

Dificultades conceptuales y epistemológicas en el aprendizaje de los procesos químicos

Carlos Furió* y Cristina Furió**

1. Introducción

La línea de investigación sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en temas de Ciencia ha sido, desde hace más de 20 años, el eje medular del cuerpo teórico de conocimientos que hoy llamamos Didáctica de las Ciencias. Se dispone de mucha información sobre las ideas, preconcepciones o concepciones alternativas como puede apreciarse en la literatura didáctica. Y aunque, como indica Duit (1993), el dominio en el que más se ha investigado es en el de la Física, también hay un 18% de los más de 3,000 artículos referenciados por aquellos autores a los que podemos acudir en el campo de la enseñanza-aprendizaje de la Química (Furió, 1996). No solamente podemos dirigirnos a las revistas especializadas en Didáctica de las Ciencias, sino que también hay capítulos enteros dedicados a las concepciones alternativas en manuales recientes que se han esforzado en presentar síntesis de investigaciones realizadas en este ámbito (Gabel, 1994; Fraser y Tobin, 1998). Nosotros limitaremos el objeto de este trabajo a la presentación de los principales obstáculos que se han detectado en el aprendizaje de las reacciones químicas a nivel cualitativo y de los que hay abundante literatura.

El exceso de información sobre esta temática genera también un problema, que consiste en cómo organizar y presentar aquellas concepciones alternativas y dificultades derivadas sin que se convierta en una lista de preconcepciones sin hilación donde el lector puede perderse fácilmente. A tal efecto, dividiremos el contenido de este artículo en varios apartados que vayan de lo general a lo particular. En primer lugar, se presenta una panorámica de las *características generales del pensamiento discente espontáneo* que muestre cómo “ven” el mundo natural los adolescentes y qué tipos de razonamientos espontáneos emplean en sus interpretaciones (apartado 2). En segundo lugar, se exponen las principales dificultades de los estudiantes en algunos prerrequisitos conceptuales básicos para poder comprender las reacciones químicas, tales como las relativas a la naturaleza corpuscular de la materia (3) y a los conceptos de sustancia (4) y de compuesto químico (5). Finalmente, se aborda cómo modelizan los alumnos la reacción química (6). En cada uno de estos apartados se revisará la bibliografía referente tanto a las dificultades encontradas en el nivel macroscópico de

descripción de los cambios químicos como en el primer nivel de explicación microscópica que conocemos como teoría atómica clásica.

2. ¿Cómo ven y razonan los estudiantes el mundo natural que les rodea?

A título de hipótesis y como intento de explicar de manera general los orígenes de las concepciones alternativas que tienen los alumnos sobre los fenómenos químicos podemos imaginar, en primer lugar, qué características generales posee la cultura experimental que los estudiantes traen consigo al aula (Bachelard, 1938). Aun aceptando de antemano que el pensamiento humano no está determinado sino que es evolutivo y adaptativo, se pueden avanzar algunos aspectos que la investigación está poniendo de relieve y que pueden facilitar la comprensión de algunas de las dificultades de aprendizaje con que nos podemos encontrar los profesores.

Una primera característica ontológica de la cultura cotidiana surge cuando se plantea la relación entre la Ciencia y la realidad. Más concretamente se observa cuando se pregunta a los estudiantes qué significa para ellos la realidad externa. Suele emerger *una visión realista ingenua* en la que se considera que cualquier “hecho real” es la imagen directa que detectan nuestros sentidos (Pozo y Gómez, 1998). Es decir, para los adolescentes la realidad del mundo natural coincide con las percepciones sensoriales del sujeto, que quedan registradas o impresas directamente en nuestra mente, sin tener en cuenta que dichas percepciones son filtradas *a priori* por lo que ya existe en ella (Johnstone *et al.*, 1994). Se comprende así que los adolescentes pongan en duda la materialidad de aquellos estados de la materia que sean difícilmente perceptibles, como veremos más adelante cuando analicemos las dificultades macroscópicas que para ellos plantea el estudio de los gases (no se ven, no se tocan, no “pesan”, etcétera). Tampoco es difícil derivar que gran parte de las generalizaciones erróneas que cometen los estudiantes, se basarán en la aplicación de aquella visión realista ingenua que poseen sobre el mundo natural al nivel microscópico de descripción de la materia. Es decir, para ellos el mundo de los átomos, moléculas, redes iónicas, etcétera, es el mismo mundo macroscópico de los materiales y las sustancias pero en diminuto. No comprenden que existen distintos niveles de descripción de la materia en íntima relación: *el nivel macroscópico* de las sustancias con sus propiedades y cambios y, por otra parte, *el nivel microscópico* de aquellas mismas sustancias que la Química modela a base de átomos,

* Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales. Universitat de València (España).

** Instituto de Enseñanza Secundaria de Silla (España).

iones o moléculas. Es con estas últimas entidades elementales (que, dicho sea de paso, tienen sus propias propiedades e interacciones) con las que intentamos explicar unitariamente la estructura de la materia y los cambios químicos que observamos en un mundo tan diverso como el que nos rodea.

