

ENSEÑANZA DE LOS CONCEPTOS DE *CANTIDAD DE SUSTANCIA* Y DE *MOL* BASADA EN UN MODELO DE APRENDIZAJE COMO INVESTIGACIÓN ORIENTADA

FURIÓ, CARLES¹, AZCONA, RAFAEL² y GUIASOLA, JENARO³

¹Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valencia

²Instituto de Enseñanza Secundaria Talaia. Hondarribia. Guipúzcoa

³Departamento de Física Aplicada. Universidad del País Vasco

Resumen. Este trabajo trata del diseño y desarrollo de una investigación en el aula sobre la enseñanza de los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol*. Se fundamenta en una concepción constructivista del proceso de enseñanza-aprendizaje de la ciencia como investigación orientada. En este proceso se han tenido en cuenta los componentes conceptual, metodológico y actitudinal del aprendizaje y se han analizado las dificultades de los estudiantes al abordar el estudio del tema. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, en un contexto de enseñanza-aprendizaje como investigación orientada, los estudiantes son capaces de utilizar con comprensión conceptos de alto nivel de dificultad como los tratados.

Palabras clave. Enseñanza-aprendizaje como investigación orientada, educación secundaria, diseño didáctico, cantidad de sustancia, mol.

Teaching of the concepts «amount of substance» and mol based on a pattern of learning as oriented research

Summary. This study deals with the design and implementation of a research on the concepts of «amount of substance» and «mol». This work is grounded on a constructivistic conception of the learning of Sciences, more particularly on the model known as teaching-learning as oriented research. In accordance with this theoretical basis we have developed an empirical research framed within the teaching of Chemistry in High School. The developed designs have enabled us to assess the learning achieved by the students from a conceptual, procedural and attitudinal stance. According to our findings we could say that the materials developed and the way we have worked with them have contributed to a more significant learning and favoured a more positive attitude toward the teaching of the subject.

Keywords. Teaching-learning as oriented research, secondary education, didactic design, amount of substance, mol.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata del diseño y desarrollo de una investigación en el aula sobre la enseñanza de los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol*. Las dificultades de aprendizaje en torno al concepto de *mol* han sido puestas de manifiesto de forma reiterada por la investigación didáctica en las últimas décadas (Dierks, 1981; Furió et al., 2002), llegándose a afirmar que probablemente el concepto de *mol* es el más importante para los estudiantes de

primeros cursos de química en la educación secundaria y que su comprensión es requisito necesario para resolver problemas de estequiometría (Kolb, 1978).

Los estudios que tratan sobre las dificultades de enseñanza y aprendizaje del concepto de *mol* son mucho más numerosos que aquéllos que tratan sobre la magnitud *cantidad de sustancia* (Furió et al., 2002). Sin embargo, es neces-

rio tener presente que la plena aceptación, a principios del siglo xx, de la teoría atómico-molecular para interpretar los cambios químicos fue la principal razón que llevó a la comunidad científica internacional a introducir la magnitud *cantidad de sustancia* (Brock, 1967; Rocke, 1984; Thuillier, 1990; Azcona et al., 2002). Los trabajos que tratan sobre las dificultades de aprendizaje del concepto de *mol* muestran que los estudiantes carecen de una concepción científica del mismo (Gabel y Bunce, 1994). En este sentido, la mayoría de los estudiantes identifica el mol con una masa, con un volumen o con un número (de Avogadro) de entidades químicas (Furió et al., 1993; Krishnan y Howe, 1994; Staver y Lumpe, 1995). Por otra parte, los estudiantes, al desconocer el significado de la magnitud *cantidad de sustancia*, evitan su manejo y no identifican el *mol* como una unidad (Schmidt, 1994; Strömdahl et al., 1994). Los razonamientos de la mayoría de los estudiantes en este dominio se caracterizan por confundir frecuentemente el nivel macroscópico de descripción de las sustancias con el microscópico de sus entidades a escala atómico-molecular. Un caso bastante frecuente es la identificación que hacen los estudiantes de la masa molar con la masa molecular (Furió et al., 1993).

Cuando se pregunta al profesorado en activo sobre cuáles pueden ser las causas del fracaso generalizado en el aprendizaje de los conceptos de *mol* y de *cantidad de sustancia*, suelen atribuirlo a: a) la falta de conocimientos sobre conceptos que son prerrequisitos para su aprendizaje, tales como la distinción entre *mezcla* y *compuesto* o los conceptos de *átomo* y *molécula*; b) la dificultad intrínseca de los propios conceptos de *mol* y *cantidad de sustancia*, incluyendo el carácter ambiguo de la expresión *cantidad de sustancia* y la atribución de diversos significados a la palabra *mol* (Dierks, 1981; Strömdahl et al., 1994; Tullberg et al., 1994).

Aunque la mayoría de las explicaciones responsabilizan del fracaso a deficiencias de los estudiantes (Azcona, 1997), se ha de tener en cuenta que uno de los factores externos que más influye en el aprendizaje de estos conceptos escolares es la forma de enseñarlos. Por tanto, es interesante preguntarnos: ¿qué tipo de enseñanza impartimos para que la mayoría de los estudiantes sea incapaz de aprender de forma significativa los conceptos de *mol* y de *cantidad de sustancia*?

Existen numerosos trabajos que ponen de manifiesto claras discrepancias entre los conocimientos asumidos por la comunidad científica (Mills et al., 1993) y el pensamiento del profesorado respecto al significado y al papel relevante de la magnitud *cantidad de sustancia* y de su unidad, el *mol*, como puede apreciarse, por ejemplo, en los textos de química. En concreto, este desacuerdo se refleja a nivel de enseñanza en los siguientes aspectos:

– El concepto de *cantidad de sustancia* no es introducido en la gran mayoría de los programas de enseñanza habitual de la química. En este sentido, se suele identificar *cantidad de sustancia* con masa o con número de entidades químicas, desconociendo el significado actual de esta magnitud macroscópica que sirve para contar partículas (Strömdahl et al., 1994; Furió et al., 2000).

