

# Sustancia y reacción química como conceptos centrales en química. Una discusión conceptual, histórica y didáctica

Andrés Raviolo<sup>1</sup>, Andoni Garritz<sup>2</sup>, Plinio Sosa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Río Negro y Universidad Nacional del Comabue, Bariloche, Río Negro, 8400, Argentina. E-mail: [araviolo@bariloche.com.ar](mailto:araviolo@bariloche.com.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000; 04510 México, Distrito Federal, México. E-mails: [andoni@unam.mx](mailto:andoni@unam.mx) y [plinio@unam.mx](mailto:plinio@unam.mx)

[Recibido en febrero de 2011, aceptado en abril de 2011]

En este artículo se lleva a cabo una discusión conceptual, histórica y didáctica de dos conceptos centrales de la química: sustancia y reacción química, en sus aspectos macroscópico y nanoscópico. Se analiza cómo estos dos conceptos participan en la definición de Química. También se discuten los resultados obtenidos en una revisión de las definiciones presentadas por profesores y por libros de texto. Los autores se abocaron a la búsqueda de aportes históricos y conceptuales que resultaran de utilidad para profesores de nivel medio, y que los indujeran a reflexionar sobre ambos conceptos y a llevar adelante modelos adecuados de razonamiento y acción pedagógica.

**Palabras clave:** sustancia, reacción química, química, aportes conceptuales, narrativas históricas, implicaciones didácticas

## Substance and chemical reaction as core concepts in chemistry. A conceptual, historical and pedagogical discussion

The aim of this article is to present a conceptual, historical and pedagogical discussion on two central concepts of chemistry: substance and chemical reaction, from macroscopic to nanoscopic points of view. The way in which both concepts participate in the definition of chemistry is also considered. The obtained results of interviews with teachers and the analysis of textbook on definitions of both concepts are included. The authors made a critical review of the historical and conceptual aspects, looking for approaches that secondary teachers could use on both concepts, make them reflect and carry on adequate models on pedagogical reasoning and action.

**Key words:** substance; chemical reaction; chemistry; conceptual approaches; historical narratives; pedagogical implications.

## Introducción

Esta investigación se pregunta: ¿qué sugerencias didácticas basadas en la historia de la química y en el análisis profundo de los conceptos sustancia y reacción química, pueden resultar útiles a profesores activos de estudiantes de química de nivel medio (edades 14-18 años) para que enmarquen ambos conceptos en la naturaleza de la química? El objetivo de este artículo es responder a tal pregunta, para que dichos profesores lleven adelante modelos adecuados de razonamiento y acción pedagógica (Shulman, 1987).

Cuando se hace referencia al análisis histórico se citan las fuentes correspondientes, pero cuando se analizan libros de texto, nos remitimos al estudio llevado a cabo con 20 textos de los más utilizados por profesores argentinos de química de nivel medio (Raviolo, 2008, ver la relación de textos en el anexo 1). Es claro que, sólo en ciertos periodos clave, los libros de texto han influido sobre la química de frontera, como fue en Francia en la primera mitad del siglo XIX o en la Rusia de Mendeleiev (Bertomeu-Sánchez, García-Belmar & Bensaude-Vincent, 2002). Finalmente, cuando se habla del análisis de las respuestas de profesores, se hace referencia a un estudio llevado adelante con 55 profesores argentinos que asistieron a 5 cursos de perfeccionamiento sobre la enseñanza de la reacción química, cuatro de los cuales se desarrollaron en congresos nacionales de enseñanza de las ciencias (Raviolo, 2011, en prensa).

## Definición de química: ¿sustancias *versus* reacciones?

*“Chemistry is the study of ‘substances and their transformations into other substances’”*  
(O. Theodor Benfey, 1963, p. 574).

Definir lo que estudia la química representa varios problemas para la enseñanza. Uno de ellos es que las definiciones frecuentemente involucran otros conceptos que habría que conocer antes (como materia, sustancia, sistema, transformaciones, reacciones, estructura, propiedades, etc.). El otro es a qué aspecto se le presta más atención en química: a las cosas (las sustancias: propiedades, estructura) o a los procesos (las reacciones). Es decir, ¿la química es un estudio de cosas estáticas (las sustancias y su estructura, la composición de las mezclas, etc.) o el tiempo sí juega un papel predominante en la esencia de la química, a través de sus procesos? En este sentido Garritz (2007) se pregunta si debemos primero definir sustancias para poder definir entonces qué es una reacción química o es primero la definición de reacción para decir después que algo que tipifica a las sustancias son sus reacciones químicas características.

Reyes y Garritz (2006) incluyen el punto de vista de un profesor con un inventario (definido como lo indican Garritz y Raviolo, 2005; Raviolo y Garritz, 2007) de la discusión con sus estudiantes sobre la definición de química y sobre la pertinencia de tocar el tema de cambios físicos y químicos. Allí citan a Schummer (2004) como una fuente de análisis sobre las definiciones circulares entre sustancia y reacción química:

*“¿Es primariamente la química sobre cosas o sobre procesos, acerca de sustancias químicas o acerca de reacciones químicas? ¿Se define una reacción química por el cambio de ciertas sustancias, o se define a las sustancias por sus reacciones químicas? ... He argumentado desde 1996 por un enfoque integrante que combina conceptualmente sustancias y procesos en una red de relaciones dinámicas, tal que sustancias y reactividades se definen mutuamente unas a las otras, tanto a nivel experimental como teórico”. (p. 3)*

En este artículo se toma partido por la posición que defiende que los procesos químicos son el centro de la química, sin dejar de decir que el aparato conceptual para describir procesos es sorprendentemente pobre comparado con aquel para describir estructuras. Hay tres trabajos que defienden esta misma posición (van Brakel, 1997; Weininger, 2000; Stein, 2004), por eso hemos colocado la definición de química dada por Benfey al inicio de esta sección, a pesar de que también cita el concepto “sustancia”.

Lo anterior lleva a pensar una estrategia que, de manera integrada y dinámica, se vaya haciendo más compleja y retroalmente ambos conceptos, en distintos momentos de la enseñanza, incluso en estudios universitarios avanzados. En contraste, se halló que el 25% de los textos de nivel medio consultados no definen el objeto de estudio de la química y un 35% propone afirmaciones generales del tipo: “Estudio de la materia, la energía y sus transformaciones”; “Se preocupa de estudiar las transformaciones naturales y artificiales que experimenta la materia” que podrían caberle también a la Física. Estas definiciones generalmente no son reconsideradas o ampliadas a medida que se avanza en los textos.

Son poco frecuentes (35% de los textos) las afirmaciones que hacen referencia en la definición de química a estos dos conceptos centrales: *sustancia* y *reacción química*: “La Química estudia las sustancias, su estructura, sus propiedades y reacciones y las leyes que rigen estas reacciones”. Seguramente esto se deba a que se presenta el objeto de estudio de la química al comienzo del texto, antes de definir sustancia y reacción química, por ello es importante volver periódicamente a definir el objeto de estudio de esta ciencia durante un curso.

Por su parte, sólo un profesor (2%) de los encuestados incluyó en la definición de química a sustancia y cambios—reacciones de las sustancias; “Ciencia que estudia reacciones y sustancias”. El 89% de los profesores define a la química como una ciencia (práctica, experimental, natural, rama de la ciencia), que estudia o se ocupa del estudio (89%) de: la materia (62%), las sustancias (20%), los elementos (9%), los fenómenos o procesos químicos (9%), los materiales (7%), los compuestos químicos (4%) y las moléculas (4%). Estos entes sufren transformaciones (49%), cambios o modificaciones (22%), cambios energéticos (15%), reacciones (13%). También admiten que la química estudia las sustancias, sus propiedades o características (31%), composición (13%), interacciones (11%) y estructuras (11%).

