

La diferenciación entre sustancia elemental y compuesto es una etapa fundamental en la construcción del concepto de elemento químico y de la teoría atómico-molecular de la materia. El enfoque didáctico que proponemos en este artículo para construir estos conceptos trata de conjuntar un enfoque indagativo experimental con un proceso de modelización en los niveles macroscópico y submicroscópico, en la línea de enseñar los conceptos básicos de la química aunando indagación, modelización y experimentación.

PALABRAS CLAVE: *Sustancia elemental; Compuesto; Elemento químico; Indagación; Modelización.*

Sustancias químicas elementales y compuestos químicos. Una propuesta didáctica con un enfoque investigativo y de modelización en los niveles macroscópico y submicroscópico

pp. 45-58

45

Aureli Caamaño Ros *

Centro de Documentación y Experimentación en Ciencias. Barcelona.

Introducción

La estructura conceptual de la química está basada en una serie de conceptos básicos, entre ellos el de materia, material, sustancia química, sustancia simple o elemental, compuesto, mezcla, disolución, etc. La elaboración de estos conceptos en el aula requiere de un proceso de modelización e indagación que implica una serie de procesos: emisión de hipótesis, experimentación, interpretación, predicción,

argumentación, etc. También requiere moverse constantemente entre el mundo macroscópico –en el que se realizan los experimentos y se proponen modelos macroscópicos– y el mundo submicroscópico o nanoscópico –el de las hipótesis sobre la naturaleza e interacciones entre las partículas constitutivas de las sustancias–.

Una vez establecidos los conceptos de sustancia química (Vogelezang, 1987; Sánchez y Valcárcel, 2003; Caamaño y Cuadros 2011) y de reacción química (Martín del Pozo, 1998; Bor-

* Dirección de contacto: aurelicaamano@gmail.com

✉ Artículo recibido el 10 de agosto de 2011 y aceptado el 21 de agosto de 2011.

46

sese y Esteban, 1998; Azcona, Furió, Intxausti y Álvarez, 2004; Johnson, 2000, 2002a, 2002b), la diferenciación entre sustancia simple (o elemental) y compuesto es una etapa fundamental en la construcción del concepto de elemento químico y de la teoría atómico-molecular de la materia. Los enfoques didácticos de los años 80 –bajo el paradigma del descubrimiento orientado– intentaron establecer esta diferenciación dando prioridad a la experimentación (nivel macroscópico) (Grup Recerca-Faraday, 1990). Muchos profesores e investigadores defienden un abordaje macroscópico de los cambios químicos previo a la introducción de los conceptos de átomo, molécula y estructura gigante, sobre todo en los primeros cursos de química de la enseñanza secundaria obligatoria (Tsaparlis, Kolioulis y Pappa, 2010). Sin embargo, la mayoría de libros de texto y los enfoques más tradicionales abordan esta diferenciación desde un punto de vista submicroscópico, planteando definiciones iniciales de sustancia simple y compuesto en términos de átomos y moléculas. Este mismo enfoque lo encontramos en trabajos de investigación recientes que proponen enfoques modelizadores del enlace químico que parten de la estructura interna del átomo (Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein y Kronik, 2008).

Ambos enfoques presentan dificultades de comprensión (Furió-Mas y Domínguez-Sales, 2007; Cokelez, Dumno y Taber, 2008), que creemos que solo pueden ser superadas con un enfoque modelizador e indagativo integrador de los niveles macroscópico y submicroscópico, pero partiendo del nivel macroscópico. Los conceptos de sustancia elemental y compuesto, están íntimamente relacionados con los conceptos de elemento químico y reacción química –de descomposición y de síntesis–, y los conceptos submicroscópicos de átomo, molécula y estructura gigante, lo cual da idea de la complejidad de su modelización. La expresión de las ideas sobre la estructura de las sustancias y las reacciones químicas, su representación gráfica mediante diagramas atómico-moleculares y multi-atómicomoleculares, su representación simbólica mediante símbolos, fórmulas

y ecuaciones, y el significado atribuido a cada uno de los términos y representaciones que se utilizan, son otros aspectos importantes a tener en cuenta en la enseñanza y aprendizaje de estos conceptos fundamentales de la química (Caamaño, 1994).

El enfoque didáctico que proponemos en este artículo trata de conjuntar un enfoque indagativo experimental con un proceso de modelización en los dos niveles, el macroscópico y el submicroscópico, en la línea de enseñar la química aunando indagación, modelización y experimentación (Caamaño 2011) y haciendo un amplio uso de diferentes niveles de representación (Chandrasegaran y Treagust, 2009). La propuesta didáctica se sitúa en el tercer curso de la ESO (alumnos de 15 años), que es el curso en que se aborda este tema en el currículum en España.

Planteando el problema: ¿los muy diversos compuestos que conocemos pueden estar constituidos por un número limitado de elementos químicos?

Supongamos que nuestros alumnos ya han observado cambios físicos y químicos en diversas sustancias y han aprendido a diferenciar estos dos tipos de cambios, lo cual no siempre es fácil, como veremos más adelante; que han utilizado procesos físicos, tales como la evaporación, la destilación, la cristalización, la extracción o la cromatografía con objeto de conseguir separar las sustancias que componen las disoluciones; y que han identificado sustancias químicas por sus propiedades características y han probado su grado de pureza mediante algún criterio de pureza.

La pregunta que pueden hacerse –o que nosotros podemos hacerles– en este momento es si la gran variedad de sustancias químicas que conocemos puede estar constituida por un número limitado de “elementos químicos”, en cuyo caso, las sustancias compuestas podría ser posible “descomponerlas” en otras más simples

y, en último término, en las sustancias elementales a partir de las cuales pueden haberse formado. Las sustancias elementales estarían formadas por un único tipo de elemento químico y no sería posible descomponerlas en otras más simples. Somos conscientes que en esta primera fase de aproximación al problema utilizamos un concepto vago de “elemento químico”, como el tipo de materia constitutiva de cada una de las sustancias elementales.