– Los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol* se identifican a menudo con conceptos incluidos en la teoría atómico-molecular, tales como *masa molar* y *constante de Avogadro*, respectivamente (Tullberg et al., 1994).

– Se presentan dificultades en la secuenciación de los contenidos al introducir el concepto de *mol*, resultando inadecuadas las metodologías utilizadas habitualmente (Lazonby et al., 1985).

De acuerdo con Gabel y Bunce (1994), creemos que las graves deficiencias epistemológicas y didácticas detectadas en la enseñanza habitual de estos conceptos son principalmente las responsables de la mayoría de las dificultades de aprendizaje apuntadas en la bibliografía. Por otra parte, el aprendizaje de conceptos científicos requiere el desarrollo simultáneo de competencias características de la metodología científica y de una forma de enseñar coherente con este objetivo (Millar, 1989; Gil et al., 1991).

El objetivo fundamental de este trabajo consiste en presentar el diseño y desarrollo de un modelo de enseñanza que tiene en cuenta los componentes conceptual, epistemológico y axiológico del aprendizaje y analizar en qué medida ayuda a superar las dificultades de los estudiantes en los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol*. Las estrategias de enseñanza que se utilizan se enmarcan dentro de una orientación constructivista del proceso de enseñanza-aprendizaje (Posner et al., 1982; Osborne y Wittrock, 1983; Driver y Oldham, 1986; Burbules y Linn, 1991; Duschl y Gitomer, 1991; Hodson, 1992; Gil et al., 2002) y, en concreto, del modelo de aprendizaje de las ciencias como investigación orientada (Furió y Gil, 1978; Gil et al., 1999; Furió, 2001). Este modelo ya ha sido experimentado con bastante éxito en la enseñanza de otros conceptos científicos complejos como, por ejemplo, las *reacciones ácido-base* (Bárceñas, 2000), el *campo eléctrico* (Furió et al., 2003) o la *conservación de la energía* (Solbes y Tarín, 2004).

ESTRATEGIAS DE ENSEÑANZA EN EL MODELO DE APRENDIZAJE POR INVESTIGACIÓN ORIENTADA

Los modelos constructivistas de la década de los ochenta, basados inicialmente en el cambio conceptual, han puesto de relieve la importancia del conocimiento previo del estudiante y han evolucionado hacia modelos de cambio conceptual, procedimental y actitudinal (Duschl, 1990; Gil et al., 2002). El proceso de cambio conceptual está gobernado no sólo por factores cognitivos (Oliva, 1999): las motivaciones y metas de los estudiantes así como sus percepciones sobre la tarea condicionan la reestructuración de los conocimientos y el cambio en las representaciones de los fenómenos científicos (Nersessian, 1989; Strike y Posner, 1992). Otros autores resaltan la importancia del componente epistemológico en el proceso de cambio conceptual poniendo énfasis en la importancia de seleccionar una adecuada secuencia de las actividades de enseñanza con el fin de facilitar, a los

estudiantes, las herramientas necesarias para que puedan realizar su propia reestructuración de conocimientos (Duschl y Gitomer, 1991).

La propuesta del modelo de aprendizaje como investigación orientada que aquí presentamos tiene en cuenta las aportaciones mencionadas y se basa en la relación entre la construcción de conocimientos por parte de los estudiantes y la producción de conocimientos en la ciencia (Duschl, 1990; Gil et al., 2002). Esta idea de la enseñanza-aprendizaje de las ciencias como un proceso de (re)construcción de conocimientos en un contexto que se inspira en el de la investigación ha sido incorporada recientemente a las nuevas reformas curriculares. Así, por ejemplo, los National Science Education Standards (National Research Council, 1996) indican que, en todos los niveles, la educación científica debe basarse en la metodología de la investigación como forma de favorecer una actividad significativa en torno a problemas susceptibles de interesar a los estudiantes. Desde este punto de vista, resulta esencial asociar *explícitamente* la construcción de conocimientos al tratamiento científico de problemas y ello cuestiona de forma radical aquellas estrategias de cambio conceptual que toman las ideas de los estudiantes como punto de partida y conciben el aprendizaje como el mero desplazamiento de ideas (Martínez-Torregrosa et al., 1993).

Una característica fundamental del tratamiento científico de los problemas es tomar las ideas que se tienen –incluso las más seguras y obvias– como simples hipótesis de trabajo que es necesario controlar, esforzándose en imaginar otras hipótesis. Ello concede un estatus muy diferente a las situaciones de conflicto cognoscitivo: ya no suponen para los estudiantes el cuestionamiento *externo* de las ideas personales, ni la aceptación continua de las insuficiencias del propio pensamiento (con las consiguientes implicaciones afectivas), sino un trabajo de profundización en el que unas ideas, tomadas como hipótesis, son sustituidas por otras tan personales como las anteriores. No se trata de eliminar los conflictos cognoscitivos, sino de evitar que adquieran el carácter de una confrontación entre las ideas propias (incorrectas) y los conocimientos científicos (externos). A este respecto, Solomon (1991) argumenta que, «tras impulsar la expresión de un conjunto de opiniones particulares, el profesorado no puede simplemente rechazar las que no se ajustan a la teoría vigente. De ese modo dejaría de ser posible un diálogo abierto».

Nuestra visión concreta del proceso de enseñanza como investigación orientada considera el aprendizaje como *tratamiento de situaciones problemáticas* que los estudiantes pueden considerar de interés e incluye toda una serie de aspectos que, en forma de programa de actividades, orientan la solución de la situación problemática transformada en problema. En primer lugar, se proponen actividades que dan sentido al estudio de los fenómenos que se van a abordar, y de este modo se trata de evitar que los estudiantes se vean sumergidos en el tratamiento de una situación sin haber podido hacerse una primera idea motivadora y preliminar de la tarea. Se hace énfasis en *una aproximación cualitativa* a las

situaciones problemáticas, de forma que se puedan acotar en forma de problemas en los que se ha operativizado qué es lo que se busca. En este análisis de la situación problemática se proporciona a los estudiantes ocasión para que comiencen a explicitar funcionalmente sus concepciones.

