabla Periódica ha de interpretarse como “(...) *chemically useful arrangement of chemical elements at the macroscopic level and chemically bonded atoms at the microscopic level*”. Es decir, los elementos químicos son las sustancias simples en el nivel macroscópico y también son los átomos unidos en el nivel microscópico de representación cuando el mismo Mendeleev ya afirmó en 1860 que la Tabla Periódica era de los elementos y no de las sustancias simples. Una segunda crítica razonable a esta propuesta es: ¿cuál de las distintas sustancias alomorfas sería el elemento (macroscópico) en, por ejemplo, las 7 clases de fósforo o las 6 de carbono conocidas? Una tercera crítica sería que el elemento químico (microscópico) se habría de concebir, según el modelo cuántico del átomo, como ‘una clase de núcleos que tienen el mismo número atómico’ y no como ‘átomos enlazados’. Además, si se aceptara, en este nivel de representación, la propuesta de estos autores tendríamos que olvidarnos de los gases nobles ya que sus moléculas habitualmente son monoatómicas y, por tanto, sus átomos no están enlazados. En una investigación previa (López-Valentín y Furió Más, 2017; López-Valentín, 2018) se solicitó al profesorado responder ciertas consignas para cerciorarnos si igualaban los conceptos de sustancia simple y elemento químico, y se encontró lo siguiente:

El profesorado...

- ... diferencia entre las propiedades de la sustancia hidrógeno y las del átomo de hidrógeno (58,3%)
- ... define correctamente al elemento oxígeno a partir de 2 de las sustancias simples que forma (50%)
- ... critica en un texto la identificación entre elemento químico y sustancia simple (16,65%)
- ... no identifica a los elementos químicos como sustancias elementales en un texto (13,3%)

Las consignas iban aumentando en nivel de dificultad y el porcentaje de respuestas correctas disminuía respectivamente. Resultado que sugiere que la mayoría del profesorado no tiene claros estos conceptos y por lo tanto, no puede distinguirlos.

- c) *Visión de crecimiento acumulativo lineal*: los conocimientos aparecen como fruto de un crecimiento lineal, ignorando las crisis y remodelaciones profundas. Esta deformación es complementaria, en cierto modo, de lo que hemos denominado visión rígida,

aunque deben ser diferenciadas; mientras la visión rígida o algorítmica se refiere a cómo se concibe la realización de una investigación dada, la visión acumulativa es una interpretación simplista de la evolución de los conocimientos científicos, a la que la enseñanza suele contribuir al presentar las teorías hoy aceptadas sin mostrar el proceso de su establecimiento, ni referirse a las frecuentes confrontaciones entre teorías rivales, ni a los complejos procesos de cambio, que constituyen, en ocasiones, auténticas revoluciones científicas (Fernández, *et al*, 2002, pp. 481-482).

En particular, se espera que:

- No se comente que el concepto de elemento químico es dependiente del contexto o modelo histórico en el que se ha introducido
- Será fácil encontrar definiciones donde se superpongan las correspondientes a los diferentes modelos históricos revisados anteriormente (López-Valentín, 2008)