Un método de investigación experimental: síntesis o descomposición

Hay dos tipos de experiencias que pueden proporcionar evidencia experimental sobre la naturaleza compuesta o elemental de una sustancia, las reacciones de síntesis y las reacciones de descomposición. Veamos cómo podemos interpretar estas reacciones. Si la sustancia C se obtiene por reacción de las sustancias más simples A y B,



cabe pensar que está constituida o compuesta por el mismo tipo de materia (los mismos elementos químicos) que constituyen A y B. Si A y B fueran sustancias elementales (es decir, sustancias que no pueden descomponerse en otras más simples), podríamos decir que C está formada únicamente por dos elementos químicos, que son los que constituyen las sustancias A y B, respectivamente.

Si la sustancia C puede descomponerse en las sustancias más simples A y B,



cabe pensar que está constituida o compuesta por el mismo tipo de materia (los mismos elementos químicos) que constituyen A y B. Si A y B fueran sustancias elementales, entonces podríamos decir que C está formada únicamente por dos elementos químicos, que son los que constituyen las sustancias A y B, respectivamente.

Si una sustancia no pudiera ser descompuesta en otras más simples, concluiríamos que

es una sustancia “simple” o “elemental”, es decir, una sustancia formada por un único elemento químico. Es evidente que este método siempre deja abierta la posibilidad de que la sustancia pueda ser un compuesto que se descomponga a una temperatura superior a la que hemos podido alcanzar en el laboratorio.

Esta interpretación implica aceptar la idea de que la cantidad de materia que constituye las sustancias se conserva. Si consideramos la masa como una propiedad que mide la “cantidad” de materia, la conservación de la masa en las reacciones es una evidencia experimental de la conservación de la cantidad de materia. Pero no solo se conserva la cantidad de materia sino también los tipos de materia elemental (los elementos), ya que de algún modo el elemento que constituye a A y el elemento que constituye a B se encuentran en C, lo que podría probarse experimentalmente si a través de una reacción de descomposición obtuviéramos de nuevo las sustancias A y B, o bien, si a través de una reacción de desplazamiento obtuviéramos la sustancia A o la B (por ejemplo, $AB + X \rightarrow AX + B$). Nótese que en todos estos razonamientos estamos utilizando la expresión “tipo de materia que constituye una sustancia elemental” como equivalente a “elemento químico”.

Si nos preguntamos si una sustancia es un compuesto, podemos probar que lo es si conseguimos obtenerla por síntesis, a partir de otras sustancias más simples. Pero eso requiere conocer la reacción de síntesis que puede conducir a esta sustancia. También es preciso comprobar que la sustancia obtenida es la misma que la sustancia cuya naturaleza compuesta queremos investigar. En cambio la descomposición de una sustancia no requiere ningún conocimiento previo sobre la reacción, solo comprobar que se han obtenido dos o más sustancias más simples. Por esta razón, la pregunta de si una sustancia es compuesta o elemental se resuelve de forma más sencilla intentando la descomposición de la sustancia que su síntesis. La reacción de descomposición no tiene por qué dar lugar a sustancias simples elementales, sino que puede tratarse de sustancias más

simples que las de la sustancias que se descomponen, pero que sean todavía susceptibles de ser descompuestas de nuevo. La evidencia de la descomposición de una sustancia en otras más simples es suficiente para probar que se trata de una sustancia compuesta. Hay dos formas básicas de intentar descomponer una sustancia: por calentamiento enérgico (descomposición térmica) o por el paso de la corriente eléctrica (electrólisis).

El problema fundamental de este enfoque operacional para identificar sustancias compuestas radica en que es preciso tener evidencia de que el proceso de descomposición ha sido “químico”; debemos tener certeza de que hemos realizado una “separación química” de los “elementos” constituyentes del compuesto y no una separación física, como ocurría con los componentes de una mezcla; es decir, estar seguros de que las sustancias que se obtienen sean sustancias no existentes previamente en la muestra que se calienta.

Desgraciadamente, las reacciones de descomposición más sencillas de realizar son generalmente reacciones en las que se desprenden gases, que no se ven, lo que dificulta apreciar si ha tenido lugar una reacción de descomposición. Con las sustancias elementales ocurre en muchos casos, que al calentarlas para probar si se descomponen, reaccionan con el oxígeno del aire, dando lugar a cambios químicos que pueden dificultar su caracterización como sustancias elementales.

Por otro lado, no debemos olvidar que los alumnos tienden a interpretar las reacciones como procesos de transformación de las propiedades de las sustancias (sustancialización de las propiedades) y no de transformación de unas sustancias en otras, lo que dificulta la interpretación correcta de estas reacciones. Por ejemplo, interpretan la oxidación del hierro como si el hierro se hubiera vuelto pardo y no como una combinación con el oxígeno del aire que da lugar a una nueva sustancia, el óxido de hierro, que es de color pardo. Como podemos deducir de todas estas consideraciones, la interpretación de las reacciones de descomposición no es nada simple.

Una secuencia didáctica para establecer los conceptos de sustancia elemental, elemento químico y compuesto químico

Describimos a continuación una serie de investigaciones que constituyen la fase inicial de una secuencia didáctica para la enseñanza-aprendizaje de los conceptos sustancia elemental, elemento químico y compuesto. Una etapa centrada en la investigación de la posible descomposición de una serie de sustancias y la modelización de los fenómenos que se observan a nivel macroscópico. Se investigan compuestos que se descomponen a temperaturas no muy altas, como el sulfato de cobre hidratado y el carbonato de cobre, o sustancias que pueden descomponerse fácilmente mediante una electrólisis, como el agua. También sustancias elementales, como el cobre.