En segundo lugar, se proponen actividades para que los estudiantes *emitan hipótesis y propongan* posibles soluciones a las situaciones planteadas una vez precisadas. Estas actividades son una buena ocasión para que los estudiantes utilicen sus ideas previas y las sometan a prueba. Por ello, las siguientes actividades se centran en la *elaboración de estrategias* para someter a prueba las hipótesis, en la realización de los correspondientes diseños experimentales y en la *resolución y análisis de los resultados obtenidos*.

En tercer lugar, se proponen actividades donde los estudiantes tienen que *aplicar reiteradamente los nuevos conocimientos* en diferentes contextos. Se pone énfasis en situaciones relativas a las interacciones ciencia-tecnología-sociedad que enmarcan el desarrollo científico y pueden reforzar el interés de la tarea. Finalmente, se proponen actividades de síntesis y de autoevaluación sobre los logros de aprendizaje obtenidos en el desarrollo de las clases.

Es conveniente remarcar que las estrategias de enseñanza precedentes *no constituyen un algoritmo* que pretende guiar paso a paso las actividades de los estudiantes, sino indicaciones genéricas sobre aspectos esenciales de la actividad científica, que permiten abordar en el aula una actividad abierta y creativa debidamente *orientada por el profesorado*.

A continuación concretaremos los indicadores de comprensión de los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol* y el desarrollo de las estrategias utilizadas en el programa de actividades para que puedan ser aprendidos.

¿QUÉ SIGNIFICA TENER UNA BUENA COMPRENSIÓN DE LOS CONCEPTOS DE CANTIDAD DE SUSTANCIA Y DE MOL?

Aunque se sabe poco sobre la comprensión entendida como progresión del aprendizaje en un dominio científico, se suele aceptar que es un proceso complejo y multidimensional que se puede caracterizar estudiando empíricamente estados intermedios hasta llegar a las ideas científicas (Driver et al., 1994; Rahayu y Titler, 1999; Prieto et al., 2002). Otro enfoque distinto del estudio de la comprensión puede realizarse de forma teórica analizando la evolución de las ideas a lo largo de la historia de la ciencia y compararla con los resultados de las investigaciones sobre las concepciones de los alumnos (Furió et al., 1987; Wandersee, 1992; Mortimer, 1995). Este último enfoque es el que se ha elegido en este trabajo para definir qué significa una buena comprensión de los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol*.

Es bien conocido que el mol fue ideado por Ostwald (1900) como solución para pasar del manejo de la masa de los átomos al de la masa de las sustancias en el nivel macroscópico. El contexto concreto de investigación en el que el autor ideó el mol tenía por objeto determinar si la masa de agua oxigenada contenida en un litro de disolución que hacía disminuir 1,85 °C la temperatura de congelación del agua era 17 o 34 gramos. A la masa molecular de la sustancia expresada en gramos que obtuvo la denominó *mol*. Hoy decimos que su problema fue determinar la fórmula molecular del agua oxigenada midiendo su *masa molar* mediante el descenso crioscópico del disolvente agua. Aquella introducción del mol como unidad de masa química no solamente era más cómoda en la práctica sino que, sobre todo, era más acorde con la visión paradigmática de la mecánica química de la que, a principios del siglo XX, participaban químicos como Ostwald y físicos termodinámicos opuestos al atomismo como, por ejemplo, Duhem (1910). Una vez fue aceptada la teoría atómica por físicos y químicos, cincuenta años después se introdujo, por la comunidad científica, la *cantidad de sustancia* como nueva magnitud fundamental que sirve para contar macroscópicamente los átomos y las moléculas y de la que el mol es su unidad, cambiando así el significado de masa que originalmente le había dado Ostwald (Furió et al., 2000).

El análisis de la evolución histórica de estos conceptos nos puede advertir sobre las dificultades de comprensión que vamos a encontrar los propios profesores a la hora de enseñarlos en el currículo de química de bachillerato científico. Comprender estos conceptos requiere que su introducción se realice después de que los estudiantes hayan aplicado y profundizado en la teoría atómica, de manera que pueda decirse que «piensan en átomos». Ello implica que los estudiantes, en un primer nivel de profundización, saben qué es una sustancia y, en particular, un compuesto a escala macroscópica y microscópica y también han de tener cierta competencia para explicar lo que sucede en una reacción química (Azcona et al., 2004). También se supone que los estudiantes ya se han planteado y han resuelto el problema de la determinación de masas atómicas a partir de algunos experimentos en los que han obtenido las masas de los elementos que forman una masa dada de compuesto. Se puede suponer inicialmente que el compuesto tiene una fórmula sencilla (por ejemplo, que el compuesto sea binario) de manera similar a como lo supuso Dalton (Holton y Roller, 1963). Es en un segundo nivel de profundización de la teoría atómica en el que vamos a introducir la *cantidad de sustancia* planteando a los estudiantes el problema inverso de determinar las fórmulas químicas conociendo la composición del compuesto y las masas atómicas de sus elementos. La solución de esta situación problemática es la que nos llevará a la necesidad de contar átomos y, por tanto, de hacerlo introduciendo la *cantidad de sustancia* con el fin de pasar de la escala microscópica a la macroscópica de manera similar a como Ostwald ideó el mol.

A continuación presentamos los indicadores seleccionados que pueden facilitar la comprensión de estos conceptos en estudiantes de química de bachillerato (16-18 años) (Guggenheim, 1961; Dierks, 1981; Mills et al., 1993; Furió et al., 2002):

1) Saber valorar el interés que representa resolver el problema de las proporciones de masa o de volumen con que se combinan las sustancias químicas con el fin de obtener nuevas sustancias (cálculos estequiométricos) por las implicaciones sociales y tecnológicas que tiene. Por una parte, han de tener presente que la humanidad ha de cubrir la producción de materiales necesarios para la vida (abonos, medicamentos, fibras textiles, metales, plásticos, combustibles, ácidos, bases, cementos, vidrios, etc.) y, por otra, buscar soluciones a nuevos problemas que están surgiendo en el Planeta como consecuencia del desarrollo científico y tecnológico (cambio climático, disminución de la capa de ozono, disminución de la biodiversidad, etc.).