Una segunda característica del pensamiento del estudiante se deriva de su integración en el medio social y cultural. Como ser social acepta las ideas que están asumidas en su cultura y, en particular, las transmitidas a través del lenguaje, cuyo significado forma parte de esa cultura cotidiana. A veces, estas ideas son aceptadas como evidencias de 'sentido común' a pesar de que han sido rebatidas por la ciencia hace siglos (la síntesis newtoniana, la teoría atómica, etcétera). Ello es síntoma de que la cultura científica todavía no ha llegado, lamentablemente, a integrarse en esa cultura popular. Estas ideas de sentido común se presentan como "naturales" en el sentido de que para los estudiantes siempre han estado ahí fuera, en la realidad externa, sin darnos cuenta de que muchas de ellas han sido construidas en paradigmas anteriores a los actuales. Así, por ejemplo, la idea de peso fue introducida antiguamente por los griegos para diferenciar la "materia corpórea" (sólidos y líquidos) de la materia "rara" (gases y vapores). El peso se definió como la tendencia de los cuerpos a ir hacia abajo, hacia las esferas terrestre y acuosa, que eran el lugar natural de los objetos cuya composición tenía mayor proporción de los elementos tierra y agua (*los cuerpos "graves" o pesados*). Esta idea todavía está vigente y hace que, por ejemplo, los medios de comunicación e incluso algunos libros de texto incurran en errores conceptuales al comentar la falta de peso (ingravedez) de los astronautas de una nave espacial por el simple hecho de estar flotando en el interior de la cápsula situada a unos pocos centenares de kilómetros de la Tierra. Esta idea de peso es diferente al concepto newtoniano de "peso" como fuerza realizada por la Tierra sobre la masa de cada astronauta. ¿Cómo podemos creer, hoy, que a unos 500 km del planeta no hay campo gravitatorio terrestre! Esta asociación entre la idea de flotación y la de falta de peso se extrapola a otros dominios y lleva a inferir que en aquellos cambios físicos o químicos donde desaparece perceptiblemente masa de materia condensada (sólidos y líquidos) y se forman gases, no se conservará el peso (que para los estudiantes es lo mismo que la masa), como veremos en el siguiente apartado.

En resumen, la percepción de cualquier fenómeno será filtrada ontológica y conceptualmente por el estudiante, basándose no sólo en su experiencia física, sino también en la cultura y lenguaje cotidianos. Este filtro conceptual de la percepción puede explicar muchas de las dificultades y obstáculos epistemológicos comentados en la literatura (Llorens, 1994). Por ejemplo, cuando el profesor muestre un fenómeno químico como la calcinación del magnesio en el

que se observan varios estímulos el alumno seleccionará los que le parezcan más relevantes a la hora de interpretar este hecho (Kempa & Ward, 1988).

Para algunos autores la existencia y persistencia de estas concepciones alternativas vendrían originadas por las *formas de razonar* (componentes epistemológica y metodológica del pensamiento) en el quehacer cotidiano. Esto es, estarían basadas en el uso de razonamientos espontáneos como la "metodología de la superficialidad" (Gil *et al.*, 1991) o el "causalismo simple" (Andersson, 1990). La *metodología del sentido común* o de la superficialidad se caracteriza por la rapidez en extraer conclusiones o generalizaciones a partir de unas pocas observaciones cualitativas poco rigurosas, o en aceptar como verdades absolutas evidencias de sentido común asumidas en la cultura cotidiana. Esta impulsividad en esta forma de pensar se opone a una concepción hipotética del conocimiento científico y a la reflexión necesarias para poner en cuestión las evidencias de sentido común. Aceptar que cualquier conocimiento es hipotético significa ponerlo en duda y someterlo a prueba bien mediante experimentos bien mediante el análisis de su coherencia con otras ideas aceptadas en el cuerpo teórico de conocimientos en el que se ha construido. Muchas veces, esta impulsividad o falta de reflexión metodológica conduce, a la hora de explicar fenómenos naturales, a la búsqueda de soluciones basadas en *relaciones causales simples*, inspiradas en criterios poco rigurosos como, por ejemplo, la proximidad espacial, la concurrencia temporal o la semejanza entre el efecto y la causa (Pozo y Gómez, 1998).

Entre las formas de razonamiento espontáneo que ha detectado la investigación, y que pueden actuar como barreras epistemológicas y metodológicas, destacan *la fijación y la reducción funcionales*. La *fijación funcional* consiste en el aprendizaje memorístico de relaciones (conceptos y reglas) que impiden la reflexión y el pensamiento creativo ante situaciones reconocidas por el sujeto cognitivo. Así, por ejemplo, cuando se pregunta a los estudiantes de COU (17-18 años) cuál es la geometría de una molécula sencilla (XY_n), frecuentemente la deducen directamente a partir de la forma que tiene su estructura de Lewis. No se dan cuenta de que esta geometría se ha de deducir a partir de la distribución espacial de los pares enlazantes y libres de la capa de valencia del átomo central en la molécula (Furió y Calatayud, 1996). Otro tipo de razonamientos de "sentido común" es la *reducción funcional* (Viennot, 1996) que se presenta cuando en una situación problemática se tiene que analizar la influencia de varias variables (causas) sobre una función o variable dependiente (efecto). Es frecuente observar que el análisis se reduce a ver cómo influye una única variable en la función. Así, por ejemplo, esta reducción funcional se presenta cuando se considera que la entropía de un gas ideal solamente depende

del volumen del sistema, sin tener en cuenta que también pueden influir en aquella función de estado la temperatura (Candel *et al.*, 1984). Esta reducción funcional vendría a ser la falta de una destreza anterior a la de control de variables. Es decir, para poder efectuar un control de variables de las que depende una función es previo realizar el oportuno análisis funcional en el que se admite que varias causas (variables independientes) pueden actuar y producir un único efecto (variable dependiente o función). Por ejemplo, sabemos que la polaridad de las moléculas depende de dos variables: la geometría de la molécula y la polaridad de los enlaces entre cada átomo periférico y el central. Se ha observado que, en los estudiantes de Química, se dan los dos tipos posibles de reduccionismos funcionales (el geométrico o el de los enlaces) cuando sólo consideran que influye una de las dos variables indicadas (Furió y Calatayud, 1996). Otras formas de razonamiento de “sentido común” aparecen cuando el argumento explicativo empleado es complejo y se necesita establecer una sucesión de varias proposiciones en cadena para llegar a una conclusión lógica. La investigación ha detectado que es frecuente el uso de razonamientos en forma de secuencias lineales, basados en un análisis de contigüidad temporal o espacial, hecho paso a paso (causa-efecto) cuando, muchas veces, se requieren análisis holísticos de lo que ocurre en todo el sistema (argumentos sistémicos).

En resumen, para poder explicar el pensamiento discente espontáneo sobre el mundo natural, en general, hay que conocer las ideas de los alumnos sobre el fenómeno estudiado pero no solamente. Hay que ir más allá. Es importante conocer también cómo ‘ven’ el fenómeno (componente ontológica de su pensamiento) y cómo relacionan estas ideas al razonar (componentes epistemológica y metodológica). Esta epistemología discente deberá considerarse como un cuerpo preteórico de conocimientos que podemos tomar como paradigmático en los estudiantes y que, por supuesto, hay que valorar positivamente. Se ha de tener en cuenta que el alumnado va a tener que construir los nuevos conocimientos a partir de los que ya posee (Carretero y Limón, 1996).