Actividad 1. ¿Es la malaquita un compuesto?

Una sustancia que puede utilizarse para plantear una indagación sobre si una sustancia es un compuesto o una sustancia elemental es la malaquita (carbonato de cobre(II)). En el cuadro 1 se muestra el guión de una investigación guiada, cuyo grado de apertura puede modificarse según la interacción dialógica que se desee establecer con los alumnos (Caamaño y Corominas, 2004; Caamaño 2005) (ver cuadro 1).

Comentario a la actividad

Si calentamos en un tubo de ensayo malaquita, un sólido de color verde, observaremos que adquiere un color negro. Si pesamos el sólido negro, observaremos que pesa menos que el sólido inicial, lo que hace suponer que debe haber tenido lugar una reacción de descomposición con desprendimiento de un gas. Para observar si se desprende un gas se puede colocar en el tubo que contiene la malaquita un tapón horadado atravesado por un tubo de vidrio acodado, e intro-

Cuadro 1. ¿Es la malaquita un compuesto?**Investigación: ¿La malaquita es un compuesto?**

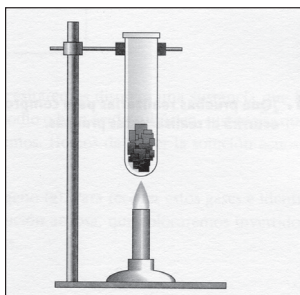
La malaquita es una sustancia sólida de color verdoso. Queremos averiguar si se trata de una sustancia elemental o de un compuesto.

Planificación

- ¿Qué prueba experimental harías para saber si se trata de un compuesto?
- Piensa y describe el montaje experimental y el material que necesitas.

Realización

- ¿Qué sucede cuando calientas fuertemente la malaquita?



- ¿Cómo lo interpretas?

El sólido negro que se forma es óxido de cobre. En la descomposición de una sustancia se pueden obtener sustancias gaseosas que pasan inadvertidas. Para comprobar si se está desprendiendo o no alguna sustancia gaseosa, puedes montar el dispositivo que se indica en la figura.



- Investiga si al calentar la malaquita se desprende un gas.
- Teniendo en cuenta que el nombre químico de la malaquita es carbonato de cobre, ¿cuál podría ser el gas que se desprende?
- ¿Cómo podrías comprobar que el gas que se desprende es dióxido de carbono?
Recuerda que una reacción característica del dióxido de carbono es su reacción con el agua de cal (disolución acuosa de hidróxido de calcio), que produce carbonato de calcio, una sal blanca insoluble, que precipita enturbando la solución.

Conclusiones

¿Qué conclusión sacas de la investigación realizada? Justifica tu respuesta.

Comunicación

Escribe un informe, describiendo la investigación realizada, que responda a las siguientes preguntas: ¿Qué queríamos saber? ¿Qué método hemos utilizado? ¿Cuáles han sido los resultados obtenidos? ¿Qué conclusión hemos sacado?

ducir su extremo exterior en otro tubo con agua. La observación de las burbujas que se producen indica que se está desprendiendo un gas. Si proporcionamos ahora a los estudiantes la información de que la malaquita es un carbonato, se puede inferir que el gas que se desprende es dióxido de carbono. Si sustituimos el agua del tubo por agua de cal (disolución de hidróxido de calcio), se observa la formación de un precipitado blanco, que es una reacción característica del dióxido de carbono. Así pues podemos interpretar el proceso que ha tenido lugar del siguiente modo: malaquita(s) \rightarrow sólido negro + dióxido de carbono(g).

Puede comprobarse que este sólido negro obtenido tiene el mismo aspecto y propiedades que el sólido negro que se produce al calentar el cobre (como veremos en la investigación siguiente), de donde se puede concluir que se trata de óxido de cobre.

malaquita(s) \rightarrow óxido de cobre(s) + dióxido de carbono(g).

Se trata de una reacción característica de descomposición de los carbonatos. De esta interpretación se puede inferir que la malaquita es un compuesto, probablemente, carbonato de cobre.

Actividad 2. ¿Es el cobre una sustancia elemental?

Si se calienta fuertemente un metal noble como el oro no conseguiremos descomponerlo y concluiremos que es una sustancia elemental. Sin embargo, si el calentamiento se hace sobre metales menos nobles (más reactivos) que el oro como, por ejemplo, el cobre, el hierro o el magnesio, nos encontraremos con un resultado que puede resultar inesperado. El cuadro 3 muestra el guión de la investigación guiada para decidir si el cobre metálico es o no una sustancia elemental (ver cuadro 2).

Comentario sobre la actividad

Para probar que el cobre es una sustancia elemental podemos hacer pasar una corriente eléctrica a su través. El hecho de que conduzca

la electricidad sin descomponerse, como ocurre con todos los metales, es una prueba de que se trata de una sustancia elemental.

También podemos calentar fuertemente una lámina de cobre, para mostrar que no es posible descomponerla. Pero cuando se calienta una lámina de cobre observamos que se ennegrece. Los estudiantes pueden interpretar este cambio como un simple cambio de color del cobre debido al calentamiento o bien como la descomposición del cobre en una sustancia negra como ha ocurrido en el calentamiento del carbonato de cobre. Pero si fuera así, la lámina después del calentamiento debería pesar lo mismo que antes, en la primera interpretación, o menos, en la segunda interpretación. Si se pesa la lámina antes y después de su ennegrecimiento, observaremos que una vez ennegrecida pesa más. La razón del aumento de masa y del ennegrecimiento es que el cobre ha reaccionado con el oxígeno del aire y se ha formado óxido de cobre (II), que es una sustancia negra, que tiene más masa que el cobre que ha reaccionado, puesto que ha “incorporado” el oxígeno. El aumento de la masa de una muestra sólida en este tipo de reacciones es siempre una evidencia de que ha ocurrido una reacción de combinación del metal con el oxígeno del aire.