2) Comprender que la introducción del concepto *cantidad de sustancia* va a aportar una solución general a estos cálculos estequiométricos en las reacciones químicas. Una situación problemática idónea y sencilla para esta introducción puede ser la *determinación de la fórmula empírica de un compuesto* formado por dos elementos, como puede ser, por ejemplo, el cloruro de cinc.

3) Saber analizar la situación problemática planteada desde el marco de la teoría atómica-molecular hasta precisar el problema. Ello implica diversos conocimientos y habilidades como: ¿qué significa una fórmula?, ¿cómo se puede obtener el compuesto?, ¿qué sucede en la reacción química entendida como interacción de las entidades (átomos, moléculas o iones) de las sustancias participantes que se representa mediante una ecuación química sencilla? Es decir, si tomamos de nuevo el ejemplo del cloruro de cinc, en la ecuación $a \text{Cl} + b \text{Zn} \rightarrow \text{Zn}_b \text{Cl}_a$, será necesario saber cuál es el reactivo limitante, considerar qué variables (masas de reactivos, masas de las entidades, cantidades de estas entidades) habrán de tenerse en cuenta, etc. Asimismo, se debe llegar a precisar las proporciones de las cantidades de entidades N que interaccionan para formar entidades del compuesto ($\text{Zn}_b \text{Cl}_a$). O sea, en el ejemplo que estamos analizando, los estudiantes han de comprender que el problema consistirá en obtener de alguna manera cuánto vale la razón:

$$N(\text{Cl})/N(\text{Zn}), \text{ ya que } N(\text{Cl})/N(\text{Zn}) = a/b \quad (1)$$

4) Comprender que la solución hipotética al problema de las *cantidades de partículas que se combinan* va a depender de las *proporciones de masas reaccionantes* y de la *masa de las entidades (masa atómica, molecular o masa fórmula)*. En efecto, siguiendo con el ejemplo, la masa de Cl combinado será $m(\text{elemento Cl}) = N(\text{Cl}) \cdot m(\text{átomo Cl})$ (2); y lo mismo resultará para la masa de Zn combinado, por lo que la proporción de masas de Cl y Zn vendrá dada por la ecuación:

$$m(\text{elemento Cl}) / m(\text{elemento Zn}) = N(\text{Cl}) \cdot m(\text{átomo Cl}) / N(\text{Zn}) \cdot m(\text{átomo Zn}) \quad (3)$$

Esto implica que los estudiantes han de entender que, dado que *las partículas son difíciles de contar debido a su tamaño extremadamente pequeño*, es necesario idear una nueva magnitud macroscópica, la *cantidad de sustancia n* que nos permita contabilizarlas indirectamente, de manera que:

$$n(\text{Cl}) / n(\text{Zn}) = N(\text{Cl}) / N(\text{Zn}) \quad (4)$$

$$\text{o bien que } n = k \cdot N \quad (5)$$

donde k será una constante con el mismo valor para todas las sustancias. La unidad de esta nueva magnitud a modo de «porción de sustancia» que contiene una cantidad enorme pero fija de partículas la denominaremos *mol* y se definirá más adelante.

5) Comprender que se pueden contar cantidades muy grandes de entidades de modo más asequible a partir de la masa o el volumen. En el caso de gases ideales, la ecuación (5) es coherente con el modelo cinético corpuscular (con la ecuación de estado de un gas perfecto) y eso permite *hacer una primera medida de la cantidad de sustancia realizando medidas del volumen a una presión y temperatura estándar, previamente fijadas*, sin tener en cuenta la naturaleza del gas. También se ha de saber que, de manera más general, *se pueden contar partículas en sustancias sólidas, líquidas y gaseosas, a partir de la masa con sólo considerar que, para que haya la misma «cantidad de sustancia», las masas de las distintas sustancias han de estar en la misma proporción que las de las correspondientes masas de sus entidades*. Así, en nuestro ejemplo, al averiguar las masas que hay que tomar de los elementos Cl y Zn para que tengan la misma cantidad de partículas [$N(\text{Cl}) = N(\text{Zn})$] y, por tanto, la misma cantidad de sustancia [$n(\text{Cl}) = n(\text{Zn})$], se ha de tener en cuenta la ecuación (3) y se llega a deducir que:

$$m(\text{elemento Cl}) / m(\text{elemento Zn}) = m(\text{átomo Cl}) / m(\text{átomo Zn}), \text{ si } n(\text{Cl}) = n(\text{Zn}) \quad (6)$$

6) Convenir, como caso más sencillo de masa que ha de tener la *unidad de cantidad de sustancia (mol)*, aquella en la que las masas en gramos de las distintas sustancias coincidan con el valor de la masa de sus correspondientes entidades y a las que llamaremos *masas molares, M*, de las sustancias (*g/mol*). En consecuencia, el segundo miembro de la expresión (3) para el caso de los dos elementos, Cl y Zn, puede escribirse macroscópicamente introduciendo las magnitudes *cantidad de sustancia y masa molar* como sigue:

$$m(\text{elemento Cl}) / m(\text{elemento Zn}) = n(\text{Cl}) \cdot M(\text{Cl}) / n(\text{Zn}) \cdot M(\text{Zn}) \quad (7)$$

7) De acuerdo con lo anterior se debe deducir de forma comprensiva que una primera definición general de n relacionada con m sea:

$$n = m(\text{g}) / M(\text{g/mol}) \quad (8)$$

Finalmente para comprender la definición general que relacione n con la cantidad de entidades N habrá que introducir previamente la constante de Avogadro L como la cantidad de entidades que se han medido por los científicos en la masa (o el volumen) *molar* y cuyo valor es $6.023 \cdot 10^{23}$ entidades / mol, de donde:

$$n = N(\text{entidades}) / L(\text{entidades/mol}) \quad (9)$$

expresión que se corresponde con la ecuación (5) anterior, donde $k = 1/L$ y significa la *cantidad de sustancia* que contiene una partícula o entidad.