3. Principales dificultades de aprendizaje en la naturaleza corpuscular de la materia

Como se ha indicado anteriormente, hay muchos trabajos sobre las dificultades de los estudiantes en la naturaleza corpuscular de la materia, pero pocos son los que han organizado la literatura existente. Siguiendo lo indicado por Gabel (1998), las principales dificultades que se presentan en la comprensión del complejo mundo de la Química pueden deberse a incomprendiones en las interpretaciones macroscópica y/o microscópica de los fenómenos químicos y, también, a la falta de relaciones entre estos dos niveles de interpretación de la materia. Esta doble interpretación de los

fenómenos químicos ha sido señalada por la bibliografía como fuente de obstáculos subyacentes en las dificultades que se presentan en la enseñanza de la Química, no sólo en la enseñanza secundaria, sino también en la Universidad. Así, por ejemplo, Barlet *et al.* (1997) han mostrado los obstáculos ligados a la dualidad macro-micro en el aprendizaje de cuatro campos específicos de la química (mecanismos de reacción, estereoisomería, estabilidad y reactividad química, y la presión y el volumen en gases), al tiempo que señalan cómo estos obstáculos están originados por la persistencia de concepciones de “sentido común” y la ausencia de “consciencia microscópica”, en el sentido de que el alumnado no utiliza la teoría cinética de la materia en la interpretación de aspectos macroscópicos. Estas dificultades aumentan, como es lógico, en estudiantes de Secundaria que inician sus estudios de Química. Fensham (1992) indica que, después de enseñar la naturaleza corpuscular de la materia en cursos introductorios de Química, el alumnado no sabe utilizarla, en particular cuándo han de aplicarla al explicar las propiedades de los gases.

Las dificultades macroscópicas de los estudiantes respecto a las propiedades de los gases han sido bien investigadas. En un trabajo con estudiantes de edades comprendidas entre los 12 y los 18 años, para averiguar cómo conciben los gases, Furió, Hernández y Harris (1987) han mostrado que, porcentajes muy elevados del alumnado —que van desde un 90% a los 12 años, hasta un 50% en alumnos de COU—, que han estudiado Química durante 3 años mantienen concepciones alternativas persistentes sobre los gases, derivadas de la experiencia física y de la cultura popular. Estos modelos mentales alternativos conciben al gas como algo sustancial con muy poco estatus material debido a que es poco “corpóreo” y no se percibe. La idea de su poca materialidad (“apenas tienen masa y/o peso”) viene reforzada por la observación de que habitualmente flota. Se comprende, pues, que los estudiantes jóvenes sí acepten la existencia de los gases, y del aire en particular, cuando perciben alguno de sus acciones o efectos en situaciones dinámicas (por ejemplo, cuando hay viento) y difícilmente lo hagan en situaciones estáticas, a no ser que se perciban algunas de sus propiedades, como el color o el olor. Normalmente, en este modelo mental se comprueba coherentemente que el gas ejerce presión hacia arriba y se comprende que no se acepte la existencia de la presión atmosférica, ya que “no se nota”. A título de ejemplo, cuando se preguntó a un grupo de alumnos de segundo de Magisterio por qué no caía el agua del interior de una botella invertida en un recipiente abierto y lleno de líquido, solamente cinco de los 33 alumnos encuestados aportó ideas cercanas a admitir que la presión atmosférica externa era la que impedía la caída (Hernández 1997).

En este mismo sentido, la investigación ha mostrado que la idea de que el aire tiene oxígeno es aceptada por los estudiantes en situaciones antropocéntricas (cuando se relaciona con la salud de las personas, como por ejemplo en la respiración, la nutrición de seres vivos, etcétera) pero no en otras situaciones más contextualizadas en el estudio de la Química, como combustiones de materiales orgánicos, oxidación de metales, etcétera. Por ejemplo, en el caso de la combustión de la gasolina, es bien conocida la cuestión en la que se preguntó a alumnos ingleses de 16 años, cuál era el peso de los gases de escape producidos al quemar los 30 kg de gasolina del depósito de un coche. La mayoría de los alumnos respondió que los gases pesarían menos de 30 kg, basándose en que el líquido se convertía en gas y, por tanto, se perdía peso. Otros indicaban que pesarían lo mismo y lo razonaban directamente mediante la aplicación del principio de conservación de la masa, sin tener en cuenta al oxígeno como reactivo.

Como una muestra más de las dificultades que se presentan respecto a la *conservación de la masa en una reacción química* y cómo las respuestas de los estudiantes están condicionadas por la percepción que éstos tienen acerca de lo que ocurre en los procesos físicos y químicos cuando se forman o participan gases, se presentan los resultados obtenidos con una muestra significativa de más de 1,000 estudiantes de EGB, BUP y COU (12 a 18 años) en un cuestionario de cinco ítems. Las preguntas se diseñaron de manera que presentaban un gradiente perceptivo en la desaparición de materia corpórea (sólidos o líquidos) por formación de gases (figura 1). Así, por ejemplo, el ítem 2 se refería a la predicción del peso de un recipiente hermético donde un líquido se había vaporizado totalmente, mientras en el ítem 5 se preguntaba lo mismo, pero referido a la disolución de un poco de azúcar en agua (la prueba conservativa de Piaget) donde no intervienen gases. Las situaciones de los ítems 6, 7 y 8 eran intermedias y se referían, respectivamente, a la disolución de una aspirina efervescente en agua, a la oxidación de polvo de hierro y a la combustión de un papel, siempre en recipientes cerrados (Furió *et al.*, 1987; Hernández, 1997)