De lo anterior se desprende que la respuesta más general dada por textos y profesores es: “La química es una ciencia que estudia la materia y sus transformaciones”. Mientras, nosotros sugerimos la definición de Benfey que pone énfasis en las reacciones o la siguiente, que lo hace sobre las sustancias: La Química “estudia la composición, estructura y propiedades de las sustancias y las reacciones por las cuales una sustancia se convierte en otra” (Spencer, Bodner y Rickard, 2006, p. 2). En definitiva, se considera esencial que la definición de química incluya los términos sustancia y reacción química.



## Discusión conceptual

En el estudio de la química es necesario destacar, al menos, tres niveles de representación (Johnstone, 1982; 1991): (1) macroscópico (molar o sensorial), (2) simbólico (ecuaciones, fórmulas) y (3) submicroscópico (partículas). Con el perdón de Johnstone, se hará referencia a este último como nivel nanoscópico, en lugar de submicroscópico, por tratarse de entidades (átomos, moléculas, iones) cuyos tamaños suelen expresarse en nanómetros ( $1 \times 10^{-9}$  m). En este artículo se desarrollan, por las características del mismo, los dos primeros niveles para los conceptos de sustancia y reacción química.

Tres definiciones comunes de sustancia son:

*“Sustancia es una forma de materia que tiene una composición definida (constante) y propiedades distintivas”* (Chang, 2007).

*“La definición molar estándar de una sustancia como un material que tiene un conjunto fijo y reproducible de propiedades específicas a una dada temperatura y presión”* (Jensen, 1998; 818).

*“Sustancia química es materia de composición constante, mejor caracterizada por las entidades de las que está compuesta (moléculas, unidades fórmula, átomos). Caracterizada por propiedades físicas como densidad, índice de refracción, conductividad eléctrica, punto de fusión, etc.”* (McNaught y Wilkinson, 1997).

Van Brakel habla de la controversia entre la química como estudio de cosas o de procesos (menciona ‘sustancia pura’ por la fecha de su contribución en la que la IUPAC apenas canceló el uso de ese término). La primera definición hace énfasis en aspectos de fisicoquímica y la segunda de química:

*“Una sustancia pura es una sustancia para la que las macropropiedades (de una de sus fases), tales como la temperatura, densidad y conductividad eléctrica, no cambian durante un cambio de fase (como la ebullición de un líquido o la fusión de un sólido). O, de manera alterna, las sustancias químicas puras son los productos relativamente estables de los nodos del análisis y la síntesis químicos en una red de reacciones químicas”* (van Brakel, 1997, p. 253).

Las sustancias poseen propiedades específicas (características, distintivas) que las diferencian de otras sustancias. Este atributo de sustancia es mencionado por el 85% de las definiciones que aparecen en los libros de texto de nivel medio. Aunque no todos los textos hacen hincapié en que dichas propiedades deben ser medidas en condiciones determinadas. Por su parte, el 44% de los profesores hizo referencia a que una sustancia tiene o está caracterizada por propiedades intensivas.

El hecho de que la composición de una sustancia sea fija (constante, definida, conocida) es lo que la diferencia del otro sistema homogéneo, las disoluciones, que son mezclas de composición variable (más adelante se ampliará este concepto de composición). La materia homogénea puede ser una sustancia o una disolución. Sin embargo, este atributo lo menciona sólo el 20% de los libros de texto: “Las sustancias poseen una composición química constante que puede ser representada por medio de una fórmula química” (texto de la secundaria). En concordancia, sólo un profesor se refirió a composición definida: “...tiene una composición química definida (se interpreta a través de una fórmula)”. Otro docente encuestado definió sustancia como: “Materia con propiedades intensivas idénticas” que puede ser la definición de una disolución al no hacer referencia a la composición fija. La definición más general dada por profesores fue: “Es materia -clase de materia, material- con propiedades propias”.

La definición de IUPAC (McNaught y Wilkinson, 1997) no relaciona a las sustancias con las reacciones químicas o con la reactividad, y se refiere sólo a las propiedades físicas que caracterizan a las sustancias; a pesar de que las sustancias tienen propiedades químicas que también las identifican. ¿Será para evitar el debate sobre la interdependencia entre reacción química y sustancia?

La mayoría de los materiales u objetos que manejamos en la vida cotidiana son mezclas. Sin embargo, el problema es que comúnmente la palabra sustancia está asociada a la noción de material (madera, vidrio, aire, etc.), como una clase de materia caracterizada por algún rasgo relacionado con su utilidad o con alguna manifestación relevante para las personas. Ese uso cotidiano es el que mete ruido con la concepción científica que debemos transmitir a los estudiantes. En el uso diario todo material homogéneo es considerado como una sustancia (por ejemplo el vinagre). Desafortunadamente, otras veces las sustancias, como es el caso de los compuestos, son consideradas mezclas (por ej. el agua como una mezcla de hidrógeno y oxígeno). También el término sustancia suele tener una connotación misteriosa o prohibida. Los textos en inglés suelen agregarle el calificativo de “química”: sustancia química, para otorgarle mayor precisión. La IUPAC también se refiere a “chemical substance”.

En ocasiones la materia se constituye como una especie de “agente portador” de la propiedad (Llorens, 1991), siguiendo a los primitivos fenomenológicos de DiSessa (1983). Así por ejemplo, para saber si se conserva la

sustancia en una transformación algunos alumnos suelen fijarse si se mantiene una única propiedad (específica y perceptible) como el color o el sabor (Furió y Furió, 2000). Es como si se requiriera de “un agente activo” para que el cambio se llevara a cabo (García Franco y Taber, 2009; Taber y García Franco, 2009). Al clasificarse las sustancias en sólidas, líquidas y gaseosas (a presión y temperatura del ambiente), suelen asociarse a las sustancias el atributo del estado, como si hubiera tres “tipos” diferentes de sustancias, dado que rara vez se menciona que una sustancia puede estar en cualquiera de los tres estados dependiendo de la temperatura y/o presión, y esto trae dificultades en la comprensión de cambios físicos y químicos (Johnson, 1996).

En forma análoga, en biología se suele llamar a las sustancias como las “especies químicas”. El inconveniente de este término es que la palabra “especie” se utiliza también para partículas, por ejemplo en la frase “cuando una especie química (un átomo o conjunto de átomos) adquiere una carga eléctrica neta...” (texto de la secundaria). Nelson (2008) generaliza el término ‘sustancia’ llamándole así a los *materiales homogéneos básicos*, dividiendo luego éstos en ‘sustancias simples’ y ‘disoluciones’. Lo ofrece como una sugerencia para la discusión.

Es recomendable no usar el término de “sustancia pura”, porque da lugar a la contradictoria expresión alterna de “sustancia impura”. A nivel macroscópico una sustancia se considera pura cuando se funde o hierve a temperatura constante (siempre que no se trate de una sustancia amorfa). Seguramente el término de “sustancia pura” surge del hecho de manipular “sustancias” con cierto grado de pureza: “una muestra de carbonato de calcio con 80% de pureza”; ello implica que a las mezclas se las considere como sustancias. Desde un punto de vista extremo, todos los materiales son mezclas de sustancias y la pureza indica la proporción en que se encuentra cada sustancia en el material; cuando una de las sustancias está en una proporción muy grande, y a fines prácticos, se dice que está pura (Sosa, 1999). La IUPAC ya ha recomendado desde 1997 no utilizar el término “pure substance”. Un dato interesante, que aporta a lo relativo del uso del concepto pureza, es que el cobre “puro” (con 99,98% de pureza) se emplea para purificar muestras de cobre “impuro” (99%) por métodos electroquímicos (Umland y Bellama, 2000).