8) Saber definir el mol como unidad de *cantidad de sustancia* según la IUPAC poniendo énfasis en la necesidad de especificar la entidad que se va a contabilizar macroscópicamente y saber diferenciarlo de la masa molar, del volumen molar y de la constante de Avogadro.

9) Comprender la nueva magnitud, *cantidad de sustancia*, implica saber aplicarla en muy variadas situaciones y saber diferenciarla de la masa, del volumen y, también, de la cantidad de partículas en cualquier cálculo estequiométrico. En particular, se ha de saber relacionar correctamente la solución microscópica del problema, planteada como proporción de partículas combinadas (ecuación 1), con la solución macroscópica planteada como proporción de *cantidades de sustancia* que reaccionan. Es decir, en nuestro ejemplo, se sustituye la ecuación 1 por una nueva expresión:

$$n(\text{Cl}) / a = n(\text{Zn}) / b \quad (10)$$

10) Tener en cuenta que la invención de la *cantidad de sustancia* y su unidad el *mol*, no sólo permite resolver el problema científico de la determinación de fórmulas, sino también el relativo a las proporciones en masa o en volumen con que reaccionan las sustancias (en general, soluciona los cálculos estequiométricos). En particular, los estudiantes han de saber aplicar la *cantidad de sustancia* en cuestiones de interés, como, por ejemplo: predecir la composición centesimal de un medicamento como la vitamina C o el ácido acetilsalicílico, saber preparar una disolución glucosalina diluida a partir de otra concentrada, saber efectuar cálculos estequiométricos en reacciones de neutralización relacionadas con una gastritis, saber calcular la posible contaminación atmosférica urbana o industrial, etc. En resumen, los estudiantes han de saber analizar aplicaciones CTSA que permitan contextualizar la teoría aprendida y adoptar en el futuro actitudes responsables hacia el desarrollo tecnológico y las implicaciones de carácter social que ello conlleva.

DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROGRAMA DE ACTIVIDADES PARA INTRODUCIR LA MAGNITUD CANTIDAD DE SUSTANCIA Y SU UNIDAD EL MOL

A continuación vamos a presentar varios aspectos relativos al programa de actividades elaborado para introducir la magnitud *cantidad de sustancia* y su unidad, el mol, a nivel de bachillerato (16-17 años). Se incluyen los siguientes apartados: objetivos y actividades del programa, desarrollo en el aula del programa de actividades y tutorización del profesorado que aplicó el programa de actividades.

Objetivos y actividades del programa

En el cuadro 1 se muestran los objetivos de enseñanza del programa, así como las actividades de aprendizaje y las sesiones de clase utilizadas para su desarrollo.

Cuadro 1
Objetivos y contenidos de las actividades propuestas en el programa.

| Sesiones de clase | Objetivos | Actividades de aprendizaje |
|-------------------|--|---|
| 1 / 2 | <ul style="list-style-type: none"> – Poner de manifiesto las estrechas relaciones CTSA en dos ejemplos. – Concretar cuál es el problema general que se intenta resolver e implicar a los estudiantes en la tarea a realizar. – Explicitar las ideas previas de los estudiantes ante el análisis de una situación problemática abierta. | <ul style="list-style-type: none"> – Discusión sobre dos situaciones problemáticas: <ul style="list-style-type: none"> – Construcción de flashes de magnesio. – La corrosión de un recipiente de cinc donde se ha vertido sin querer una disolución de ácido clorhídrico. – Análisis cualitativo y emisión de hipótesis sobre los factores de que depende la masa de reactivos que intervienen en la reacción. |
| 3 / 4 | <ul style="list-style-type: none"> – Predicción de la proporción de masa reaccionante en una reacción química e interpretación daltoniana del proceso. | <ul style="list-style-type: none"> – Diseño experimental para poner a prueba las hipótesis emitidas. – Realización experimental y registro de resultados obtenidos en los experimentos. |
| 5 / 6 | <ul style="list-style-type: none"> – Predecir la proporción en masa con que se combinan dos sustancias en una reacción química. – Iniciar la diferenciación progresiva entre «cantidad de sustancia» (n) y «masa» (m) en el contexto de la teoría atómica de la materia. – Definir una unidad funcional que sirva para medir «cantidades de sustancia». | <ul style="list-style-type: none"> – Análisis, comunicación y discusión sobre los resultados experimentales obtenidos. – Elaboración de informes y conclusiones. – Realizar actividades para diferenciar cualitativamente entre número de entidades químicas, masa y «cantidad de sustancia». |
| 7 / 8 | <ul style="list-style-type: none"> – Redefinir el concepto de <i>mol</i> a partir de las ideas de los estudiantes. – Introducir el concepto de <i>masa molar</i>. – Definición operativa de la magnitud n. – Diferenciación entre n, m y N (número de entidades químicas). Introducir la constante de Avogadro. | <ul style="list-style-type: none"> – Realización de actividades para diferenciar cuantitativamente entre n, m y N. – Realización de actividades para obtener las definiciones operativas: $n = m / M \quad \text{y} \quad n = N / L$ |
| 8 / 9 | <ul style="list-style-type: none"> – Comprender la necesidad de explicitar el tipo de entidad química al referirse a «cantidades de sustancia». – Obtener la relación entre n y V (volumen). – Conocer las últimas recomendaciones de la IUPAC sobre la magnitud n y su unidad, el mol. – Efectuar cálculos sobre las relaciones entre n, m, V y N. | <ul style="list-style-type: none"> – Actividades para calcular la cantidad de sustancia de diferentes sustancias químicas con el mismo tipo de átomos. Por ejemplo: O_2, O y O_3. – Actividad para obtener la definición operativa $n = V / V_m$. – Realización de actividades para consolidar los conceptos estudiados en la determinación de la fórmula del cloruro de cinc. |
| 10 / 11 / 12 / 13 | <ul style="list-style-type: none"> – Utilización de la magnitud «cantidad de sustancia» y de su unidad, el mol, en diversos contextos experimentales. – Utilización de la magnitud «cantidad de sustancia» para averiguar la fórmula empírica y la composición porcentual de un compuesto. | <ul style="list-style-type: none"> – Diseñar la forma de medir «cantidades de sustancia» en el laboratorio. Realización experimental – Diseñar la forma de preparar disoluciones de diversa concentración. Realización experimental. – Realización de actividades de aplicación de la magnitud n: composición porcentual de un compuesto, preparación de disoluciones diluidas y cálculos en reacciones químicas. |

Desarrollo en el aula del programa de actividades

Los estudiantes se enfrentan en pequeños grupos de 3 o 4 personas a las actividades propuestas en el programa y el profesor les estimula y orienta a abordar los problemas utilizando aspectos básicos de la metodología científica. Así, al comienzo del programa (sesiones 1 y 2 del cuadro 1), los estudiantes se enfrentan al estudio cualitativo de una situación problemática abierta como la siguiente.