En cuanto a las dificultades microscópicas sobre el modelo corpuscular que tienen los estudiantes, también han sido bastante investigadas. De entrada, resaltar, como se decía anteriormente, que en la enseñanza se da escasa importancia a razonar las propiedades físicas o químicas mediante el modelo de partículas de la materia (Duschl, 1995). En un reciente trabajo (Domínguez *et al.*, 1998) se presenta un resumen de las ideas alternativas al modelo cinético de la materia como el que sigue:

- Los estudiantes atribuyen comportamiento macroscópico a las partículas (como ya se ha dicho antes). Así, por

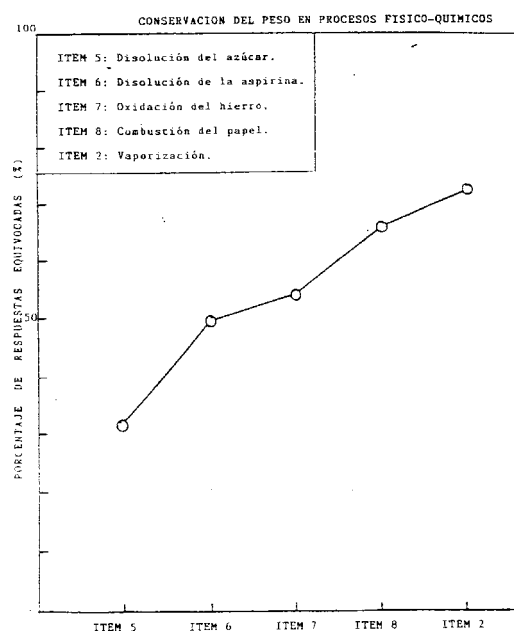


Figura 1. Resultados encontrados al encuestar 1198 estudiantes desde 7° EGB hasta Química de cou sobre la conservación del peso en procesos físico o químicos donde intervienen gases (Furió, Hernández y Harris, 1987).

- ejemplo, consideran que las partículas de la materia se pueden fundir, evaporar, disolver, contraer, dilatar, tienen color, etcétera.
- Los estudiantes difícilmente aceptan la idea de que no exista “algo” entre las partículas. A veces, indican que entre las partículas de un gas hay aire.
- Coherentemente con el modelo corpuscular de sólido sin huecos abundan concepciones estáticas de la materia. Piensan que, habitualmente, las partículas están en reposo o, en todo caso, dejan de moverse cuando se enfrían.

En resumen, mientras los gases no sean considerados macroscópicamente como cuerpos tan materiales (con masa, volumen, densidad, presión, etcétera) como los sólidos y líquidos que pueden interactuar sustancialmente, es lógico que los estudiantes tengan dificultades en la comprensión de los cambios químicos (Hesse y Anderson 1992) y en la aceptación de la ley de la conservación de la masa en estos procesos (Furió *et al.*, 1987; Stavy, 1990). Parece que la idea predominante en su modelo de materia fuera la de un sólido formado por partículas que lo llenan todo, modelo que se extrapola a líquidos y gases. Esta idea nos recuerda la hipótesis de “horror al vacío” que se aceptaba antiguamente para explicar por qué no cae el agua de la botella invertida, hipótesis aceptada como evidencia de “sentido común” y

que era la hegemónica hasta que se puso en cuestión con la hipótesis del “mar de aire” de Torricelli y Pascal. Pero, en coherencia con sus visiones ontológica y empirista sobre el mundo natural, no parecen tan persistentes y estables estos modelos mentales de los estudiantes sobre la estructura corpuscular de la materia. Finalmente, la investigación ha puesto claramente de manifiesto que los alumnos no establecen relaciones entre los aspectos macroscópicos y los microscópicos cuando hay que explicar la materia y sus propiedades.

4. Sobre el concepto estructurante de sustancia

En el supuesto de que los estudiantes hayan vencido las dificultades que se presentan en la aceptación macroscópica de los gases como materiales que intervienen en los procesos, hay otro gran grupo de obstáculos que pueden dificultar la comprensión de los cambios químicos. Nos referimos a los problemas relativos a los conceptos de *sustancia química* y de *compuesto químico*, que son prerrequisitos conceptuales necesarios para pasar después a conceptualizar cambio químico y poder diferenciarlo de cambio físico. Como indica Llorens (1994), los estudiantes que se inician en la Química tienen “dificultades para adquirir el concepto de sustancia pura y su capacidad de conceptualización llegará, en todo caso, a la noción de material (madera, aire, etc) como toda aquella clase de materia caracterizada por algún rasgo relacionado con su utilidad o con algún fenómeno especialmente relevante para los alumnos, tal vez como una especie de “agente portador” de una propiedad: una especie de principio que muchas veces representa la *sustancialización de una propiedad* (Sanmartí 1990). No es de extrañar, por tanto, que agua y hielo, o el aluminio de una pieza y el aluminio en polvo, por citar algunos ejemplos, se consideren como sustancias distintas”.

A nuestro entender, la cuestión radica fundamentalmente en que la enseñanza no tiene en cuenta los significados que los alumnos dan a estas palabras, significados que son hegemónicos en su contexto cultural. Así por ejemplo, el *concepto macroscópico de sustancia química* que emplean los estudiantes es sinónimo del de *material*, y es el aceptado mayoritariamente en el propio contexto cultural cotidiano del estudiante. La enseñanza de la Química hace muy poco por establecer las diferencias macroscópicas entre lo que es una sustancia y cualquier material o producto observable (papel, tiza, lápiz, etcétera) que, en general, representan para el químico mezclas de sustancias. En la vida corriente, *todos los materiales, productos o sustancias son considerados como mezclas de elementos*. De ahí se deriva que *los elementos, últimos componentes de cualquier material, para el alumnado sean, paradójicamente, las sustancias puras* (Pozo y Gómez, 1998). Esta visión ontológica de la materia tiene grandes similitudes con la asumida por la filosofía natural griega, si bien, a los cuatro elementos terrestres griegos (tierra, agua, aire y fuego) se les

daba connotaciones metafísicas y, por tanto, no tenían existencia real. Esto es, los elementos eran considerados sustancias abstractas que representaban materialmente a una o dos propiedades (Solsona e Izquierdo, 1998). Actualmente, los estudiantes y la enseñanza relativizan el concepto de sustancia y dan mayor importancia a la clasificación de los materiales en mezclas más o menos íntimas. Parece que prevalece como problema estructurante el de las mezclas en cuya clasificación (homogéneas y heterogéneas) se usa como criterio el de la percepción u observación.