Específicamente, *la visión de crecimiento acumulativo lineal y acrítico* de la química se suele presentar frecuentemente en el Bachillerato al enseñar la teoría atómica clásica de la materia (López-Valentín, *en prensa*). La enseñanza de la química suele presentar un único modelo híbrido en el que se superponen, al menos, el modelo atómico clásico del siglo XIX y el atómico cuántico actual. Con este solapamiento de modelos históricos es lógico que origine problemas conceptuales y epistemológicos en el aprendiz sobre cuál o cuáles son los significados que se atribuyen a la idea de elemento químico (López-Valentín y Furió Más, 2005; López-Valentín, *en prensa*). En el mejor de los casos, se supone que se irán introduciendo en la enseñanza de la Química en la Escuela Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato sendas definiciones de elemento químico según sea el nivel educativo y el tópico estudiado. Es decir: *i*) en primer lugar, en la educación secundaria se puede introducir inicialmente la *definición ontológica de elemento como conjunto de átomos de la misma clase*, esto es, con la misma masa atómica, poniendo el énfasis en que *el elemento es un concepto inventado en el modelo daltoniano* para explicar cómo están constituidas todas las sustancias (elementales y compuestas) y cómo se explican los cambios químicos mediante la conservación y nueva distribución de los átomos indivisibles. En este contexto lo habitual es que la nomenclatura utilizada se base en los símbolos de los elementos y en fórmulas empíricas para representar a las sustancias; *ii*) en el Bachillerato y primeros cursos de la Universidad, se puede presentar el concepto de elemento cuando se haya estudiado el nuevo modelo de átomo y, en particular, cómo se distribuyen la masa y la carga eléctrica en su interior. Con este nuevo modelo teórico se explica la posición de los elementos en la Tabla Periódica, introduciendo *la nueva definición de elemento asociada a una clase de núcleo atómico caracterizado por un número atómico, Z* (Jensen, 1998). Su nombre alude a la posición del elemento en la Tabla y su significado concreto es el de la carga eléctrica positiva de dicho núcleo. Con esta nueva idea de elemento se puede explicar y predecir, una vez conocidas las estructuras electrónicas de los átomos, su comportamiento químico. En efecto, el cambio químico se explicará mediante la conservación y nueva distribución de los elementos teniendo en cuenta que, en cada elemento químico, aunque se use el mismo símbolo, hay que incluir átomos, libres o ligados en moléculas, y también aquellos iones o complejos donde figura dicho elemento. Esto es, se irán introduciendo las diferentes conceptualizaciones de elemento químico advirtiéndole al alumno que cada definición de elemento se corresponde coherentemente con un modelo y si éste se solapa con otro se presentarán confusiones en el significado de elemento.

La segunda implicación didáctica se refiere a la necesidad de evitar en la enseñanza de la química tanto las ambigüedades al presentar el concepto de elemento como la hibridación de los

modelos atómicos. Así, por ejemplo, la definición 1 de la IUPAC se corresponde con la del modelo cuántico del átomo (ii) que podemos asumir teóricamente siempre que se clarifique la expresión ‘*A species of atoms*’ como se ha indicado en el párrafo anterior. En cambio, la definición 2 es un ejemplo prototípico en el que encontramos superpuestas cuatro conceptualizaciones de elemento químico: a) la de ‘*sustancia pura*’ (*A pure chemical substance*) de la filosofía mecánica del siglo XVII; b) la de átomos (*composed of atoms*) del modelo atómico clásico (i); c) la de ‘*clase específica de núcleos*’ del modelo cuántico (ii) y d) la de sustancia simple (*elementary substance*) de Lavoisier del siglo XVIII (López-Valentín, 2008). Veamos, a título de ejemplo, como puede influir esta yuxtaposición de definiciones en el aprendizaje. En un trabajo anterior (Furió Más y Domínguez, 2007) hemos visto que la mayoría de los alumnos de secundaria de 15 y 16 años suelen confundir los conceptos de mezcla y compuesto, por una parte, y los de sustancia y elemento, por otra. O sea, es como si clasificaran, desde el punto de vista macroscópico, los sistemas materiales en dos tipos: mezclas o compuestos y sustancias o elementos. La confusión mezcla-compuesto tiene fácil explicación al deducir el estudiante que el ‘*compuesto formado por dos elementos*’ significa lo mismo que ‘*el compuesto es una mezcla de dos sustancias simples*’. Es decir, se identifica el concepto de sustancia simple (d) con el de elemento/átomos (c). Esta confusión se agrava más aún si, como ocurre habitualmente, por una parte, la enseñanza también identifica elemento con sustancia simple y, por otra, no se introduce previamente la definición macroscópica de sustancia como opuesta a la de mezcla que seguimos utilizando en el nivel macroscópico como ‘material puro con propiedades características que permiten su reconocimiento’. Precisamente al no tener clarificada la idea de sustancia (a) es cuando el estudiante la confunde con la de elemento por ser un material más sencillo que el compuesto o bien porque submicroscópicamente el elemento está formado por átomos iguales (b). En Furió Más *et al* (2012) se obtuvo que la identificación sustancia-elemento fue mayoritaria en una muestra de 187 estudiantes de Química de 15-18 años al preguntarles cuáles eran una sustancia en una cuestión donde se presentaban 4 dibujos que simulaban gases. En uno había átomos libres iguales (A), otro también con una sustancia simple, pero con moléculas diatómicas (B), un tercer dibujo era una mezcla de dos sustancias simples monoatómicas (C) y, finalmente, un cuarto era un compuesto con moléculas diatómicas (D). El 70% de la muestra respondió solamente A o A y B con átomos iguales, bien libres o ligados dos a dos, pero ninguna de estas respuestas incluyó la D como sustancia. Un ejemplo prototípico de explicación fue: ‘*Solo tenemos una sustancia pura cuando todos los átomos son iguales, sin mezclarse con ninguno*’, o sea cuando eran elementos concebidos como átomos iguales (confusión b) o cuando es una sustancia simple (confusión d).