Para confirmar la hipótesis de que se trata de una reacción con el oxígeno del aire, podemos doblar la lámina y golpearla con un martillo, para evitar el contacto con el aire en las superficies interiores, y volver a calentar. Al enderezar la lámina, observaremos que solo las superficies externas se han ennegrecido, mientras que las interiores no se han alterado.

Si repetimos la experiencia, calentando más intensamente una de las zonas ennegrecidas de la lámina, manteniéndola en la zona más caliente de la llama, podremos apreciar que el ennegrecimiento desaparece. Esta desaparición del color negro es debido a la descomposición del óxido de cobre en cobre y oxígeno, que se produce al elevar aún más la temperatura. Tan pronto como la lámina se enfría un poco, vuelve a aparecer el color negro, porque vuelve a oxidarse el cobre.

Cuadro 2. ¿Es el cobre una sustancia elemental?**Investigación. ¿Es el cobre una sustancia elemental?***Exploración de ideas previas*

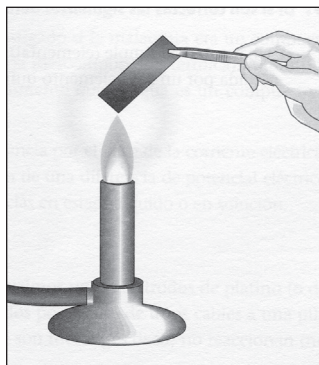
- ¿Crees que el cobre es una sustancia elemental? Justifica tu respuesta.

Búsqueda de evidencias

- ¿Qué prueba o pruebas experimentales podrías realizar para comprobarlo?

Observación e interpretación / Contrastación experimental de hipótesis

- Toma una lámina de cobre con unas pinzas y colócala sobre la llama de un mechero Bunsen. ¿Qué observas?



- ¿Cómo interpretas el ennegrecimiento que se produce?
- ¿Qué pruebas experimentales podrías realizar para confirmar tu hipótesis?
- Coloca la lámina ennegrecida en la parte más caliente de la llama y mantenla allí un tiempo. Retírala y observa rápidamente el color de la zona que estaba en contacto directo con la llama. ¿Qué observas? ¿Cómo lo interpretas?

Conclusión

- ¿Qué conclusión sacas de la investigación realizada?

Comunicación

- Escribe un informe sobre la investigación realizada.

Actividad 3. ¿Es el agua un compuesto?*Comentario sobre la actividad*

En el caso del agua, sería preciso elevar mucho la temperatura para poder descomponerla, por lo que es más fácil recurrir a una reacción de descomposición por el paso de la corriente eléctrica (electrólisis). El cuadro 3 muestra el guión para llevar a cabo la investigación de la posible descomposición del agua por el paso de la corriente eléctrica (ver cuadro 3).

Si se aplica una diferencia de potencial eléctrico, obtenida mediante una pila de 9 V o una fuente de alimentación de cc, a una muestra de agua acidulada se observa un burbujeo alrededor de cada electrodo. Los electrodos deben ser de platino. Para recoger los gases se pueden utilizar dos tubos de ensayo llenos de agua y colocarlos invertidos, cada uno sobre un electrodo.

Cuadro 3. ¿Es el agua un compuesto?

Investigación: ¿Es el agua un compuesto?

Exploración de ideas previas

- ¿Crees que el agua es un compuesto? Justifica tu respuesta.

Búsqueda de evidencias / Planificación del procedimiento experimental

- ¿Cómo podríamos comprobar que el agua es un compuesto?
Un método que se puede utilizar es intentar realizar su descomposición por el paso de la corriente eléctrica (electrólisis). Para ello es preciso aplicar una diferencia de potencial eléctrico sobre el agua.
- Diseña un procedimiento experimental que te permita comprobar tu hipótesis. Ayúdate de los comentarios y preguntas que siguen.
 - ¿Cómo podemos aplicar una diferencia de potencial eléctrico al agua?
 - ¿Qué diferencia de potencial puede ser suficiente?
 - El agua es muy poco conductora de la electricidad. ¿Cómo podríamos aumentar su conductividad?
 - Si conectamos los bornes de una pila a cables de cobre e introducimos los extremos libres de los cables en el agua, observaríamos que uno de ellos reacciona con el agua, porque la solución toma un color azulado (y si estuviéramos mucho tiempo observaríamos que el cable de cobre se va consumiendo).
 - ¿Qué tipo de conductor metálico podríamos utilizar para evitar que esto ocurra?

Consulta el procedimiento que has ideado con tu profesor o profesora, antes de llevarlo a la práctica.

Realización e interpretación

- Intenta realizar la electrólisis del agua utilizando el dispositivo que has ideado.
- Observa lo que ocurre ¿Cómo lo interpretas?
- ¿Cómo podrías recoger los gases que se desprenden en cada electrodo para identificar de qué gases se trata? Toma nota de la polaridad de los electrodos en que se obtiene cada gas.
- En la descomposición del agua se obtiene hidrógeno(g) y oxígeno(g). Para comprobarlo realiza u observa las pruebas siguientes.