También, se plantearán los estudiantes el problema del reconocimiento o caracterización de los materiales (mezclas) y, para ello, emplearán alguna de las propiedades cualitativas observables que les resulten más relevantes (color, olor, sabor, origen natural o artificial, utilidad, etcétera). En este contexto se ha señalado que los estudiantes de EGB (12/13 años) suelen emplear explicaciones sustancializadoras de las propiedades (semejantes a las que se dieron a lo largo de la historia), atribuyendo a esta causa las dificultades que tienen para diferenciar entre los conceptos de mezcla y compuesto (Sanmartí, 1990; Sanmartí e Izquierdo 1995). Los alumnos consideran al material o a la sustancia como ‘portadora’ de propiedades específicas perceptibles. No es de extrañar que utilicen como principal criterio para saber si en un cambio se conserva o no el material, lo que ocurre con la propiedad específica en la que se han fijado. Así por ejemplo, se puede comprender que al añadir ácido nítrico a un hilo rojo de cobre y preguntar qué ha pasado con el cobre, indiquen que está en los gases rojizos que se desprenden en el proceso. Es decir, estos alumnos son conservativos de la propiedad ‘color rojo’ que atribuyen específicamente al cobre y, por ello, hacen un seguimiento fijándose en qué producto tiene la propiedad que permite caracterizar al cobre. En este mismo sentido, no se debe olvidar que famosos psicólogos como Piaget han utilizado también la conservación de una propiedad cualitativa para mostrar que existía un atomismo simple en el pensamiento de los niños de 8 a 10 años. En efecto, una de las pruebas empleadas en las entrevistas clínicas piagetianas consistía en diagnosticar la conservación del azúcar preguntando a los niños y niñas qué había pasado con la sustancia al disolverla en agua y desaparecer de su vista. Unos indicaban que desaparecía mientras otros, los conservativos de la sustancia, señalaban que el azúcar seguía estando allí en forma de pequeños granitos aunque no se vieran. Estos últimos argumentaban que la disolución también estaba dulce como el azúcar inicial. Es decir, la prueba de la conservación del azúcar en el proceso se basaba en admitir la ‘conservación de la dulzura’ en el producto obtenido (la disolución). No obstante, se hubiera llegado a una conclusión errónea si en lugar de tomar azúcar y disolverlo, se calentara por ejemplo un poco de clorato potásico hasta descompo-

nerlo y quedara un residuo de cloruro potásico. Los niños concluirían equivocadamente que la sustancia inicial no se conserva al comprobar que el polvo blanco inicial también era salado como el del KCl obtenido.

La dificultad principal no estaría, por tanto, en que los estudiantes tomen como criterio para decidir si ha habido cambio sustancial el de la no permanencia de las propiedades de la sustancia. De hecho, la definición operacional (macroscópica) de sustancia reside precisamente en que ésta tiene un conjunto de propiedades específicas que permiten su caracterización. El error metodológico estaría en extraer conclusiones a partir de la conservación de una única propiedad cualitativa no muy específica como, por ejemplo, el sabor, el color o el aspecto. Y éste parece ser el criterio superficial que siguen los estudiantes de Química cuando se les pregunta si ha habido cambio químico en experimentos no conocidos por ellos como, por ejemplo, la fusión de polvo amarillo de azufre al convertirse en un líquido rojizo que sigue siendo la misma sustancia. La contestación mayoritaria comprobada en alumnos de 3° de BUP y de Química de COU (un 50%) es que se trata de una reacción química debido al cambio de color (Furió, Bullejos y de Manuel, 1994). Por el contrario, el criterio científico a seguir se basaría en la caracterización macroscópica de las sustancias a partir de la contrastación de varias propiedades (no sólo una) y si, por necesidad, se ha de elegir una convendría seleccionar aquella que fuese más específica (p.e., un reactivo específico) y, a ser posible, más objetiva (por ejemplo, que se pueda medir instrumentalmente como la temperatura de fusión o de ebullición, la densidad, el índice de refracción, etcétera). Así por ejemplo, se puede plantear a un grupo de alumnos cómo saber si la naftalina (el naftaleno) y la parafina (mezcla de hidrocarburos saturados de alto peso molecular) son mezclas o sustancias. Los alumnos pueden proponer la observación del punto de fusión de cristales de cada una de las muestras para llegar a tener indicios racionales de una respuesta más fundamentada. Al hacerlo en el laboratorio observarán que la naftalina funde súbitamente a 80 °C mientras que la parafina tiene una banda de fusión que puede ir desde los 45 ° hasta los 65 °C según la composición de esta mezcla.

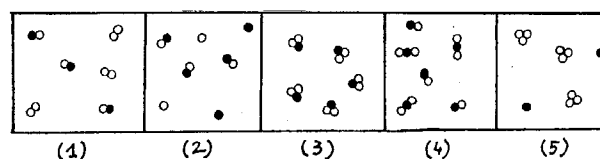
En resumen, un primer obstáculo a vencer por los estudiantes para comprender los cambios químicos consistirá en aprender significativamente el concepto macroscópico de sustancia química y saber diferenciarlo del de mezcla que es como se presentan la mayoría de los sistemas materiales o productos que manejamos en la vida ordinaria. Llegados a este punto conviene indicar que hay pocos trabajos de investigación sobre las visiones microscópicas que tienen los estudiantes sobre lo que es una sustancia en general. Hay algún artículo específico sobre cómo ven las moléculas de los ácidos (Nahkleh, 1992) en el que vuelven a aparecer

concepciones que se han dado en nuestro pasado histórico como, por ejemplo, que tienen aristas con las que se explica su actividad corrosiva (interpretación basada, como ya se vio en el apartado anterior, en la transferencia de las propiedades macroscópicas de la sustancia a las partículas). También se ha puesto de relieve en la literatura la ausencia de relaciones entre los perfiles macroscópico y microscópico del concepto de sustancia. No es de extrañar que cuando se hacen preguntas a estudiantes de Ciencias en Magisterio sobre el número de sustancias existente en sistemas materiales representados microscópicamente en forma de bolitas (figura 2), indiquen mayoritariamente que cada bolita corresponde a una sustancia distinta. Es decir, se desconoce la idea microscópica de sustancia como conjunto de muchísimas partículas todas iguales. Tal vez influya en ello el abuso de un formalismo memorístico donde se enfatiza la asociación entre fórmula y partícula en el uso de las ecuaciones químicas y como indica Johnstone (1993) no se relacionan explícitamente con el nivel macroscópico de las sustancias.