En trabajos anteriores (López-Valentín y Furió Más, 2005; López-Valentín y Furió Más, 2017; López-Valentín, en prensa) se solicitaba al profesorado que indicara la(s) definición(es) o el(los) significados del concepto de elemento químico. Se consideraron como correctas las definiciones (a) y (b): (a) *Elementos como clase de átomos iguales en masa* que contestaron el 29,1% de profesores, (b) *Elementos como conjunto de átomos con el mismo número atómico* que respondieron 14,5% de profesores, dando un total de 43,7%. Por otro lado, las respuestas incorrectas sumaron un 42,1%. La superposición más alta fue la correspondiente al modelo del nivel macroscópico y daltoniano.

A título de ejemplo, presentamos la siguiente respuesta: “(Los elementos químicos) *son un tipo de sustancia con características propias, que pueden ser metales o no metales, que están agrupados en la tabla periódica según algunas de sus propiedades, que cuando forman compuestos pierden sus propiedades características para adquirir otras diferentes*”. En la Tabla 1 se detalla su análisis:

Tabla 1. Ejemplo de respuesta donde se incide en la visión acumulativa lineal sobre el concepto de elemento químico.

Contenido del párrafo	Deficiencia identificada
<i>“Que son un tipo de sustancia con características propias, que pueden ser metales o no metales”</i>	Confunde elemento con sustancia simple atribuyéndole propiedades características
<i>“... que están agrupados en la tabla periódica según algunas de sus propiedades...”</i>	Las propiedades corresponden a la sustancia, no al elemento, aunque puede que el texto se refiera a las propiedades del átomo (masa, volumen, etc.), en cuyo caso se estaría utilizando el concepto de elemento químico del modelo daltoniano
<i>“... que cuando forman compuestos pierden sus propiedades características para adquirir otras diferentes.”</i>	De nuevo, utiliza la idea de elemento como sustancia en el nivel macroscópico de representación

Por lo que podemos concluir que esta visión deformada está presente en una parte importante del profesorado de Química.

Conclusiones y perspectivas

El concepto de elemento químico es considerado un prerrequisito para el estudio de la Química, imprescindible para poder entender la idea daltoniana del cambio químico, y en consecuencia, para comprender conceptos subsecuentes y más complejos, como pueden ser: las reacciones químicas, la cantidad de sustancia y todos los problemas estequiométricos que se deriven (López-Valentín, 2008).

El desarrollo de modelos históricos juega un papel importante en el origen y desarrollo del conocimiento químico (Justi y Gilbert, 2000) y, especialmente en la construcción de los conceptos de sustancia y sustancia elemental, como ha sido expuesto anteriormente. Del mismo modo, conociendo la historia y la filosofía de la química, éstas ayudan a comprender mejor la naturaleza de la ciencia (Matthews, 1994). En cuanto a las implicaciones didácticas que esto puede tener para la educación química, reiteramos que el concepto de elemento químico es un concepto que el profesorado debería dominar y tenerse en cuenta en los cursos de formación y actualización para los docentes. Se cree que una de las tantas razones por las que los estudiantes consideran que todos los materiales son mezclas es porque identifican material con sustancia y clasifican como sustancia todo aquello que es observable de alguna manera, es decir, ‘aquello que pueden ver o tocar’, pudiese deberse al desconocimiento del profesorado sobre la Historia de la Ciencia, así como a la existencia de visiones epistemológicas deformadas sobre la Naturaleza de la Ciencia y la actividad científica (McComas, *et al.*, 1998; Fernández, *et al.*, 2002). Tal y como se ha expuesto en este artículo, cuando se enseña el concepto de elemento químico, es posible incurrir en la *visión ahistórica y aproblemática, la visión empirista y ateórica, y la visión acumulativa lineal y acrítica* de la química.