El adjetivo “puro” en la vida cotidiana está relacionado con la idea de calidad, de saludable, de natural o de no contaminada. Algunos estudiantes argumentan que el jugo de naranja es una sustancia pura si proviene directamente de la naranja y el agua destilada no es pura porque ha sufrido un “proceso” (Johnson, 1996). Para este autor “una sustancia es una sustancia y no puede ser pura o impura” dado que no debería hablarse de la pureza de las sustancias sino de las mezclas.

Las definiciones “Sustancias puras son sistemas homogéneos no fraccionables” o “Son sistemas homogéneos formados por un solo componente” (textos de secundaria) ponen énfasis en que las mezclas se pueden separar en sustancias por métodos físicos de fraccionamiento. Con ellas la definición de sustancia queda subordinada a otros conceptos complejos como “sistema”, “componente” o “fraccionable”, que además tienen muchos otros significados cotidianos.

A continuación se ofrece una definición de sustancia a nivel macroscópico. Resulta oportuno, al definir sustancia, asociarla y diferenciarla del concepto de mezcla, colocando las dos definiciones una a continuación de la otra.

*“Una sustancia es una forma de materia homogénea de composición elemental fija que posee propiedades específicas que la diferencian de otras”.*

*“Una mezcla es materia formada por dos o más sustancias que pueden encontrarse en proporciones variables”.*

En estas definiciones se hace hincapié en la composición, pero conviene resaltar que se está hablando de dos composiciones químicas diferentes. Para las sustancias se refiere a la composición “elemental”, es decir, la proporción de elementos, y para las mezclas se refiere a la composición “sustancial”, es decir, proporción de sustancias en la mezcla. Si se habla de la composición porcentual en masa resultante del proceso de separación y descomposición, la composición de una sustancia es fija y de una mezcla es variable. También el término materia puede emplearse para partículas, por ejemplo los protones y los quarks son materia, pero están muy lejos de las sustancias, tal como las concebimos en condiciones de temperatura y presión cercanas a las que imperan en la superficie del planeta Tierra.

Un aspecto interesante, que pone de manifiesto el carácter de construcción humana de las definiciones, es que se define compuesto como un tipo de sustancia, por lo tanto tiene una “composición fija”; sin embargo, existen compuestos de composición variable (o no estequiométricos o berthóolidos [2]) como el óxido ferroso (wüstita, hecho a 1000°C y presión atmosférica) que contiene entre 23,1 a 24,6% en masa de oxígeno, cuya fórmula mínima sería  $\text{Fe}_{0,88-0,95}\text{O}$ . La diferencia con una disolución radicaría que en ella la composición de uno de sus componentes puede estar en cualquier proporción. Por contraposición, los compuestos estequiométricos se llaman daltónidos [3] (Nelson, 2003).

## Definición nanoscópica de sustancia

### Introducción histórica

Aunque hubo varios intentos para producir teorías atómicas (ver por ejemplo, Grossman, 2010), los químicos reconocen a John Dalton como el padre de la teoría atómica. Sin embargo, transcurrió todo el siglo XIX con científicos a favor y en contra de esta teoría, hasta la reunión Solvay de 1911 en donde aparentemente todos aceptaron el trabajo de Perrin y de Einstein sobre el movimiento browniano, que estableció la existencia innegable de partículas (moléculas compuestas de átomos de los elementos). Hendry (2006) aborda el tema de la naturaleza nanoestructural de las sustancias, desde un punto de vista filosófico y destaca el problema que significó el descubrimiento de los isótopos: ¿es una muestra de cada uno de ellos una sustancia diferente? La IUPAC resolvió que no, que se trataba de la misma sustancia, y reservó una sola casilla en la tabla periódica para cada elemento. No obstante hay ejemplos como el que se relata a continuación (tomado de Weisberg y Needham, 2010) que hace pensar sobre el tema: Una caja que contiene dos isótopos separados por una pared divisoria se encuentra equilibrada en el filo de una mesa. El isótopo más pesado está en el compartimento justo sobre la mesa, y el ligero en el que está lejos de la misma. Cuando se elimina la separación, el isótopo pesado queda distribuido uniformemente en la caja, con lo cual se perturba el equilibrio mecánico y la caja cae de la mesa. Éste es un ejemplo en el que la no identidad de las sustancias se manifiesta en un cambio mecánico en el mundo, lo cual va contra la decisión de la IUPAC. Por no ir más lejos, los dos isótopos del helio, cuando está en la fase líquida, flota uno  $^3\text{He}$  sobre el otro  $^4\text{He}$  por sus diferentes densidades: ¿se trata de la misma sustancia?

Desde 1858, Couper y Kekulé ya hablaban de las estructuras y de las fórmulas de las sustancias, de sus afinidades de tipo (un elemento u otro) y de grado (el número de átomos en la fórmula), de la tetravalencia del carbono y de la capacidad de este elemento de enlazarse en cadenas.

Archibald Scott Couper (1858) nos dice al inicio de su único artículo:

*“El fin de la química es su teoría. La guía en la investigación química es una teoría. Resulta por tanto de la mayor importancia determinar si las teorías actuales adoptadas por los químicos son adecuadas para la explicación de los fenómenos químicos, o que, al menos, están basadas en principios válidos que permitan regular la investigación científica”.*

Se dice que por un malentendido con el jefe de su laboratorio, Charles Adolphe Wurtz, Couper publicó su artículo un mes más tarde, con lo cual Kekulé tomó la prioridad de la propuesta de la estructura molecular. Cuando se lo reprochó a Wurtz, éste lo eliminó de su laboratorio. A partir de ese altercado, aunque al poco tiempo recibió un cargo de profesor asistente en Edinburgo, su salud empezó a empeorar y no publicó otro trabajo nunca.

Sin embargo, fue Alexander Mikhailovich Butlerov, en 1861, quien menciona que cada sustancia ha de tener una sola fórmula, cuando dice (Kluge y Larder, 1971, p. 291; la mayúscula es de estos autores):

*“Si tratásemos ahora de definir la estructura química de los compuestos tan lejos como sea posible, y fuésemos exitosos en expresarla en fórmulas, entonces éstas constituirían fórmulas verdaderamente racionales [y]... habría posiblemente sólo UNA de tales fórmulas racionales para cada sustancia. Si para entonces hubieran sido derivadas las leyes generales que gobernarán la dependencia de las características químicas de las sustancias con su estructura, tal fórmula expresaría todas esas características”.*

El par de traductores de Butlerov (Larder y Kluge, 1971, p. 287) mencionan que aquella presentación de Butlerov en el congreso de Speyer, Alemania, del 19 de septiembre de 1861 no fue completamente apreciada por sus coetáneos porque *caía fuera de la corriente principal del pensamiento contemporáneo, ligando la teoría de la valencia con la teoría estructural moderna a través del establecimiento de fórmulas de enlace.*

Al año siguiente, Butlerov publicó su artículo en ruso en la revista de la academia soviética de ciencias: *Izdatel'stvo Akademii nauk S.S.S.R.*, utilizando el término “*khimicheskoe stroenié*”. En alemán había empleado “*chemische Structur*” (con “C” en *Structur*, en lugar de la “k” actual) que significa “estructura química” y ese término fue probablemente utilizado por primera vez en esa ocasión (Hargittai, en línea). Este último autor recuerda que este concepto cumple este año 2011, por lo tanto, los ciento cincuenta años de vida.