Prueba de identificación del hidrógeno

Retira el tubo de la celda electrolítica levantándolo verticalmente. Como el hidrógeno es menos denso que el aire, no se escapará. A continuación, enciende una cerilla y acércala a la boca del tubo, al mismo tiempo que le das la vuelta. Oirás una pequeña explosión debida a la reacción del hidrógeno con el oxígeno del aire.

Prueba de identificación del oxígeno

Repite el mismo procedimiento con el tubo que contiene el oxígeno, pero, cuando lo saques del agua, tapa la boca del tubo con el dedo pulgar y, acto seguido, dale la vuelta. El oxígeno es más denso que el aire y, por tanto, se escaparía si levantásemos el tubo sin girarlo. A continuación, introduce un trocito de papel o una cerilla acabada de apagar en el tubo. Observarás que se vuelve a encender como consecuencia de la combustión con el oxígeno del tubo.

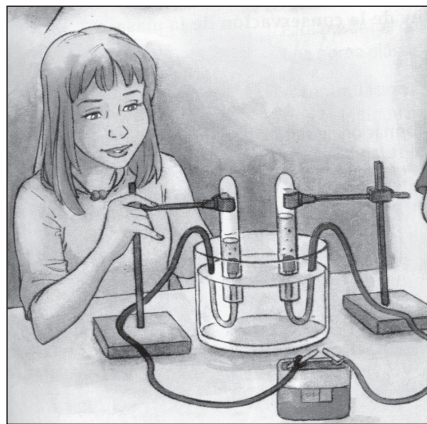
Conclusión

- De acuerdo, con los resultados de las experiencias realizadas, ¿cuál es tu conclusión sobre la cuestión planteada?

Comunicación

- Escribe un informe describiendo la investigación realizada y la conclusión obtenida.

Los gases se acumulan en la parte superior de los tubos invertidos desplazando hacia abajo el nivel del agua en los tubos.



Se pueden practicar pruebas de identificación de ambos gases, que nos llevan a la conclusión de que se trata de hidrógeno y de oxígeno, lo que nos permite establecer la siguiente interpretación del proceso que ha tenido lugar: $\text{agua(l)} \rightarrow \text{hidrógeno(g)} + \text{oxígeno(g)}$ y concluir que el agua es un compuesto formado por “hidrógeno” y “oxígeno”. Sin embargo, es bien conocido que esta frase puede ser fácilmente mal interpretada por los estudiantes (Caamaño 1998; Sosa y Méndez, 2011). El problema conceptual y lingüístico que se nos plantea en estos momentos para una interpretación correcta de la composición del agua, es expresar que el agua está formada por los elementos hidrógeno y oxígeno sin que los estudiantes entiendan que se trata del hidrógeno gas y del oxígeno gas, es decir, de una mezcla de hidrógeno y oxígeno.

La idea de la conservación de los elementos que constituyen el hidrógeno y el oxígeno nos induce a pensar que los elementos que forman estas dos sustancias elementales deben estar también presentes en el agua; pero las propiedades del agua son totalmente diferentes a las del hidrógeno y el oxígeno, lo que evidencia que son sustancias químicas diferentes. La explicación de que la materia constitutiva del hidrógeno y del oxígeno está unida “químicamente” en

el agua, dando lugar a una sustancia diferente, es correcta, pero difícil de comprender a nivel macroscópico. Así pues hay aquí un conflicto conceptual cuya resolución requiere introducir la idea de elemento químico y, en último término, los conceptos de átomo, molécula y estructura gigante.

También se observa que el volumen de hidrógeno que se recoge es siempre el doble que el de oxígeno, lo que es un dato de interés para establecer una de las características fundamentales de los compuestos químicos, que es su composición fija, e interpretar más adelante la composición atómica del agua.

Sustancias elementales y elementos químicos. ¿Se conservan los elementos químicos en las reacciones?

El hidrógeno y el oxígeno son sustancias “simples” o “elementales”, es decir, sustancias que no pueden descomponerse en otras más simples. Puede ser el momento de informar a nuestros estudiantes que en la naturaleza existen un número limitado de sustancias de este tipo, a las que muchas veces nos referimos con el término de “elementos químicos”, por estar constituidas por un único elemento químico. La mayoría de ellas son metales, y un pequeño número de ellas son no metales, como el hidrógeno, el oxígeno, el azufre, el carbono, etc. Toda la variedad de compuestos está formada por este número limitado de “elementos químicos”.

Las sustancias elementales están formadas por un único tipo de elemento químico, mientras que los compuestos están formados por dos o más elementos químicos. Los elementos químicos se conservan a lo largo de las reacciones químicas. Para evidenciar esta conservación se han propuesto ciclos de reacciones en los que una sustancia elemental se combina con otra sustancia para dar un producto que sufre nuevas reacciones, en la última de las cuales reaparece de nuevo la sustancia elemental. En el proyecto Química Faraday (Grup

Recerca-Faraday, 1990) se recuperaba el cobre haciendo reaccionar, con una corriente de hidrógeno gas, el óxido de cobre(s) obtenido por calentamiento de cobre metálico. Solsona e Izquierdo (1998) investigaron las dificultades de interpretación de los estudiantes de un ciclo del cobre constituido por dos reacciones: en la primera el cobre se hacía reaccionar con ácido nítrico, obteniéndose nitrato de cobre(II), dióxido de nitrógeno y agua; en la segunda, el cobre(II) se reducía con hierro a cobre metálico.

Actividad 4. ¿Se conservan los elementos químicos en las reacciones?

El cuadro 4 muestra un guión para la realización de un ciclo del cobre de cuatro reacciones (Caamaño, Obach, Pérez-Rendón, 2007) (ver cuadro 4).