Actividad 3. Un estudiante vierte un poco de sulfuro de cinc en un vaso de cinc (hojalata), observa cómo se produce un gas y se cuestiona cuánto se corroerá el cinc. Analizad cualitativamente la situación planteada y formulad preguntas que permitan precisar y abordar la resolución de este problema.

Se trata de una situación problemática abierta que los estudiantes tienen que precisar o acotar. En ella se ponen en tensión los conocimientos o ideas previas de los estudiantes y se favorece el pensamiento reflexivo. Abordar correctamente el problema planteado implica que los estudiantes lleguen a acotarlo, para lo cual ha de precisarse qué ocurre en la reacción, cuáles son los reactivos y productos, cuál es el reactivo limitante, cómo simbolizar lo ocurrido en la reacción, etc. hasta llegar a suponer las variables relevantes y decidir como problema precisado el cálculo de la masa de cinc que ha reaccionado o «desaparecido». Veamos el ejemplo 1 que ha sido transcrito de la grabación realizada a un grupo de estudiantes durante el desarrollo normal de la clase. En él se proponen una serie de preguntas válidas para acotar el problema planteado:

Ejemplo 1

- 01 *Zaine:* ¿Ácido clorhídrico es lo mismo que sulfumán?
- 02 *Nerea:* ¿Cuál es el gas que se forma?
- 03 *Zaine:* No entiendo bien.
- 04 *Nerea:* Cuánto se corroe quiere decir cuánto se come el vaso.
- 05 *Zaine:* ¿Es hidrógeno?
- 06 *Nerea:* A ver, ¿qué otras preguntas podemos hacer?
- 07 *Zaine:* ¿Cuál es el reactivo limitante?
- 08 *Nerea:* ¿Cuál es el reactivo que queda en exceso?
- 09 *Zaine:* ¿Cuál es el producto de reacción?
- 10 *Nerea:* Se puede agujerear el vaso si es de cinc.
- 11 *Zaine:* ¿Se agujerearía el recipiente?
- 12 *Nerea:* ¿Cuánto sulfumán necesitaríamos para que el sulfumán cayera al suelo?
- 13
- 14 *Zaine:* Quizás se acaba antes el líquido...
- 15 *Nerea:* Bueno, entonces...
- 16 *Zaine:* Podrían ser dos casos: si el reactivo limitante fuera el recipiente...
- 17
- 18 *Nerea:* El reactivo limitante tiene que ser el sulfumán...
- 19 *Zaine:* O el recipiente...
- 20 *Nerea:* A medida que se forma el gas se va deshaciendo...

Durante el episodio registrado en clase, las dos estudiantes se plantean un sinnúmero de dudas en esta fase de planteamiento del problema, que es, quizás, la más complicada cuando se inicia la aproximación cualitativa a estas situaciones problemáticas. Sin embargo, las estudiantes plantean cuestiones que pueden ayudar a acotar el problema (líneas 1, 2, 5, 7, 8 y 9). También se pone de manifiesto que no se cuestionan si hay más productos de reacción, aparte del hidrógeno (línea 9). Sin embargo, ayudados por las preguntas del profesor y de otros compañeros, los estudiantes fijan su atención en averiguar cuál pudiera ser el reactivo limitante y cuál el reactivo en exceso. Veamos otro ejemplo (2) en una parte más avanzada de la discusión:

Ejemplo 2

- 01 *Eñaut:* Tenemos que hacer un estudio cualitativo. No cuantitativo.
- 02 *Haritz:* ¿Esto qué quiere decir?
- 03 *Beñat:* El estudio, es decir, cuánto hay. ¿No?
- 04 *Ibon:* Cuánto sulfumán hemos echado. Es que aquí, ¿como ha dicho?... Espera... cómo es... Lo que sobra es sulfumán.
- 05
- 06 Parece que el agua no se gasta, que está siempre igual.
- 07 *Haritz:* Ya. Porque hay menos.
- 08 *Beñat:* Es que aquí sale un gas.
- 09 *Ibon:* Pero la cantidad de sulfumán no debe ser una pregunta.
- 10 *Eñaut:* Lo que sobra es sulfumán.
- 11 *Haritz:* Claro.
- 12 *Beñat:* Según qué caso.
- 13 *Haritz:* Ya. Pero en este caso sí.
- 14 *Beñat:* Al principio no.
- 15 *Haritz:* ¿Por qué?
- 16 *Beñat:* [No se entiende la respuesta]
- 17 *Haritz:* Ah, bueno, sí.
- 18 *Beñat:* En nuestro recipiente ha ocurrido al revés, que el cinc se ha gastado antes.
- 19
- 20 *Haritz:* ... ¿qué cantidad de cinc y de sulfumán han reaccionado?
- 21 *Ibon:* Eso ya lo hemos puesto.

Durante la discusión, tres estudiantes (Ibon, Eñaut y Haritz) se refieren al sulfumán como reactivo en exceso (líneas 4, 5, 6, 10, 11 respectivamente), sin atender a la posibilidad de que pudiera serlo el cinc. Esto puede deberse a que, en la experiencia previa a la discusión de esta actividad, agregaron ácido clorhídrico en exceso sobre un trozo de cinc, hasta su desaparición. Solamente uno de los estudiantes (Beñat, línea 12) discrepa de este punto de vista y apunta la posibilidad contraria.