Theodor Benfey (1958) traduce el discurso de Kekulé de 1890, en el que se celebraba el jubileo de la teoría del benceno. Kekulé hablaba de sus ensoñaciones nanoscópicas de las fórmulas de las sustancias:

*“Mi concepción en cuanto a la valencia química y la forma de enlace de los átomos —lo que ahora llamamos teoría estructural— surgió durante mi estadía temprana en Londres” [Como asistente de J. Stenhouse en el Hospital de St Bartholomew's entre 1854 y 1855].*

“...[Allí] residí por un tiempo considerable en Claphan Road en el barrio de Claphan Common. Frecuentemente, sin embargo, pasé mis tardes con mi amigo Hugo Müller en Islington en el extremo opuesto de la metrópoli. Hablábamos de muchas cosas, pero más a menudo de nuestra amada química. Una agradable noche de verano iba yo regresando en el último autobús, ‘afuera’ [4], como de costumbre, a través de las desiertas calles de la ciudad, que en otros momentos está tan llena de vida. Caí en una ensoñación [Traümerei] y, hete aquí, ¡que los átomos estaban retozando frente a mis ojos! Siendo que, hasta entonces, cuando esos diminutos seres se me habían aparecido siempre había sido en movimiento; pero hasta ese momento nunca había sido capaz de discernir la naturaleza de su movimiento. No obstante, ahora yo vi cómo, frecuentemente, dos átomos de los más pequeños se unían para formar un par; cómo un átomo más grande abrazaba a los dos pequeños; cómo átomos aún más grandes todavía sujetaban tres y hasta cuatro de los más pequeños; mientras el conjunto seguía girando en una danza vertiginosa. Vi cómo los más grandes formaban una cadena, arrastrando a los más pequeños tras ellos, pero en los finales de la cadena. Vi lo que nuestro difunto maestro Kopp, mi altamente honrado profesor y amigo, ha descrito con tal encanto en su ‘Molekular-welt’ [Mundo molecular], pero lo vi mucho antes que él. El grito del chofer: ‘Claphan Road’, me despertó de mi sueño; pero pasé una parte de la noche poniendo al menos en el papel esbozos de estas formas soñadas. Éste fue el origen de la teoría estructural”.

## Discusión conceptual

Hoy se reconocen más de cincuenta y siete millones de sustancias (ver en la URL de Chemical Abstract Services, <http://www.cas.org/>, el contador, que cambia casi cada segundo y al momento de cerrar este artículo (abril de 2011) marcaba pocas más de 58.570.000 sustancias, cuando la mire el lector, ya habrá muchas más).

Sólo dos libros de texto de secundaria (10%) presentan una definición nanoscópica de sustancia en general, aunque este tipo de definiciones es común para sustancia elemental y compuesta. Ambos textos hacen referencia a las sustancias como moleculares (sin tener en cuenta a las sustancias iónicas, metálicas y covalentes): “Una sustancia es pura cuando todas sus moléculas tienen la misma composición”, “Una sustancia pura es una sustancia formada por un solo tipo de moléculas” (en esta última, el uso del término “sustancia pura” daría lugar a pensar en sustancias formadas por más de un tipo de moléculas).

Teniendo en cuenta la tendencia de los alumnos a transferir propiedades macroscópicas de las sustancias a las partículas, las definiciones anteriores fomentan la transferencia del concepto macro de pureza al nivel nano. Por su parte, el 22% de los profesores encuestados se refirió a aspectos nanoscópicos de las sustancias: conjunto o arreglo de átomos, moléculas, iones (4%), formada por un solo tipo de moléculas (5%), formada por elementos – tipos de átomos- (5%), formada por partículas de igual especie (4%), formada por átomos y moléculas (4%).

La definición de sustancia de la IUPAC (McNaught y Wilkinson, 1997) expresada en la sección ‘Discusión conceptual’ como “materia de composición constante, caracterizada por las entidades que está compuesta (moléculas, unidades fórmula, átomos)” relaciona a las sustancias con las partículas que las constituyen y caracterizan. Para presentar algunos tipos distintos de sustancias (moleculares, covalentes, iónicas y metálicas), que se observan en condiciones ambientales frecuentes, los autores pensamos que resulta conveniente introducir el concepto de partícula representativa de la sustancia y ejemplificarlo:

- En algunos casos el átomo mismo es la partícula representativa de la sustancia que forman, por ejemplo, los gases nobles como el Ar(g) o los sólidos covalentes como el C(s) diamante.
- En otros casos los átomos se encuentran unidos entre sí formando entidades estables que llamamos moléculas, siendo la molécula la partícula representativa de la sustancia que forman, las sustancias moleculares, como por ejemplo: oxígeno O<sub>2</sub>(g), yodo I<sub>2</sub>(s), agua H<sub>2</sub>O(l), glucosa C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>(s).
- En otros casos, las partículas representativas de las sustancias son iones, por ejemplo, los sólidos iónicos como: NaCl(s), KNO<sub>3</sub>(s) y los metales, como: Fe(s), Al(s) que están formados por un mar de electrones que rodea a los iones metálicos. En estos casos se aprecia que las partículas representativas (iones) no coinciden con la representación simbólica de la sustancia o fórmula química.

Weininger (1984) y Wooley (1985) entran en un debate sumamente interesante sobre la existencia verdadera de estructuras moleculares para cada una de las sustancias y si la química es reducible a la física, es decir, si los fenómenos químicos tales como los asociados con la estructura molecular pueden ser completamente deducidos -en principio, al menos- por las teorías de la física de las moléculas. La aproximación de Born-Oppenheimer para calcular mediante métodos de la mecánica cuántica las moléculas es una aproximación que confunde sobre la verdadera existencia de coordenadas atómicas para cada átomo en una molécula [5]. En otro artículo, García Sucre y Bunge (1981) ya habían concluido que un sistema cuántico sí tiene una geometría, y que los modelos de ‘varillas y bolas’ son reivindicados por la química cuántica. Aunque este artículo fue posteriormente criticado por Wooley como una concepción equivocada (*misconception*).

Furió y Furió (2000) afirman que los alumnos desconocen la idea nanoscópica de sustancia como un conjunto de muchísimas partículas todas iguales. Por ello, se ofrecen por parte de los autores las siguientes definiciones nanoscópicas de sustancia y de mezcla:

*“Una sustancia es un tipo de materia homogénea formada por partículas (átomos, moléculas, iones) iguales, en una proporción única”.*

*“Una mezcla es materia formada por partículas diferentes, es decir, por partículas de distintas sustancias”.*

En algunos casos la proporción única de partículas de la definición de sustancia se corresponde a una sola, es decir todas las partículas son iguales, por ejemplo el mismo átomo (en gases nobles y sólidos covalentes), la misma molécula (sustancias moleculares), el mismo catión (metales), los mismos catión y anión (redes iónicas). En este último caso esta proporción única de partículas puede ser: 1 a 1 (NaCl), 1 a 2 (CaCl<sub>2</sub>), 1 a 3 (FeCl<sub>3</sub>), etcétera.

Para definir átomo, molécula e ion podemos tomar la propuesta de Sosa (2007) por su sencillez y precisión: un *átomo* es una partícula mononuclear neutra, una *molécula* es una partícula polinuclear neutra y un *ion* es una partícula mono o polinuclear cargada.

El hecho de que estas partículas sean representativas de la sustancia que forman no quiere decir que la partícula posea las propiedades de dicha sustancia. Muchas propiedades van a depender del arreglo o distribución espacial que tengan esas partículas y del tipo de fuerzas que las unan. Para las sustancias reticulares (sólidos cristalinos: sus partículas presentan un ordenamiento estricto de largo alcance), se considera que la porción mínima representativa de la estructura de estas sustancias es la *celda unitaria*.

Para las sustancias moleculares y gases nobles es posible individualizar partículas libres (moléculas y átomos). También para las reticulares, en condiciones especiales, pueden individualizarse iones para las iónicas y radicales libres para las metálicas y covalentes (Sosa, 1999). Incluso, se ha comprobado la existencia de moléculas de un metal en fase vapor, el Li<sub>2</sub> (moléculas diamagnéticas), también de C<sub>2</sub> (Chang, 1999).