Hasta aquí disponemos de un modelo macroscópico de sustancia elemental y de sustancia compuesta y una idea inicial de elemento químico y de su conservación en las reacciones químicas. Para mejorar la comprensión de lo

Cuadro 4: ¿Se conserva el cobre en una serie de reacciones?

Experiencia : ¿Se conserva el cobre en una serie de reacciones?

A continuación observaremos un ciclo de reacciones que parten del cobre metálico, en las que veremos, que aunque cambian las sustancias, el cobre no desaparece como elemento, ya que lo podemos recuperar al final del ciclo.

1. Reacción del ácido nítrico con el cobre

Añadimos aproximadamente 1 mL de ácido nítrico concentrado sobre un trozo de cobre contenido en un tubo de ensayo. Se obtiene una solución de color azul verdoso, que es nitrato de cobre. El gas de color rojizo que se desprende es dióxido de nitrógeno. Atención. Los vapores rojos que se desprenden son tóxicos. Debe usarse guantes y gafas y realizar la reacción en una campana de gases.

2. Acción del hidróxido de sodio sobre la solución de nitrato de cobre

Por la acción de unas gotas de solución de hidróxido de sodio (sosa cáustica) sobre la solución de nitrato de cobre, se obtiene un precipitado de color azul, que es hidróxido de cobre y que se separa por filtración.

3. Transformación del hidróxido de cobre por calentamiento

Al calentar el precipitado azul de hidróxido de cobre, se obtiene un sólido negro, que es óxido de cobre, la misma sustancia que habíamos obtenido calentando el carbonato de cobre.

4. Acción del carbono sobre el óxido de cobre

Si ahora mezclamos el óxido de cobre con polvo de carbono y calentamos fuertemente la mezcla, veremos aparecer un sólido de color rojizo, que es cobre metálico. El carbono reacciona con el óxido de cobre combinándose con el oxígeno y formando dióxido de carbono, que se desprende, y cobre metálico.

Interpretación de las experiencias

- Escribe con palabras las ecuaciones de todas las reacciones que has observado.
- ¿Qué demuestra este ciclo de reacciones?
- ¿Podemos concluir que el elemento cobre está presente de una u otra forma en el cobre metálico, el nitrato de cobre, el hidróxido de cobre y el óxido de cobre? Justifica la respuesta.

que es una sustancia elemental y un compuesto, precisamos disponer de un modelo submicroscópico que nos permita representar la estructura interna de estas sustancias y profundizar en el concepto de elemento químico.

Modelizar la estructura de las sustancias elementales y las sustancias compuestas

El modelo atómico más simple para interpretar la estructura interna de una sustancia simple y de un compuesto (y a la vez, las reacciones de descomposición y de síntesis de un compuesto a partir de sus elementos) es el modelo daltoniano. Esta es la razón por lo que se suele utilizar como modelo escolar inicial. De acuerdo con este modelo:

- La *materia* está formada por partículas muy pequeñas, indivisibles, que se pueden llamar átomos.

- Un *elemento* es una sustancia formada por átomos iguales. Los átomos de un mismo elemento tienen el mismo tamaño y la misma masa. Los átomos de cada elemento son diferentes en tamaño y masa.

- Un *compuesto* es una sustancia constituida por *moléculas*, formadas por la combinación de *dos o más tipos de átomos diferentes*.

El modelo de Dalton explica perfectamente que una sustancia elemental no se pueda descomponer y que un compuesto sí. El problema de este modelo es que no da cuenta de la diversidad de estructuras que pueden tener las sustancias elementales y los compuestos. Dalton supuso que todos los elementos eran atómicos (así, el hidrógeno estaría formado por átomos de hidrógeno, el oxígeno por átomos de oxígeno y el cobre por átomos de cobre) y que todos los compuestos eran moleculares. De acuerdo con la regla de mayor simplicidad, el agua estaría constituida por moléculas HO, formadas por la unión de un átomo de hidrógeno y uno de oxígeno. En este modelo el término elemento es usado con el significado de sustancia elemental, si bien, como se supone que todos los elementos son atómicos, los conceptos de “áto-

mo” y “elemento” quedan asociados. Del mismo modo quedan asociados los conceptos de “molécula” y “compuesto”.

Así pues el modelo de Dalton favorece dos tipos de concepciones alternativas, que conviene evitar modificando el modelo inmediatamente después de su proposición como primera hipótesis. Estas concepciones alternativas son:

- Las sustancias elementales están *siempre* formadas por átomos.

- Los compuestos están *siempre* formados por moléculas.

La tendencia de los estudiantes a asociar “elemento” (en el sentido de sustancia elemental) con “átomo” y “compuesto” con “molécula” es conocida desde hace años (Caamaño y otros, 1983; Caamaño 1994) y ha sido confirmada en múltiples estudios posteriores (Taber 2001; Stains y Talanquer, 2007, p. 658). Probablemente en la asociación entre “compuesto” y “molécula” influye también la tradición didáctica de introducir prematuramente la representación simbólica de la composición atómica de los compuestos mediante fórmulas químicas, antes de representar y diferenciar las estructuras moleculares y la estructuras gigantes con diagramas y modelos atómico-moleculares. De este modo, si HCl o CO₂ son la fórmula de moléculas, no es de extrañar que NaCl y SiO₂, en ausencia de un nombre específico para designar las entidades que representan, sean conceptualizadas también como fórmulas de moléculas. La costumbre de no usar un término específico para designar la entidad material submicroscópica representada por las fórmulas NaCl o SiO₂, que muchas veces son simplemente leídas -“ene-a-ce-ele” y “ese-i-o-dos”-, agrava pues el problema. Es, por tanto, muy aconsejable el uso del término “unidad-fórmula” para referirnos a las entidades NaCl y SiO₂ de las estructuras gigantes del cloruro de sodio y del dióxido de silicio.