Al final de la discusión todos los grupos de estudiantes realizan una puesta en común aportando soluciones y justificándolas. Un ejemplo de soluciones aportadas por la gran mayoría de los grupos es el siguiente:

Ejemplo 3

«Para saber cuánto se corroe el recipiente de cinc, deberíamos saber en qué proporción reaccionan el cinc y el “sulfumán”. Después de saber esto, sabríamos cuánto se ha corroído el recipiente. Cuanto más sulfumán echemos, más se corroerá el recipiente de cinc, hasta desaparecer totalmente, porque en esta reacción el reactivo limitante es el cinc.»

En el ejemplo anterior, las alumnas razonan correctamente, si bien al final responden que el reactivo limitante es el cinc, quizás debido a la misma razón que en la discusión que hemos mostrado anteriormente. La intervención posterior del profesor llama la atención sobre esta confusión en relación con el problema planteado, reformulación que es fácilmente comprendida.

Otro ejemplo del desarrollo del programa de actividades, con el objetivo de que los estudiantes lleguen a comprender de forma cualitativa el concepto *cantidad de sustancia* en relación con *contar partículas* y diferenciarla del concepto de *masa* (sesiones 7 y 8 del cuadro 1), lo podemos ver cuando se realizan las actividades 12, 13 y 14, que se presentan a continuación.

Actividad 12

Elegir masas de las siguientes sustancias que contengan la misma *cantidad de sustancia* en: agua, cloruro de sodio, hierro y oxígeno.
Rellena la tabla que se adjunta y justifica tus respuestas.

| Sustancia | Masa atómica Masa molecular Masa fórmula | MASAS (en gramos) de sustancias distintas que contienen la misma cantidad de partículas | | |
|----------------------|--|---|-----------|-----------|
| | | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
| H ₂ O (l) | | | | |
| NaCl (s) | | | | |
| Fe (s) | | | | |
| O ₂ (g) | | | | |

En la actividad 12, los estudiantes tienen que empezar a establecer la relación entre *masa* y *cantidad de sustancia* con el fin de ir preparando la definición operativa.

En el ejemplo 4 correspondiente a otro grupo de cuatro estudiantes se pone de manifiesto que la tarea no es trivial. Esto obliga a intervenciones puntuales del profesor y a una comunicación fluida entre grupos en las puestas en común.

Ejemplo 4

- 01 *Nuria:* ¿La masa molecular del agua?
- 02 *Lidia:* 18. ¿Cloruro de sodio?
- 03 *Nuria:* 58,5. El hierro 56 y el oxígeno 16.
- 04 *Ruth:* Por 2, treinta y dos. Yo es que no entiendo lo que hay que
- 05 hacer ahora.
- 06 *Nuria:* ¿Hay que buscar uno como el agua que tenga 18?
- 07 *Ruth:* No.
- 08 *Lidia:* Una de ésta, una de ésta, una de ésta ... [Señala las dife-
- 09 rentes sustancias] Aunque los números sean diferentes la
- 10 cantidad de partículas es la misma. Porque esto es masa.
- 11 Estamos en lo mismo de ayer. Esto es masa.
- 12 *Ruth:* Ah. Ya.
- 13 *Lidia:* Pero la cantidad de partículas es la misma: una de agua, una
- 14 de cloruro de sodio, una de hierro y una de oxígeno.
- 15 *Ruth:* O sea, con doble cantidad de partículas.
- 16 *Ione:* Masas que contengan la misma cantidad de partículas. ¿Qué
- 17 masas? ¿Las que ponen aquí o hay que buscar otras?
- 18 *Lidia:* Aquí pones lo mismo. En el ejemplo 1 pones lo mismo. En
- 19 el ejemplo 2 pones multiplicado por dos. Y en el ejemplo
- 20 3, multiplicado por tres.
- 21 *Ione:* No. Eso no puede ser. Igual se refiere a ...
- 22 *Lidia:* ¿Cómo que no? ...
- 23 *Ione:* Es demasiado fácil ...
- 24 *Lidia:* Es que estas masas son la misma «cantidad de sustancia»,
- 25 una de agua, una de cloruro de sodio... ¿No me entiendes
- 26 *Ione?* Aunque las masas son diferentes...
- 27 *Ione:* Sí. Sí.

La discusión muestra las dificultades que representa la tarea, sobre todo para dos de las alumnas (*Nuria*, línea 6 y *Ione*, líneas 16, 17, 21 y 23). También representa una dificultad la inclusión de las masas relativas de las entidades en la tabla de masas de las sustancias (en gramos) y, en este sentido, *Lidia* asocia las entidades químicas con las masas expresadas en gramos (líneas 18, 19 y 20). Sin embargo, después de la discusión, la casi totalidad de las respuestas realizadas por los grupos eran correctas. Veamos el ejemplo 5 como respuesta de uno de los grupos:

Ejemplo 5

| SUSTANCIA | Masa atómica Masa molecular Masa fórmula | MASAS (en gramos) de sustancias distintas que contienen la misma cantidad de partículas | | |
|----------------------|--|---|-----------|-----------|
| | | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
| H ₂ O (l) | 18 | 36 g | 72 g | 144 g |
| NaCl (s) | 58,5 | 117 g | 234 g | 468 g |
| Fe (s) | 55,8 | 111,6 g | 223,2 g | 446,4 g |
| O ₂ (g) | 32 | 64 g | 128 g | 256 g |

El profesor, en la puesta en común, resume que en esta actividad hemos comparado o contado «indirectamente» la cantidad de partículas a través de la masa. El profesor confirma la corrección de las diversas aportaciones e insiste en que las porciones de sustancias diferentes calculadas en la tabla del ejemplo 6 tienen en común el número de partículas y corresponden a medidas concretas de la nueva magnitud

cantidad de sustancia. El profesor advierte que esta nueva magnitud está relacionada con la masa *m* y con el número de partículas *N* pero eso no implica que sea idéntica a ellas como se verá en la siguiente actividad A.13.

A.13. Definid una unidad que sirva para medir «cantidades de sustancia». Podéis ayudaros de los resultados que aparecen en la tabla de la actividad anterior.