Por otro lado, y relacionado con la discusión sobre pureza, desde el modelo discontinuo de la materia es probable que en toda muestra real de una sustancia se encuentre alguna que otra partícula (átomo, molécula o ion) de otra sustancia. En la práctica, una muestra que contiene 99 % en masa de una cierta sustancia y 1 % de otras (se les suele llamar impurezas o contaminantes) se considera una sustancia pura. Se dice que la pureza de dicha sustancia es del 99%. Aunque la definición de sustancia anterior es válida, es considerada como una aproximación ideal, como muchos otros conceptos científicos.

No resulta sencillo distinguir a nivel nanoscópico la diferencia entre sustancia y mezcla. Por ejemplo, cuando se trata el tema de las uniones químicas, se utilizan sustancias como el hierro o el cobre para dar ejemplos de uniones metálicas; pero en aleaciones como el bronce, los átomos de cobre y estaño están unidos también por la unión metálica. Este tipo de materia (aleaciones) es considerado como mezcla; sin embargo, la unión de iones distintos, como el anión cloruro y el catión litio, unidos por la unión iónica constituyen un compuesto, es decir una sustancia. Este argumento se hace más notable en la estructura de una sal mixta.

El caso de las aleaciones es un caso particular en el que la composición elemental y la composición sustancial tienen el mismo valor. El criterio de si la composición elemental es fija o variable es el que nos permite distinguir una mezcla de una sustancia. Si la composición es variable se trata de varias sustancias mezcladas. En cambio, si sólo hay una posible composición se trata de una sustancia. La composición sustancial de las aleaciones es variable, la elemental de los compuestos no.

## Definición macroscópica de reacción química

Las definiciones clásicas de libros de texto son del tipo:

*“Es un proceso en el cual una sustancia (o sustancias) cambia para formar una o más sustancias nuevas”* (Chang, 1999).

Esta definición pone de manifiesto que el concepto reacción química depende del de sustancia. Sorprendentemente un 10% de los libros de química de secundaria consultados no definen en forma directa el cambio o reacción química, objeto de estudio de esta ciencia.

Una concepción alternativa frecuente de cambio químico es considerarlo como una modificación, en la cual la sustancia varía su apariencia o propiedad pero mantiene su identidad (Andersson, 1990). A esta idea pueden contribuir, directa o indirectamente, un 50% de las definiciones extraídas de los textos, al hacer hincapié en la modificación de propiedades, aunque también citan la transformación de sustancias: “Durante las

transformaciones, reacciones o fenómenos químicos, sí se producen modificaciones en las sustancias presentes en el sistema”, “Las sustancias se transforman en otra u otras sustancias cuyas propiedades son diferentes de las sustancias que se pusieron en contacto”, “Los cambios químicos o reacciones provocan una modificación en la composición química de las sustancias, dando lugar a la formación de otras sustancias”. Esta tendencia surgió también en el 21% de los profesores encuestados: “Se forman sustancias con propiedades intensivas diferentes”, “Y cambian las propiedades de las sustancias”. Por ello, resulta necesario dialogar con los estudiantes sobre este aspecto con el fin de evitar interpretaciones incorrectas.

Relacionada con la concepción anterior, un 10% de los textos promueve la afirmación errónea de que “toda transformación en la que cambian las propiedades específicas de las sustancias es un cambio químico”, dado que algunas transformaciones físicas, como los cambios de estado o las disoluciones, producen cambios en propiedades específicas (por ej. la variación de la densidad del agua líquida al pasar al estado sólido o la densidad del agua cuando se disuelve una sal en ella). La siguiente definición encontrada en uno de los textos aporta a esta idea: “Cambio químico es toda modificación que produce cambios en las propiedades intensivas o sustanciales”.

Otras definiciones incorrectas de textos asocian a los cambios físicos como reversibles y cambios químicos como irreversibles o permanentes (15%): “Fenómenos químicos son todas aquellas transformaciones que alteran las propiedades de las sustancias de modo definitivo y permanente”. Por su parte, el análisis de las respuestas dadas por profesores muestra una gran variedad de términos donde ubican al concepto de reacción química como: interacción (22%), proceso (16%), transformación (15%), cambio (15%), fenómeno (11%) y combinación (9%).

Muchos estudiantes suelen sostener la idea de que una reacción química tiene que ver con “mezclar sustancias”, por lo cual conciben al cambio químico como el proceso en que dos o más sustancias reaccionan y forman otras sustancias y no admiten la posibilidad de que se pueda partir de una sustancia sola, por ejemplo una descomposición química (Casado y Raviolo, 2005). Esto se presentó en el 35% de las respuestas emitidas por los profesores. Para éstos la finalidad de la transformación química es: formar otras sustancias -dos o más- (25%), formar productos (18%), formar una sustancia nueva (15%) y formar una o más sustancias diferentes (13%).

En muchos textos, se destaca un tipo de reacciones químicas: las de combinación [6]. “Es una reacción en la que dos o más sustancias se combinan para formar un solo producto” (Chang, 2007). Poco se menciona en la enseñanza que la mezcla de sustancias es un paso previo y necesario, pero no suficiente, para que se produzca una reacción química (Furió y Domínguez, 2007).

La definición sugerida por los autores es:

*“Una reacción química es un proceso en el cual una sustancia o varias sustancias se forman a partir de otra u otras”.*

No existe un límite definido entre cambio físico y cambio químico, como tampoco lo hay entre la Física y la Química y, seguramente, entre ellas y otras ciencias. Por ejemplo, y siguiendo a Garritz (2007), la transformación alotrópica del grafito a diamante puede considerarse un cambio químico, dada la transformación enorme del entorno de cada átomo de carbono, ya que a pesar de que ambas especies contienen la misma sustancia (carbono), tienen propiedades físicas diferentes, aunque sus propiedades químicas son similares, como reaccionar con el oxígeno para formar dióxido de carbono. Sin embargo, la vaporización del diamante, que sería un cambio estructural más notable que la transformación alotrópica, se lo considera un cambio físico, en el que se presenta la misma ruptura de los enlaces covalentes.

En los cambios de estado del agua, por ejemplo de sólido a gas, existe un cambio enorme en lo estructural y en las propiedades físicas (como la densidad), y se lo considera una transformación física. En cambio, la desnaturalización de una proteína como la clara de huevo se considera una transformación química; y en ambos casos se ha producido la ruptura de enlaces de hidrógeno, conservando la misma secuencia de átomos unidos por enlaces covalentes. Estos límites resultan también difusos en transformaciones entre isómeros o entre confórmers.

Como todos los conceptos científicos, estas definiciones provienen de un proceso de clasificación y abstracción del mundo real. Son una construcción humana, una forma de aproximación a la realidad que busca simplicidad dentro de la complejidad. Seguramente, y a pesar de las dificultades mencionadas hasta ahora, esta clasificación de las transformaciones en cambios químicos y físicos sigue siendo útil en la enseñanza, aunque los autores piensan que es sumamente problemático su abordaje en el aula (Palmer & Treagust, 1996).

## Definición nanoscópica de reacción química

El precursor más temprano de la ecuación química moderna es el diagrama de afinidad, introducido al final del siglo XVIII y utilizado para hacer énfasis en las fuerzas o afinidades que compiten entre las partículas en una

reacción química dada. Un ejemplo típico tomado del libro de Antoine Fourcroy (1789) es presentado por Jensen (2005).

Son menos frecuentes en los textos las definiciones de reacción química en términos de partículas: “Reacción química es un cambio que implica redistribuciones de electrones y/o átomos para formar productos diferentes de los compuestos de partida” (ACS, 2005). Esta definición recurre a conceptos del nivel nanoscópico, donde los estudiantes tendrían que tener nociones sobre átomos y electrones.

Por su parte, Gillespie *et al.* (1994; p. 18) definen: “Una reacción química es un proceso en el cual los átomos de las moléculas reactivas se reorganizan hasta formar las moléculas de los productos.”