Para evitar la aparición de estas concepciones alternativas, es conveniente, tan pronto se haya establecido la hipótesis inicial daltoniana, introducir las otras formas estructurales en las que se pueden presentar las sustancias elementales y los compuestos. Se trata de modificar el

modelo atómico-molecular daltoniano incorporando las siguientes hipótesis:

– Las *sustancias elementales no metálicas* están formadas por moléculas de átomos iguales (por ejemplo, H₂, O₂, N₂, Cl₂, I₂, P₄, S₈, etc.) a excepción de los gases nobles que son atómicos (He, Ne, etc.).

– Los *compuestos* pueden estar formados, además de por *moléculas*, por *estructuras gigantes*. Las estructuras gigantes son estructuras formadas por átomos unidos fuertemente entre sí de manera ininterrumpida. Esta es la estructura de los compuestos iónicos y de los compuestos atómicos covalentes.

– Las *sustancias elementales metálicas* están formadas por estructuras gigantes atómicas metálicas y las *sustancias elementales semimetálicas* como el carbono (grafito) y el silicio por estructuras gigantes atómicas covalentes.

La forma de modelizar y contrastar experimentalmente las hipótesis sobre la estructura de cada uno de estos tipos de sustancias queda fuera del alcance de este artículo, pero es interesante comentar la potencialidad del concepto de *estructura gigante*, que engloba los tres tipos de estructura gigante –metálica, iónica y covalente– y permite modelizar inicialmente la estructura de las sustancias en dos únicas categorías, moleculares o estructuras gigantes (Caamaño 1998b). La forma de diferenciar experimentalmente a ambas es enormemente simple. Las sustancias moleculares a temperatura ambiente son gases, líquidas o sólidos de baja temperatura de fusión. Las sustancias con estructura gigante son siempre sólidos de alta temperatura de fusión. Los estudiantes, pueden así predecir fácilmente, que cualquier sustancia que sea gaseosa a temperatura ambiente será molecular (incluyendo en esta categoría a los gases nobles, aunque sean monoatómicos).

La polisemia del término elemento químico

El término elemento químico se utiliza a veces para designar una sustancia elemental y otras veces para designar el tipo de átomo que

forma esta sustancia elemental (Fernández 1999; Khanfoou-Armalé y Le Marechal, 2008). Cuando se dice que el agua está formada por los elementos hidrógeno y oxígeno, es evidente que nos estamos refiriendo a los átomos de hidrógeno y de oxígeno, y no al hidrógeno gas y al oxígeno gas. Sin embargo, en otras ocasiones podemos referirnos al hidrógeno y al oxígeno como elementos químicos. Esta polisemia del término elemento da lugar a evidentes confusiones (Caamaño 1998a), que podrían ser evitadas si se utilizara “sustancia elemental” en el nivel macroscópico y se reservará la palabra “elemento” para significar “átomos del mismo tipo” en el nivel submicroscópico. Si bien, el elemento no es únicamente el átomo, puesto que puede ser también el ion. De hecho el concepto engloba todo tipo de partículas que tenga el mismo número atómico.

En conclusión

La propuesta didáctica que hemos presentado para construir los conceptos de sustancia elemental, compuesto y elemento químico parte de una modelización a nivel macroscópico, mediante una serie de investigaciones experimentales sobre el comportamiento de diferentes sustancias frente al calentamiento y el paso de la corriente eléctrica. Inmediatamente se prosigue con una modelización submicroscópica que parte del modelo atómico-molecular daltoniano, pero lo modifica rápidamente en dos aspectos esenciales: el carácter molecular de muchas sustancias elementales y el carácter de estructura gigante de muchos compuestos y sustancias elementales. En las actividades investigativas propuestas se presta una atención especial a la discusión de las ideas de los estudiantes, a la planificación del procedimiento experimental para aportar evidencias y a las interpretaciones de las experiencias, así como al significado de los términos y las representaciones utilizadas, como medio de evitar o superar una serie de concepciones alternativas.