Respecto a lo señalado por Mierzecki (1991) cuando menciona que “ninguna definición de elemento químico es del todo satisfactoria”, hemos de señalar 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 pues, a lo largo de este par de manuscritos esperamos haber compartido con los profesores de química, de los niveles medio superior y superior, una manera de enseñar química

utilizando su historia. En el primer artículo iniciamos el recorrido desde los filósofos griegos del siglo IV a.C. hasta los conceptos de sustancia simple y elemento químico en el siglo XVIII y, en este segundo trabajo, iniciamos con el concepto de elemento químico en el modelo atómico clásico del siglo XIX, pasando por la conceptualización del elemento químico en el siglo XX para finalizar con algunas visiones deformadas de la ciencia a tener en cuenta cuando se enseña el concepto de elemento químico en la educación media superior y superior. Con este par de contribuciones intentamos mostrar que la enseñanza de la química no es un conjunto de nombres y fechas y, como afirma Nieto-Galán (2010 citado en Chamizo 2015) “*es útil defender el valor de la historia de la química para comprenderla. Cuando una comunidad y particularmente, una comunidad educativa renuncia a reconocer la historia, su propio pasado, abdicando de conocer aquellos eventos que deberían ser parte de la memoria colectiva de la comunidad, la imagen del pasado y por qué no, el presente y el futuro es construido por otros*”.

Como principal perspectiva, creemos que el uso de la historia de la ciencia ayudará a los estudiantes a comprender el concepto de elemento químico, por lo que se ha diseñado una secuencia didáctica para introducir el concepto de elemento químico a nivel secundaria titulada “*La diversidad y unidad de estructura de los materiales*”. Esta secuencia didáctica ha sido diseñada teniendo en cuenta las contribuciones de la historia del concepto de elemento químico, los obstáculos epistemológicos que tuvo que superar, así como los resultados de la investigación en didáctica de las ciencias. Si el lector está interesado, puede consultar sus resultados en López-Valentín (2020b).

Referencias bibliográficas

- Bachelard, G. (1983). *La formation de l'esprit scientifique*. París: Vrin. Texto traducido al castellano como La formación del espíritu científico. México: Siglo XXI.
- Brock, W. (1998). *Historia de la Química*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- Cambridge, MA: M.I.T. Press.
- 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. (2015). How chemistry teachers, using history of chemistry, could teach chemistry. In 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. (2019). Las sustancias químicas, antes y después de la construcción de la Tabla Periódica.
- 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.
- Cruz, D., Chamizo, J. A. y Garritz, A. (1988). *Estructura atómica. Un enfoque químico*. México: Addison Wesley. *Educación Química*, 30(4), 98-107.
- Del Re, G. (2000). The structure of Chemistry in relation to the Philosophy of Science. *HYLE. International Journal for Philosophy of Chemistry*, 6(1), 5-15.