Cuando la IUPAC define *chemical reaction*, lo hace de la siguiente forma (McNaught y Wilkinson, 1997), ciertamente abstracta e inconveniente para la docencia:

*“Reacción química: Un proceso que resulta en la interconversión de especies químicas. Las reacciones químicas pueden ser reacciones elementales o reacciones por pasos (Debe hacerse notar que esta definición incluye la interconversión de conformeros observables experimentalmente). Las reacciones químicas detectables normalmente involucran conjuntos de entidades moleculares, como lo indica su definición, aunque es conveniente conceptualmente utilizar a menudo el término para cambios que involucran entidades moleculares simples (i. e. ‘sucesos químicos microscópicos’).”*

Es muy importante construir con los alumnos la noción de cambio químico a escala nano para garantizar su comprensión conceptual (Bullejos *et al.*, 1995). Sin embargo, el 35% de los textos de secundaria revisados no presentan una definición nanoscópica de la reacción química y un 25% se refiere sólo a cambios en los átomos que forman las moléculas (al igual que Gillespie *et al.*); es decir, consideran a todas las sustancias como moleculares: “En toda reacción química los átomos que constituyen las moléculas se reagrupan, es decir, se unen de manera distinta formando nuevas moléculas”.

Por su parte, sólo 21% de los profesores mencionan aspectos nano de la reacción química: “Reordenamiento de átomos, átomos se separan y se unen”, “Se rompen y forman enlaces”. El 40% de los textos presenta definiciones apropiadas como un reordenamiento de átomos: “Los átomos que constituyen las sustancias originales (llamadas reactivos) proceden a reagruparse para formar las nuevas sustancias (es decir, los productos)”. Sin embargo, estas definiciones no contemplan a las sustancias cuyas partículas representativas son iones. Por ello, la definición sugerida por los autores de reacción química en términos nanoscópicos es la siguiente:

*“En una reacción química hay una redistribución de los átomos o iones, formándose otras estructuras (moléculas, o redes) diferentes”.*

Para comprender un tipo de transformación no sólo hay que reconocer qué cambia, sino también qué se mantiene, qué se conserva. En el cambio químico cambian las sustancias y se conservan los tipos de átomos o elementos. Algunos de los textos mencionan la conservación de la cantidad e identidad de los átomos que participan en él: “Durante una reacción química los átomos no se crean ni se destruyen, ni cambian su identidad”.

La ruptura de un enlace requiere energía, la formación de un enlace libera energía. Entonces, si la energía de reacción es negativa -reacción exotérmica- que cede calor al entorno, la energía liberada en formar enlaces debe ser mayor que la que la requerida para romper enlaces. Al contrario, si la energía de reacción es positiva -reacción endotérmica- que toma calor del entorno, la energía liberada en formar enlaces debe ser menor que la que la requerida para romperlos. Por ello, para calcular el cambio de la entalpía de reacción (a presión constante:  $\Delta H_r^\circ$ , 1 atm, 25°C) a partir de las energías de enlace, la energía liberada por la formación de los enlaces en los productos debería estar restando en la fórmula para que el resultado de la energía de reacción tenga el signo apropiado:

$$\text{Energía de reacción estándar: } \Delta H_r = \sum_n E_{\text{enlace}}^n (\text{reactivos}) - \sum_m E_{\text{enlace}}^m (\text{productos})$$

Siendo  $n$  y  $m$  el número de enlaces en reactivos y productos respectivamente.

Generalmente los estudiantes, partiendo del sentido común, afirman que es al revés, que para formar un enlace se requiere energía. A esta concepción alternativa contribuye la enseñanza cuando se habla de que una combustión requiere de una energía de activación para realizarse, o cuando, por ejemplo, se habla de la energía cedida en la reacción de hidrólisis del ATP. Se dicen frases del tipo: “la energía almacenada en el enlace que une al grupo fosfato con el ADP”.

La identificación de los enlaces que se rompen y se forman, a partir de la representación de las fórmulas desarrolladas de reactivos y productos, y el cálculo de la energía de reacción a partir de las energías de enlace, son actividades apropiadas para llevar a cabo en el nivel medio, dado que ayudan a “visualizar los enlaces” y a comprender mejor el cambio químico a nivel nanoscópico.

## Conclusiones e implicaciones para la enseñanza

Una definición es una explicación del significado de un término con el fin de eliminar la vaguedad y la ambigüedad de las palabras. La habilidad de definir consiste en construir frases en función de explicar términos desconocidos con la ayuda de otros conocidos, expresando las características necesarias y suficientes para que el concepto no se pueda confundir con otro (Jorba, Gómez y Prat, 2000). La primera información que debe aparecer en la definición es la referida a la clase en que se incluye el término definido, generalmente esa clase proviene de una clasificación, de la que se desprenden conceptos menos generales de otros más inclusivos. El problema es que las clasificaciones son construcciones humanas y, por lo tanto, al igual que las definiciones, no son perfectas. Esto se pone en evidencia hasta en las definiciones más básicas de la química. Se aprecia en general una gran dispersión en las clases en las que se incluyen los conceptos químicos, especialmente el de reacción química y el de sustancia.

La introducción de casos históricos en la ciencia escolar puede representar la forma de plantar un puente que nos lleve hacia el entendimiento por parte de los estudiantes de lo que hacen los científicos, qué sabía su generación acerca de los grandes temas del momento, sobre los problemas que decidieron examinar y cómo los resolvieron (Conant, 1947). James Bryant Conant, antes de ser rector en Harvard era un químico común y corriente que creyó que estudiar el trabajo de grandes científicos podía ilustrar la “táctica y estrategia de la ciencia”. Varios casos seminales seleccionados de los primeros días de la ciencia requieren sólo una mínima cantidad de antecedentes factuales o técnicos por parte de los estudiantes y, al mismo tiempo, esos casos pioneros son los mejores ejemplos de la búsqueda intelectual a tientas involucrada en la investigación científica (Giunta, 1998; Garritz, 2010). De aquí la importancia de que el profesor cite en su curso los casos históricos, como los descritos aquí u otros igualmente adecuados, cuando aborde los temas de sustancia y reacción química.

En los libros de texto y en la enseñanza es poco habitual la presentación de los conceptos sustancia, mezcla y reacción química, a nivel nanoscópico. La apropiación conceptual profunda se produce cuando el alumno puede relacionar correctamente los atributos macroscópicos con entidades e imágenes nanoscópicas.

Esta interpretación nano debería realizarse luego de que los alumnos adquieran una buena comprensión de estos conceptos a nivel macro, lo que implicaría poner más énfasis en la enseñanza de actividades donde se aborden los distintos atributos de los conceptos. Por ejemplo, sobre los atributos del concepto de sustancia es conveniente explorar primero: sistema homogéneo, composición definida, propiedades específicas características, no fraccionable por métodos físicos.

Es necesario asumir como conceptos estructurantes de la química a los de sustancia y reacción química. Esto deriva en la necesidad de dedicarle más tiempo de enseñanza, por ejemplo en observaciones de fenómenos cotidianos, en experiencias de separación de mezclas, en identificación de sustancias. Como se trató en este trabajo, ambos conceptos son dependientes entre sí: “Será conveniente estudiar los conceptos de sustancia y reacción química relacionándolos entre sí. Al mismo tiempo, se debe utilizar la teoría atómica para dar una explicación microscópica al comportamiento químico de las sustancias” (Furió y Domínguez, 2007).

Las relaciones con el mundo cotidiano del estudiante no se limitan a brindar ejemplos de hechos y fenómenos de la vida diaria, o que tengan algunas implicaciones sorprendentes e interesantes. También es pertinente tener en cuenta los significados que en el lenguaje cotidiano se dan a palabras comunes.