REFERENCIAS

- AZCONA, R.; FURIÓ, C.; INTXAUSTI, S. y ÁLVAREZ, A. (2004). ¿Es posible aprender los cambios químicos sin comprender qué es una sustancia química? *Alambique*, 40, 7-17.
- BORSESE, A. y ESTEBAN, S. (1998). Los cambios químicos de la materia: ¿deben presentarse diferenciados en químicos y físicos? *Alambique*, 17, 85-92.
- CAAMAÑO, A. (1994). "Concepcions dels alumnes sobre l'estructura de la matèria i del canvi químic. Comprensió de les formes simbòliques de representació". Tesis doctoral no publicada. Facultat de Química. Universitat de Barcelona.
- CAAMAÑO, A. (1998a). Problemas con el aprendizaje de la terminología científica. *Alambique*, 17, 5-10.
- CAAMAÑO, A. (1998b). Materia y materiales en la enseñanza secundaria. Los niveles estructurales de la materia. *Aula de Innovación Educativa*, 69, 6-12.
- CAAMAÑO, A. (2005). Trabajos prácticos investigativos en química en relación con el modelo atómico-molecular de la materia, planificados mediante un diálogo estructurado entre profesor y estudiantes. *Educación Química*, 16 (1), 10-19.
- CAAMAÑO, A. (2011). Enseñar química mediante la contextualización, la indagación y la modelización. *Alambique*, 69, 21-34.
- CAAMAÑO, A. y COROMINAS, J. (2004). ¿Cómo abordar con los estudiantes la planificación de trabajos prácticos investigativos? *Alambique*, 39, 52-63.
- CAAMAÑO, A. y CUADROS, J. (2011). Cuestiones didácticas en torno a los conceptos de sustancia química y de reacción química. Comunicación presentada en las *IV Jornadas de Enseñanza de la Química*. Asociación Nacional de Químicos. Barcelona. Noviembre 2011.
- CAAMAÑO, A.; MAYÓS, C.; MAESTRE, G. y VENTURA, T. (1983). Consideraciones sobre algunos errores conceptuales en el aprendizaje de la química en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, 1 (3), 198-200.
- CAAMAÑO, A.; OBACH, D. y PÉREZ-RENDÓN, E. (2007a). *Física y Química. Ciencias de la Naturaleza. 3 ESO*, cap. 6: Descomposición y síntesis de sustancias. Barcelona: Teide.
- CAAMAÑO, A., OBACH, D. y PÉREZ-RENDÓN, E. (2007b). *Física y Química. Ciencias de la Naturaleza. 3 ESO. Cuaderno de Actividades*, cap. 6. Barcelona: Teide.
- CHANDRASEGARAN, A. L. y TREAGUST, D. F. (2009). Emphasizing Multiple Levels of Representation to Enhance Students' Understandings of the Changes Occurring during Chemical Reactions. *Journal of Chemical Education*, 86 (12), 1.433-1.436.
- COKELEZ, A.; DUMNO, A. y TABER, K.S. (2008). Upper Secondary French Students, Chemical Transformations and the "Register of Models": A cross-sectional study. *International Journal of Science Education*, 30(6), 807-836.
- FERNÁNDEZ, M. (1999). Elementos frente a átomos. Raíces históricas e implicaciones didácticas. *Alambique*, 21, 59-66.
- FURIÓ-MAS, C. Y DOMÍNGUEZ-SALES, 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.
- GRUP RECERCA-FARADAY (1990). *Química Faraday*, cap. 4: Elementos y compuestos, cap. 5: Naturaleza atómica de la materia. Barcelona: Teide.
- JOHNSON, P. (2000). Children's Understanding of Substances, Part 1: Recognizing Chemical Change. *International Journal of Science Education*, 22 (7), 719-737.
- JOHNSON, P. (2000b). Developing students' understanding of chemical change: what should be teaching? *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 1(1), 77-90.
- JOHNSON, P. (2002a). Children's Understanding of Substances, Part 2: Explaining Chemical Change. *International Journal of Science Education*, 24(10), 1037-1054.
- KHANFOUR-ARMALÉ, R. y LE MARECHAL, J. F. (2008). Construire une catégorie grâce à une analogie: cas du concept d'élément chimique. *Didaskalia*, 32, 117-157.
- MARTÍN DEL POZO, R. (1998). La construcción didáctica del cambio químico. *Alambique*, 17, 65-75.
- NAHUM, L. T.; MAMLOK-NAAMAN, R.; HOFSTEIN, A. y KRONIK, L. (2008). A New "Bottom-Up" Framework for Teaching Chemical Bonding. *Journal of Chemical Education*, 85:12, 1.680-1.685.

- SÁNCHEZ, G. y VALCÁRCEL, M^a V. (2003). Los modelos en la enseñanza de la química: concepto de sustancia pura. *Alambique*, 35, 45-52.
- SOLSONA, N. e IZQUIERDO, M. (1998). La conservación del elemento, una idea inexistente en el alumnado de secundaria. *Alambique*, 17, 76-84.
- SOSA, P. y MÉNDEZ, N. (2011). El problema del lenguaje en la enseñanza de los conceptos compuesto, elemento y mezcla. *Educació Química EduQ*, 8, 44-58.
- STAINS, M. y TALANQUER, V. (2007). Classification of Chemical Substances using Particulate Representations of Matter: An analysis of student thinking. *International Journal of Science Education*, 29: 5, 643-661.
- TABER, K. S. (2001). Building the structural concepts of chemistry: some considerations from educational research. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 2: 2, 123-158.
- TSAPARLIS, G.; KOLIOULIS, D. y PAPPA, E. (2010). Lower-secondary introductory chemistry course: a novel approach based on science-education theories, with emphasis on the macroscopic approach, and the delayed meaningful teaching of the concepts of molecule and atom. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 11:2, 107-117.
- VOGELEZANG, M. J. (1987). Development of the concept "chemical substance": some thoughts and arguments. *International Journal of Science Education*, 9:5, 519-528.

ABSTRACT

Basic chemicals and chemical compounds. A didactic approach with a focus on research and modelling macroscopic and sub microscopic levels.

The differentiation between elementary substance and compound is a key step in building the concept of chemical element and atomic-molecular theory of matter. The didactic approach proposed in this paper to deal with these concepts is to put together an experimental indagatory approach with a modelling process in the macroscopic and submicroscopic levels, in order to teach the basic concepts of chemistry combining inquiry, modelling and experimentation.

KEYWORDS: *Elementary substance; Compound; Chemical element; Inquiry; Modelling.*

RÉSUMÉ

Produits chimiques de base et composés chimiques. Une approche didactique avec un accent sur la recherche et la modélisation scolaire des niveaux macroscopique et su microscopiques.

La distinction entre les substances élémentaires (corps simples) et les corps composés est une étape cruciale dans la construction de la notion d'élément chimique et de la théorie atomique-moléculaire de la matière. L'approche didactique que nous proposons dans cet article pour construire ces concepts est de rassembler une approche expérimentale investigative avec un processus de modélisation dans les niveaux macroscopique et submicroscopique, en ligne d'un enseignement des concepts basiques de la chimie qu'intègrent la investigation, la modélisation et l'expérimentation.

MOTS CLÉ: *Corps simple; Compost; Élément chimique; Investigation; Modélisation.*