5. Sobre la idea de compuesto químico

Consecuencia lógica que se deriva de la falta de diferenciación del concepto macroscópico de sustancia que se ha indicado en el apartado anterior, es la gran dificultad con que se encuentran los estudiantes al considerar que *la mezcla (homogénea) de sustancias es lo mismo que el compuesto*. Así por ejemplo, se ha comprobado en grupos de estudiantes mejicanos de Bachillerato (17 a 19 años) que la mitad de ellos opinan que lo obtenido cuando se disuelven sustancias conocidas como cloruro sódico o azúcar en agua son compuestos. En este caso aluden, paradójicamente, a la conservación del sabor y al aumento del volumen (Valdez *et al.* 1998). Esta identificación entre mezcla y compuesto también se ha comprobado mayoritariamente (80%) en grupos de estu-

En el dibujo adjunto se han representado 5 sistemas químicos gaseosos que pueden tener una o varias sustancias. Cada bolita simboliza un átomo y las del mismo color representan átomos iguales. Indica cuántas sustancias hay en cada sistema material y explica el criterio utilizado.



Sistema (1): ; Sistema (2): ; Sistema (3):

Sistema (4): ; Sistema (5):

Explicación de los criterios utilizados:

Figura 2.

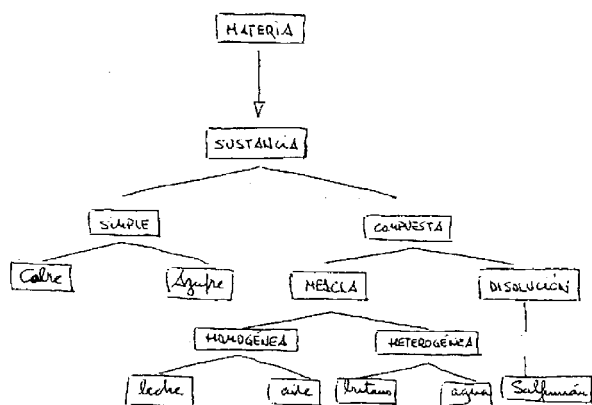


Figura 3. Mapa de conceptos básicos de Química realizado por un estudiante de Magisterio.

diantes de 2º de Magisterio (20-21 años) al proponerles la realización de un mapa conceptual con 15 palabras clave de Química. En la figura 3 se puede observar cómo el término 'compuesto' resulta más inclusor que el de 'mezcla'. Es decir, el concepto 'compuesto' se presenta por la casi totalidad de los estudiantes más general que el de mezcla, cuando desde el punto de vista químico debería ser al revés.

Al mismo tiempo puede observarse en el mapa conceptual del estudiante que los términos materia (para ellos más general) y sustancia son sinónimos como ya se indicó en el apartado anterior. Esta identificación ocurría en la casi totalidad de los mapas de la muestra de estudiantes.

Otra derivación de la idea de que todo se presenta mezclado y que han detectado Llorens (1994) y Sanmartí (1990), es el significado que dan algunos estudiantes a la expresión 'sustancia pura'. Para ellos las 'sustancias puras' son las sustancias 'sin mezclar', esto es los últimos componentes que conforman las mezclas o los compuestos y, por tanto, se asocian fácilmente con los elementos químicos. Vendrían a ser una especie de elementos aristotélicos (esencia de las mezclas más o menos íntimas) pero dándoles existencia real. Esta idea se ve reforzada cuando los profesores presentamos, en el perfil microscópico, a los elementos químicos como un sistema material formado por una clase de átomos iguales. Coherentemente las moléculas (bien sean de átomos iguales o diferentes, bien estén unidos o mezclados) son partículas complejas representativas de las mezclas o de las sustancias compuestas, bien como mezclas de elementos químicos o, peor aún, como mezclas de sustancias simples.

6. ¿Cómo modelizan los alumnos los cambios químicos?

De las características generales del pensamiento discente espontáneo, así como de las ideas y formas de razonamiento

que manejan los estudiantes sobre los conceptos de sustancia y compuesto químico tratados en los apartados anteriores, se pueden derivar la mayor parte de los modelos mentales que puede usar el alumnado para interpretar los cambios físicos y químicos que ocurren a nuestro alrededor.

En primer lugar, al no tener asimilado el concepto operacional (macroscópico) de sustancia como cuerpo caracterizado por tener un conjunto de propiedades específicas y, por el contrario, tener una idea ambigua donde se asocia la idea de material con la de sustancia, es de suponer que al preguntarles por la conservación o no de la sustancia en un cambio traten de concluir si es físico o químico empleando algún criterio superficial como es su caracterización a través de alguna propiedad cualitativa observable. Si en la pregunta solamente aparece una sustancia no conocida y no se presenta en el texto ningún rasgo característico de la misma, será difícil encontrar respuestas bien fundamentadas. Incluso cuando las sustancias utilizadas son conocidas por los estudiantes, es de esperar elevados índices de confusión, por ejemplo, al intentar clasificar los procesos en físicos y químicos. Por ejemplo, se ha mostrado que, en un 50%, el alumnado de BUP no sabe diferenciar entre la vaporización del alcohol o su combustión (Carbonell y Furió, 1987).