- 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. y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 477-488.
- Furió Más, C., Domínguez-Sales, M.C. y Guisasola, J. (2012). Diseño e implementación de una secuencia de enseñanza para introducir los concepto de sustancia y compuesto químico. *Enseñanza de las Ciencias*, 30(1), 113-127.
- Furió Más, C. y Domínguez-Sales, M.C. (2007). Problemas históricos y dificultades de los estudiantes en la conceptualización de sustancia y compuesto químico. *Enseñanza de las Ciencias*, 25(2), 241-258.
- Ghibaudi, E., Regis, A. and Roletto, E. (2013). What do chemists mean when they talk about elements?
- Hötteche, D. & Celestino, C. (2011). Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: an analysis of obstacles. *Science & Education*, 20, 293-316.
- IUPAC (1997). Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the ‘Gold Book’). McNaught, A., Wilkinson, A., compilers. Oxford, U.K.: Blackwell Scientific Publications.
- J. Lavonen, K. Juuti, J. Lampiselkä, A. Uitto & K. Hahl (Eds.), *Science education research. Engaging learners for a sustainable future* (pp. 806-813). Helsinki: ESERA.
- Jensen, W. (1998). One chemical revolution or three? *Journal of Chemical Education*, 75, 961-969. *Journal of Chemical Education*, 90, 1626-1631.
- Justi, R. & Gilbert, J. (2000). History and philosophy of science through models: some challenges in the case of ‘the atom’. *International Journal of Science Education*, 22(9), 993-1009.
- Kim, M. (2003). *Affinity, that elusive dream: A genealogy of the chemical revolution*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Klein, U. and Lefèvre, W. (2007). *Materials in eighteenth-century science: a historical ontology*.
- Kuhn, T. (2004). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.
- López-Valentín, D. (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-Valentín, D. (2013). Presencia de la visión ahistórica y aproblemática de la ciencia en la enseñanza del concepto de elemento químico. En Celestino C. y Brzenzinski, M. (Org.). *Aprendiendo ciencia e sobre sua natureza: abordagens históricas e filosóficas*. pp. 451-460. São Carlos: Tipographia Editora Expressa.
- López-Valentín, D. (2018). An empirical view of the teaching of the chemical element concept. In M. E. Prestes and C. Celestino Silva (Eds.), *Teaching Science with Context. Historical, Philosophical, and Sociological Approaches* (pp. 265-275). Switzerland: Springer.
- López-Valentín, D. (2020b). Diseño e implementación de una secuencia didáctica para la enseñanza del concepto de elemento químico en educación secundaria. *Praxis & Saber*, 11(27), 1-20.
- López-Valentín, D. (En prensa). Visión acumulativa lineal en la introducción del concepto de elemento químico en libros de texto. En Z. Monroy, R. León-Sánchez y G. Álvarez Díaz de León (Eds.), *Indagaciones cognoscitivas acerca de la enseñanza de la filosofía y de la ciencia*. México: UNAM.

- López-Valentín, D. y Furió Más, C. (2005). La superposición de modelos históricos en la enseñanza de la química: presentación del concepto de elemento químico. *Enseñanza de las Ciencias*. Número extraordinario.
- López-Valentín, D. y Furió Más, C. (2017). Visiones deformadas de la ciencia en la enseñanza del concepto de elemento químico. *Enseñanza de las Ciencias*. Número extraordinario. pp. 3895-3900.
- López-Valentín, D. y Furió Más, C. (2020a). Desarrollo histórico y epistemológico de los conceptos elemento químico, sustancia y sustancia simple (Primera parte). *Educación Química*, 31(4), 131-143.
- Matthews, M. (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), 255-277.
- McComas, W., Clough, M. y 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.
- Mierzecki, R. (1991). *The historical development of chemical concepts*. Poland: Kluwer Academic Publishers.
- Moreno, A. (2006). Atomismo “versus” energetismo: controversia científica a finales del siglo XIX. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(3), 411-428.
- Padilla, K. y Furió Más, C. (2008). The importance of history and philosophy of science in connecting distorted views of ‘amount of substance’ and ‘mol’ concepts in Chemistry teaching. *Science and Education*, 17, 403-424.
- Paneth, F. (1916). Über der element- und atombegrif in Chemie und Radiology. *Zeitschrift für Physikalische Chemie (International Journal of Research in Physical Chemistry and Chemical Physics)*, 91, 171-198.
- Paneth, F. (2003). The epistemological status of the chemical concept of element. *Foundations of Chemistry*, 5, 113-145.
- Rocke, A. (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.
- Scerri, E. (2008). The past and future of the Periodic Table. *American Scientist*, 96, 52-56.
- Schmidt, H., Baumgartner, T. and Eybe, H. (2003). Changing ideas about the periodic table of elements and students’ alternative concepts of isotopes and allotropes. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(3), 257-277.
- Schwarz, W. & Rich, R. (2010). Theoretical basis and correct explanation of the periodic system review and update. *Journal of Chemical Education*, 87(4), 435-443.
- Soddy, F. (1913). Intra-atomic charge. *Nature*, 92, 399-400.