La necesidad de apropiarse de la discusión realizada en este artículo por parte de los profesores de nivel medio radica, fundamentalmente, en que los libros de texto de nivel medio (sobre la base de las conclusiones del trabajo de Raviolo, 2008): (a) no definen algunos conceptos básicos que abordan en sus páginas, (b) muestran una alarmante diversidad de afirmaciones, (c) presentan proposiciones erróneas o generalizaciones imprecisas y (d) no tienen en cuenta las concepciones alternativas que pueden fomentar los mismos textos, directa o indirectamente. En ese análisis de textos también se concluyó que, considerados en su conjunto, los libros presentan un cuerpo, lógica y semánticamente, incoherente de conocimientos, porque dan la impresión de que para entender el significado correcto de muchas expresiones hay que saber química previamente; por ejemplo, para poder superar: (1) el uso del mismo término con distinto significado (ej.: elemento, combinación), (2) el empleo de palabras que tienen otras connotaciones en la vida cotidiana, y (3) las contradicciones en la lógica del discurso.

Los profesores encuestados no mejoraron las definiciones que aparecen en los libros de texto que utilizan. En muchos casos, las omisiones u errores de los textos se amplifican en las respuestas de los docentes. La situación en el aula puede ser más caótica si se tiene en cuenta que los profesores encuestados son docentes que participan en cursos de perfeccionamiento, con actitudes de superación e interesados en la enseñanza (Raviolo, 2011).

Otra implicación importante de este trabajo es la necesidad de volver a reflexionar sobre las definiciones de los conceptos básicos de la química en distintos momentos del desarrollo del currículo, incluso en la universidad,

incorporando progresivamente otros matices, como los históricos y epistemológicos. Es un error creer que un concepto abstracto se aprende en un momento del programa de forma acabada y definitiva.

## Referencias

- Abd-El-Khalick, F.; Lederman, N. (2000). The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science, *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1057-1095.
- ACS, American Chemical Society. (2005). *Química un proyecto de la ACS*. Ed. Reverté: Barcelona.
- Andersson, B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformation (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, 53-85.
- Benfey, O. (Traductor) (1958). August Kekulé and the birth of the structural theory of organic chemistry in 1858. *Journal of Chemical Education*, 35:1, 21-23. Es una traducción del discurso que dio Friedrich August Kekulé von Stradonitz en el Ayuntamiento de Berlín a propósito de la celebración de 25 años de su propuesta de estructura para el benceno publicado originalmente en Kekulé, F. A. (1890). «Benzolfest: Rede», *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 23, 1302-1311.
- Benfey, O. (1963). Concepts of Time in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 40(11): 574-577.
- Bertomeu-Sánchez, J.; García-Belmar, A.; Bensaude-Vincent, B. (2002). Looking for an Order of Things: Textbooks and Chemical Classifications in Nineteenth Century France, *Ambix*, 49(3), 228-251.
- Bullejos, J.; De Manuel, E.; Furió, C. (1995). ¿Sustancias simples y/o elementos? Usos del término elemento químico en los libros de texto. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 9, 27-42.
- Butlerov, A. (1861). Einiges über die chemische Structur der Körper. *Zeitschrift für Chemie und Pharmacie*, 4, 549-560. En inglés: On the chemical structures of substances, traducido por Frank F. Kluge y David Larder (1971). *Journal of Chemical Education*, 48(5), 289-291.
- Casado, G.; Raviolo, A. (2005). Las dificultades de los alumnos al relacionar distintos niveles de representación de una reacción química. *Universitas Scientiarum*, 10, 35-43.
- Cerro, M. y Merino, G. (2009). ¿Moléculas sin esqueleto? La oportunidad perfecta para revisar el concepto de estructura molecular, *Educación Química*, 20(2), 187-191.
- Chang, R. (1999). *Química*. Sexta edición. México: Mc Graw Hill.
- Chang, R. (2007). *Química*. Novena edición. México: Mc Graw Hill.
- Conant, J. (1947). *On Understanding Science*. New Haven, CT.: Yale University Press.
- Couper, A. (1858). On a New Chemical Theory, *Philosophical Magazine*, 16, 104-116. Una versión electrónica de este artículo puede obtenerse de la página de Carmen Giunta de artículos clásicos selectos en la URL <http://web.lemoyne.edu/~giunta/couper/couper.html>, consultada por última vez el 7 de febrero de 2010.
- De Fourcroy, A. (1796). Chimie en *Encyclopédie méthodique Chymie pharmacie et métallurgie*, Paris & Liège, vol. 3, 303-708.
- Disessa, A. (1983). Phenomenology and the evolution of intuition. En D. Gentner y A. L. Stevens (Eds.), *Mental Models* (pp. 14-34). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Furió, C.; Furió, C. (2000). Dificultades conceptuales y epistemológicas en el aprendizaje de los procesos químicos. *Educación Química*, 11(3), 300-308.
- Furió, C.; Domínguez, M., (2007). Deficiencias en la enseñanza habitual de los conceptos macroscópicos de sustancia y cambio químico. *Revista de Educación en Ciencias*, 8(2), 84-92.
- García Belmar, A.; Bertomeu Sánchez, J. (1998). Lenguaje, ciencia e historia: una introducción histórica a la terminología química. *Alambique*, 17, 477-488.
- García Franco, A.; Taber, K. (2009). Secondary Students' Thinking about Familiar Phenomena: Learners' explanations from a curriculum context where 'particles' is a key idea for organising teaching and learning, *International Journal of Science Education*, 31(14), 1917-1952.
- García-Sucre, M.; Bunge, M. (1981). Geometry of a Quantal System. *International Journal of Quantum Chemistry*, 19, 83-93.

- Garritz, A.; Raviolo, A. (2005). Decálogos e inventarios. *Educación Química*, 16, 122-128.
- Garritz, A. (2007). Química: ¿tiene que ver con sustancias o con procesos? Consultada por última vez en febrero 10, 2011, en la URL [http://garritz.com/andoni\\_garritz\\_ruiz/](http://garritz.com/andoni_garritz_ruiz/)
- Garritz, A. (2010). La historia como una herramienta para promover el aprendizaje. *Educación Química*, 21(4), 26-69.
- Geoffroy, E. (1718). Table des différents rapports observés en Chimie entre différentes substances, *Historie de l'Académie Royale des Sciences. Avec des Mémoires de Mathématique & de Physique, pour la même Année*, 202-212.
- Gillespie, R.; Eaton, D.; Humphreys, D.; Robinson, E. (1994). *Atoms, molecules and reactions. An introduction to chemistry*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall.
- Giunta, C. (1998). Using History To Teach Scientific Method: The Case of Argon. *Journal of Chemical Education*, 75(10), 1322-1325.
- Grossman, M. (2010). William Higgins at the Dublin Society, 1810-20: The loss of a professorship and a claim to the atomic theory. *Notes & Records of the Royal Society*, publicado en línea octubre de 2010, en [URL].
- Hargittai, I. (en línea), Aleksandr Mikhailovich Butlerov and chemical structure: Tribute to a scientist and to a 150-year old concept (Editorial), *Structural Chemistry*, en línea desde el 17 de noviembre de 2010.
- Hendry, R. (2006), Elements, Compounds and Other Chemical Kinds. *Philosophy of Science*, 73(5), 864-875.
- Jensen, W. (1998). Logic, History, and the Chemistry Textbook. II. Can We Unmuddle the Chemistry Textbook? *Journal of Chemical Education*, 75(7), 817-828.
- Jensen, W. (2005). The Symbolism of Chemical Equations. *Journal of Chemical Education*, 82(10), 1461.
- Johnson, P. (1996). What is a substance? *Education in Chemistry*, 33(2), 41-45.
- Johnstone, A. (1982). Macro- and microchemistry. *School Science Review*, 64, 377-379.
- Johnstone, A. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem, *Journal of Computer Assisted Learning*, 7, 75-83.
- Jorba, J.; Gómez, I.; Prat, A. (Eds.) 2000. *Hablar y escribir para aprender*. Ed. Síntesis. Madrid.
- Kekulé, F. (1858). Ueber die Constitution und die Metamorphosen der chemischen Verbindungen und über die chemische Natur des Kohlenstoffs. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 106(2): 129-159.
- Klein, U. (1994). Origin of the Concept of Chemical Compound. *Science in Context*, 7, 163-204.
- Klein, U. (1995). E. F. Geoffroy's Table of Different 'Rapports' observed between different chemical substances A reinterpretation, *Ambix*, 42(2), 79-100.
- Kluge, F.; Larder, D. (Traductores, 1971). A. M. Butlerov: On the Chemical Structure of Substances. *Journal of Chemical Education*, 48(5), 289-291.
- Larder, D.; Kluge, F. (1971). Alexander Mikhailovich Butlerov's Theory of Chemical Structure. *Journal of Chemical Education*, 48(5), 287-289.
- Llorens, J. (1991). *Comenzando a aprender química*. Visor: Madrid.
- McNaught, A.; Wilkinson, A. (1997). *IUPAC Compendium of Chemical Terminology, (The gold book)*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, publicada en forma impresa por Blackwell Science, 2<sup>nd</sup> edition. Puede consultarse en línea en la URL <http://old.iupac.org/publications/compendium/I.html>. Consultada por última vez el 20 de abril, 2011.
- Nelson, P. (2003). Basic chemical concepts. *Chemistry Education: Research and Practice*, 4(1), 19-24.
- Nelson, P. (2008). Meaning of 'substance'. *Chemistry Education: Research and Practice*, 9(3), 285.
- Palmer, B.; Treagust, D. (1996). Physical And Chemical Change In Textbooks: An Initial View, *Research in Science Education*, 26(1), 129-140.
- Raviolo, A.; Garritz, A. (2007). Uso de analogías en la enseñanza de la química: necesidad de elaborar decálogos e inventarios. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 51, 28-39.
- Raviolo, A. (2008). Las definiciones de conceptos químicos básicos en textos de secundaria. *Educación Química*, 19(4), 315-322.