En el caso de que se aumente la complejidad del proceso, como por ejemplo que interaccionen dos sustancias poco conocidas (o que una de ellas sea un gas), se presentarán muchas más dificultades y una diversidad de interpretaciones. En efecto, según sea la 'selección perceptiva' que hagan los estudiantes de los estímulos observables que se presenten en el proceso, así será la interpretación que hagan. A este respecto, se comprende la variedad de modelos mentales alternativos sobre el cambio químico que detectó Andersson (1990) cuando encuestó a grandes muestras de estudiantes suecos de 12 a 16 años sobre lo que sucede cuando se quema la gasolina de un coche. Estos modelos se resumen a continuación:

- El cambio químico concebido como *desaparición de productos* donde muy pocos estudiantes hacen mención de los gases de escape.
- La reacción química imaginada como un *desplazamiento de materia*, donde los componentes del reaccionante desaparecen del material original y aparecen en otro lugar. Aparte de las combustiones de la gasolina o de la madera (en este caso sólo se quemaría o desplazarían los componentes combustibles de la madera), también se pone como ejemplo la disolución de azúcar en agua siempre que se obtenga una mezcla homogénea.
- Una tercera categoría de reacción química es la *modificación* en la que el material varía su apariencia pero sigue manteniendo su identidad. Cambia, sin embargo, alguna de sus propiedades iniciales (aspecto, color, etcétera).

- d) El proceso químico como *transmutación* del material donde se agrupan muchas subcategorías, como por ejemplo las sustancias se transforman en otras nuevas sin relación alguna con las originales, la conversión de la materia en energía o de energía en materia, etcétera. Suelen asociar esta idea con alguna analogía que han registrado en su memoria al observar algún suceso.
- e) Y finalmente la *reacción como interacción sustancial* próxima a la aceptada por el modelo atómico daltoniano. Llama la atención el autor en que solamente el 2% de las respuestas de la muestra total de alumnos se han clasificado en esta categoría.

También se indica que las respuestas dependen del tipo de pregunta y de la experiencia de los alumnos, si bien en la descripción general de la materia utilizan un modelo continuo, estático y sin vacío. En efecto, por nuestra parte se realizó una encuesta ante fenómeno con un grupo de 33 estudiantes de Química de Magisterio (edades entre 20 y 23 años) que confirmó la existencia de aquellas categorías de Anderson, si bien dada la edad y experiencia de los alumnos se constató una mayor riqueza de pensamiento (Hernández, 1997). La encuesta se llevó a cabo en un contexto de revisión de la teoría atómica que la mayoría ya había estudiado en cursos anteriores de Bachillerato y COU. El profesor calcinó una laminilla de metal gris brillante y lisa de Mg (4 cm) delante de toda la clase y solicitó que describieran individualmente y por escrito el cambio químico ocurrido, al tiempo que tenían que predecir cuál debería ser el peso de la cal obtenida en relación al peso del Mg original. Se buscó a propósito este experimento por la variedad de estímulos perceptivos que se dan en el fenómeno pues siguiendo lo indicado por Kempa y Wård (1988) los alumnos seleccionarían los que para ellos fueran más relevantes. Los estímulos observables que pueden presentarse son: 1) se aproxima una cerilla encendida hasta que el Mg empieza a arder; 2) aparece una espectacular llama con luz blanca deslumbrante; 3) la elevada temperatura del proceso hace que se formen humos de color blanco que puede ser parte del óxido formado; 4) pero la mayor parte del óxido queda en forma de laminilla blanca un poco arrugada que se presentó como la 'cal de magnesio'. Así por ejemplo, si el estudiante se fijaba en los sólidos inicial y final (estímulo 4) explicaba que se tenía el mismo magnesio pero había cambiado su color y aspecto (es decir, era una modificación, modelo c anterior). En cambio si a esta apreciación del cambio de aspecto del sólido se unían la de la llama (estímulo 2) y la formación de humos (estímulo 3), entonces se asociaba con la analogía de la combustión de la madera. En este caso se consideraba que la reacción química producida era un desplazamiento de los componentes del magnesio que se quemaban y forman el

humo (modelo b) y, al mismo tiempo, una modificación para la parte no quemada (cal). Estas interpretaciones se parecen a las dadas por la teoría del flogisto en cuanto a que relacionan analógicamente la calcinación del metal con la combustión de materiales orgánicos. También se describieron transmutaciones (modelo d) en las redacciones cuando era hegemónica la atención puesta en la formación de humo blanco, que alguno identificaba con el anhídrido carbónico, o cuando el estudiante se fijaba en la gran cantidad de energía producida. En este último caso se aplicaba inadecuadamente un principio de la conservación de la suma de masas y energía para concluir que el peso del magnesio era mayor que de la cal obtenida. Solamente dos estudiantes de aquella muestra dieron respuestas acordes con la interpretación química de lo que es una reacción.

7. Conclusiones

La conclusión que más resaltaríamos de esta breve panorámica que se ha ofrecido sobre los posibles obstáculos que pueden presentarse a los estudiantes que se inician en el estudio del mundo complejo de la química es la siguiente: aprender Química no es sencillo y, consecuentemente, su enseñanza tampoco lo es. Como bien indica Ausubel en su manual clásico sobre psicología cognitiva, es muy importante que el profesorado conozca cuáles son las ideas de los estudiantes sobre la temática que se intenta que aprendan para 'enseñarles en consecuencia'. Los avances logrados por la didáctica de las Ciencias como cuerpo teórico de conocimientos están mostrando que no sólo conviene conocer las ideas de los alumnos sino también hay que saber cómo razonan y aprenden para poder ayudarles a construir los conocimientos químicos.

En este trabajo se ha hecho una revisión de las dificultades conceptuales y epistemológicas de los estudiantes sobre los conceptos básicos (naturaleza corpuscular de la materia, sustancia y compuesto químico) cuya superación es necesaria para poder interpretar adecuadamente los procesos químicos. Hemos separado estas dificultades según pertenecieran al ámbito de descripción macroscópica de la materia o a su interpretación microscópica. Como señala la investigación, la enseñanza de la Química se preocupa en exceso de los aspectos simbólicos y teóricos olvidando los aspectos macroscópicos que se pretenden explicar. Por otra parte, conviene no superponer los niveles macroscópico y microscópico de interpretación de los procesos químicos y hacer que los alumnos los relacionen adecuadamente. Finalmente, indicar que en el trabajo se han primado conscientemente los aspectos cualitativos de los conceptos químicos mencionados dejando de lado los cuantitativos (por ejemplo, los cálculos estequiométricos) y aquellos otros conceptos y dominios de la Química de mayor complejidad (por ejem-

plo, la cantidad de sustancia y su unidad el mol, el equilibrio químico, etcétera) y de los cuales también hay literatura. ■

Referencias bibliográficas

- Andersson, B., Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, 18, 53-85, 1990.
- Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, París, 1938.
- Barlet, R. y Plouin, D., La dualité microscopique-macroscopique un obstacle sous-jacent aux difficultés en Chimie dans l'enseignement universitaire, *Aster*, 25, 143-174, 1997.
- Candel, A., Satoca, J. y Soler, J.B., Interpretación errónea del concepto de entropía, *Enseñanza de las Ciencias*, 2(3), 198-202, 1984.
- Carbonell, F. y Furió, C., Opiniones de los adolescentes respecto al cambio sustancial de las reacciones químicas, *Enseñanza de las Ciencias*, 5(1), 3-9, 1987.
- Carretero, M. y Limón, M., Problemas actuales del constructivismo. De la teoría a la práctica. En: Rodrigo M.J. y Arnay (Eds). *La construcción del conocimiento escolar. Ecos de un debate*. Auque, Buenos Aires, 1996.
- Domínguez, J.M., de Pro, A. y García-Rodeja, E., Las partículas de la materia y su utilización en el campo conceptual de calor y temperatura: un estudio transversal, *Enseñanza de las Ciencias*, 16(3), 461-475, 1998.
- Duit, R., Research on students' conceptions. Developments & trends. Paper presented at the "Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics", Cornell University, Ithaca, USA, 1993.
- Duschl, R., Más allá del conocimiento: los desafíos epistemológicos y sociales de la enseñanza mediante cambio conceptual, *Enseñanza de las Ciencias*, 13(1), 3-14, 1995.
- Fensham, P., Beginning to teach Chemistry. Comunicación presentada en *Content Pedagogy Writing Workshop*, Monash University Centre for Science, Mathematics and Technology, Melbourne (Australia), 1992.
- Fraser, B. y Tobin, K.G. (Eds), *International Handbook of Science Education*, Kluwer Academic Publishers, London, 1998.
- Furió, C., Las concepciones alternativas del alumnado en ciencias: dos décadas de investigación. Resultados y tendencias. *Alambique*, 7, 7-17, 1996.
- Furió, C., Bullejos, J. y De Manuel, E., L'apprentissage de la réaction chimique comme activité de recherche, *Aster*, 18, 141-164, 1994.
- Furió, C. y Calatayud, M.L., Difficulties with the geometry and polarity of molecules: beyond misconceptions, *Journal of Chemical Education*, 73, 37-41, 1996.
- Furió, C., Hernández, J. y Harris, Parallels between adolescents' conception of gases and the history of Chemistry, *Journal of Chemical Education*, 64(7), 617-618, 1987.
- Gabel, D.L. (ed), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, MacMillan Pub Co, N.Y., 1994.
- Gabel, D.L., The complexity of chemistry and implications for teaching. En B. Fraser y K. Tobin (ed.) *International Handbook of Science Education*, Kluwer, London, 1998.
- Gil D., Carrascosa, J., Furió, C. y Mtnez-Torregrosa, J., *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*, Horsori, Barcelona, 1991.
- Hernández, Dificultades de aprendizaje sobre la naturaleza corpuscular de la materia en la enseñanza secundaria. Una propuesta para superarlas. Tesis Doctoral. Universitat de València, 1997.
- Hesse, J.J. y Anderson, C.W., Students' conceptions of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(3), 277-299, 1992.
- Johnstone, A.H., The development of Chemistry teaching., *Journal of Chemical Education*, 70, 701-703, 1993.
- Johnstone, A.H., Sleet, R.J. y Vianna, J.F., An information processing model of learning: its application to an undergraduate laboratory course in Chemistry, *Studies in Higher Education*, 19, 77-87, 1994.
- Kempa, R.F y Ward, J.E, Observational threshold in school Chemistry, *International Journal of Science Education*, 10, 275-284, 1988.
- Llorens, J.A., *Comenzando a aprender Química. Ideas para el diseño curricular*, Ed. Visor, Madrid, 1991.
- Llorens, J.A., Introducción a los conceptos básicos de Química, en *Aspectos didácticos de Física y Química (Química 5)*, ICE de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1994.
- Nakhleh, M.B., Why some students don't learn Chemistry: chemical misconceptions, *Journal of Chemical Education*, 69, 191-196, 1992.
- Pozo, J.I. y Gomez, M.A., *Aprender y enseñar ciencia. Del conocimiento cotidiano al conocimiento científico*, Ediciones Morata S.L., Madrid, 1998.
- Sanmartí, N., Estudio sobre las dificultades de los estudiantes en la comprensión de la diferenciación entre los conceptos de mezcla y de compuesto. Tesis Doctoral. Lleida. Facultat de Ciències Químiques de la Universitat Autònoma de Barcelona, 1990.
- Sanmartí N. e Izquierdo M., The substantialisation of properties in pupils' thinking and in the history of science, *Science & Education*, 4, 349-369, 1995.
- Solsona N. e Izquierdo M., La conservación del elemento, una idea inexistente en el alumnado de Secundaria., *Alambique*, 17, 76-84, 1998.
- Stavy, R., Pupils' problems in understanding conservation of matter. *International Journal of Science Education*, 12(5), 501-512, 1990.
- Valdéz, S., Flores, F., Gallegos, L. y Herrera M^a.T. Ideas previas en estudiantes de Bachillerato sobre conceptos básicos de química vinculados al tema de disoluciones, *Educación Química*, 9(3), 155-162, 1998.
- Viennot, L., *Raisonnement en Physique. La part du sens commun*. De Boeck & Larcier S.A., Paris, Bruxelles, 1996.