- Raviolo, A. (2011). Las definiciones de los conceptos básicos de la química según los profesores. *Educación en la Química*, en prensa.
- Reyes, F.; Garritz, A. (2006). Conocimiento pedagógico del concepto de 'reacción química' en profesores universitarios mexicanos. *Revista Mexicana de Investigación Educativa*, 11(3), 1175-1205. Disponible el 28 de abril de 2010 en [URL].
- Shulman, L. (1987). Knowledge and Teaching: Foundations of the New Reform. *Harvard Educational Review*, 57:1, 1-22.
- Schummer, J. (2004). Editorial: substances versus reactions. *Hyle International Journal for the Philosophy of Chemistry*, 10(1), 3-4. Ver la URL <http://www.hyle.org/index.html>
- Sosa, P. (1999). De palabras, de conceptos y de orden. *Educación Química*, 10(1), 57-60.
- Sosa, P. (2007). *Conceptos base de la química*. México: Colegio de Ciencias y Humanidades, UNAM.
- Spencer, J.; Bodner, G.; Rickard, L. (2006). *Chemistry. Structure and Dynamics*, Third edition, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Umland, J.; Bellama, J. (2000). *Química General* (3ª edición). Thomson: México.
- Stein, R. (2004). Towards a Process Philosophy of Chemistry. *Hyle International Journal for the Philosophy of Chemistry*, 10(1), 5-22. Tomado de la URL <http://www.hyle.org/index.html> el 20 de octubre de 2010.
- Taber, K.; García, A. (2009). Intuitive thinking and learning chemistry. *Education in Chemistry*, 46(2), 57-60.
- Van Brakel, J. (1997). Chemistry as the Science of the Transformation of Substances. *Synthese*, 111, 253-282.
- Weininger, S. (1984). The molecular structure conundrum: Can Classical Chemistry be Reduced to Quantum Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 61(11), 939-944.
- Weininger, S. (2000). Butlerov's Vision. The Timeless, the Transient, and the Representation of Chemical Structure, en: N. Bhushan y S. Rosenfeld (eds.), *Of Minds and Molecules*, Oxford University Press, New York, pp. 143-161.
- Weisberg, M.; Needham, P. (2010). Matter, Structure, and Change: Aspects of the Philosophy of Chemistry. *Philosophy Compass*, 5(10), 927-937.
- Wooley, R. (1985). The molecular structure conundrum. *Journal of Chemical Education*, 62(12), 1082-1084.

## Anexo 1

Textos analizados (en orden cronológico de edición)

1. Fernández Serventi, H., *Química General e Inorgánica*, 8° edición, Ed. Losada, 1974.
2. Biasioli, G. A. y Weitz, C. S., *Química General e Inorgánica*, Ed. Kapelusz, 1978.
3. Carrillo, E., *Ciencias Físico Químicas III*, Ed. Estrada, 1979.
4. Maiztegui, A. y Boido, G., *Nociones de Física y Química*, Ed. Kapelusz, 1982.
5. Magnetti, R. C., *Elementos de Física y Química*, Ed. Huemul, 1985.
6. Beltrán, F., *Química, un curso dinámico*, 4° edic., Magisterio Río de La Plata, 1987.
7. Depau, C., Tonelli, L. y Cavalchino, A., *Elementos de Física y Química*, Ed. Plus Ultra, 1988.
8. Milone, J. O., *Merzeología IV*, Ed. Estrada, 1992. 9. Mautino, J. M., *Química 4 (Aula Taller)*, 1a edic., Ed. Stella, 1992.
10. Escudero, P. y otros, *Físico-Química*, Ed. Santillana, 1992.
11. Garritz, A. y Chamizo, J. A., *Química*, Addison Wesley, 1994.
12. Vidarte, L., *Química. Para descubrir un mundo diferente*, Ed. Plus Ultra, 1997.
13. Alegría, M.P. y otros, *Química I. Polimodal*, Ed. Santillana 1999.
14. Mautino, J. M., *Físicoquímica 3. Aula Taller*, Ed. Stella, 1999.
15. Aldabe, S., Aramendia, P. y Lacreu, L., *Química 1, Fundamentos*, Edic. Colihue, 1999.
16. López Vivar, J. y otros, *Química. Educación Media*, Santillana, 1999.
17. Candas, A. y otros, *Química. Polimodal*, Ed. Estrada, 2000.
18. Dal Fávero, M. A. y otros, *Química Activa. Polimodal*, Ed. Puerto de Palos, 2001.
19. Mautino, J. M., *Química Polimodal*, 1a edic., Ed. Stella, 2002.
20. Bulwik, M. y otros, *Química (Polimodal)*, Tinta Fresca, 2006.

---

[1] La definición original en inglés es: "certain primitive and simple, or perfectly unmingled bodies; which not being made of any other bodies, or of one another, are the ingredients of which all those called perfectly mixt bodies are immediately compounded, and into which they are ultimately resolved."

[2] Por Claude Louis Bertholet (1748-1822), quien negaba la ley de las proporciones constantes de Proust; lo hizo sosteniendo que la composición química de los compuestos no era constante, ya que dependía de las cantidades que reaccionaban entre sí en cada caso.

[3] Por supuesto, por John Dalton (1766-1844), el padre de la teoría atómica.

[4] Debe referirse a la parte superior descubierta de los famosos double-deckers londinenses (recién desaparecidos en 2005).

[5] Se recomienda ver sobre este punto el artículo de Cerro y Merino (2009) donde se presentan moléculas con estructura fluxional o sin una estructura definida, o confórmeros que se transforman en tiempos minúsculos en una u otra forma molecular.

[6] Dado que, como ya se mencionó, suele utilizarse la palabra combinación para referirse a mezclas, se recomienda hacer énfasis con los alumnos que ahora se está utilizando en el contexto de las reacciones químicas.