Esta actividad 13 presenta diversas dificultades, existe el riesgo de que los estudiantes confundan masa atómica o molecular con masa molar, y que, por tanto, lleguen a identificar la unidad de *cantidad de sustancia* como masa. Esto se pone claramente de manifiesto en la transcripción de la grabación realizada a uno de los grupos de estudiantes que se muestra a continuación.

Ejemplo 6

- 01 *Ruth:* Cogerías gramos.
- 02 *Iranzu:* Sí, ¿no?... gramos...
- 03 *Ruth:* Y ¿qué relación tiene?
- 04 *Lidia:* ¿«Cantidad de sustancia» en gramos?
- 05 *Ruth:* Es en moles, pero tienes que coger mirando de ahí... Imagínate
- 06 que tú no sabes que existen los moles... ¿qué dirías?... m, masa,
- 07 es en gramos, cantidad de partículas es en gramos, y masa
- 08 atómica es en u.m.a.s, pero sí se relaciona, ¿no?
- 09 *Iranzu:* Sí. Pero aquí lo que tenemos que decir es que sirva para
- 10 medir la «cantidad de sustancia». O sea, no puedes decir tú
- 11 de repente que la «cantidad de sustancia» es en gramos, y es
- 12 que estamos explicando eso.
- 13 *Ruth:* ¿Cantidad de partículas es lo mismo que «cantidad de
- 14 sustancia»?
- 15 *Iranzu:* Claro.
- 16 *Ruth:* En gramos porque relaciona... se relaciona con la masa y la
- 17 masa se da en gramos.
- 18 *Lidia:* ¿Ponemos eso?
- 19 *Ruth:* Porque la masa es igual...
- 20 *Lidia:* Porque se relaciona con la masa.
- 21 *Ruth:* Sí.
- 22 *Iranzu:* Y luego ponemos la fórmula...
- 23 *Ruth:* Porque se relaciona con la masa...
- 24 *Iranzu:* Y la masa se mide en gramos...
- 25 *Ruth:* U.m.a.s también en parte, ¿no está relacionado en gramos?
- 26 *Iranzu:* Claro. Y masa atómica...
- 27 *Ruth:* Teniendo en cuenta que, cuando tienes un átomo...
- 28 *Iranzu:* A ver u.m.a. es la masa de un átomo (unidad de masa atómica)...
- 29 *Ruth:* *Iranzu:* Sí.
- 30 La masa de un átomo no se puede dar en gramos porque es
- 31 muy pequeña... pero la masa de muchos átomos se puede
- 32 dar en gramos. Espera, u.m.a. es la masa de un átomo...
- 33 *Iranzu:* ... y la masa de muchos átomos ... sería «cantidad de sustancia»...
- 34 *Ruth:* La masa de muchos... ¿cómo que sería «cantidad de sus-
- 35 tancia»?
- 36 *Iranzu:* Claro, la masa de muchos átomos es la «cantidad de sus-
- 37 tancia» ¿no?
- 38 *Lidia:* La «cantidad de sustancia» es siempre dos...
- 39 *Ruth:* ¿Qué? ¿Qué habéis puesto? ¿Que u.m.a. es la masa de un
- 40 átomo?
- 41 *Lidia:* Unidad de masa atómica.
- 42 *Iranzu:* ¡Ah!
- 43 *Ruth:* Es la masa de un átomo. Aquí sí hemos hecho diferente. Y
- 44 en la masa de muchos átomos... La masa de muchos átomos
- 45 se podrá dar en gramos.

Durante la discusión, las estudiantes Lidia e Iranzu muestran su extrañeza de que puedan establecerse comparaciones de «cantidades de sustancia» por medio de las masas en gramos (líneas 4, 9, 10, 11 y 12). Sin embargo, a pesar de ello, no están totalmente seguras y, ante el razonamiento de otra estudiante (Ruth, líneas 29 a 32), parecen admitir que la masa de muchos átomos sería la *cantidad de sustancia*. También podemos observar que Iranzu identifica *cantidad de partículas* con *cantidad de sustancia* (línea 15). Estas dificultades también se plantearon en la puesta en común donde aproximadamente la mitad de los grupos llegaba a identificar *mol* con masa atómica o molecular expresada en gramos, identificándolo, por tanto, con masa molar, y ello a pesar de la contradicción que les suponía (como hemos mostrado en el ejemplo anterior) expresar en gramos las *cantidades de sustancia*. Veamos en el ejemplo 7 la respuesta dada por uno de los grupos.

Ejemplo 7

«La masa atómica, molecular o fórmula de un compuesto expresada en gramos, equivale a un mol de esa sustancia.»

En la puesta en común de la actividad A.13, el profesor retoma las aportaciones de algunos grupos para indicar los pasos que se han seguido y los conceptos implicados. En primer lugar, los estudiantes han tenido que elegir de todas las *cantidades de sustancia* de la tabla del ejemplo 6 aquella que les parecía razonable como unidad (a la que llamaremos *mol*). En segundo lugar, *se concibe el mol como un «paquete» que contiene un número determinado de partículas (átomos, moléculas e iones)* y que se caracteriza también por tener una masa y un volumen concretos. En tercer lugar, el profesor indica que a cada uno de estos imaginarios «paquetes» le denominaremos *mol* y que *el número de partículas contenido en cada paquete debe ser extraordinariamente elevado* teniendo en cuenta el valor extremadamente pequeño de la masa y del volumen de cada partícula. En este momento, el profesor introduce la constante de Avogadro como la cantidad de partículas por cada mol de sustancia ($L = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) que ha sido obtenida de maneras muy diversas por los científicos. El profesor, basándose, en la medida de lo posible, en las aportaciones de los diferentes grupos, deja claro que la *cantidad de sustancia* se expresa en moles, y que se relaciona (pero no se identifica) con masa, volumen o número de entidades químicas. Aquí el profesor comenta que *proporción entre la masa de una sustancia y su «cantidad de sustancia» (medida en moles) sería su «masa molar»*, y aprovecha para comentar que, como han hecho algunos grupos (ejemplo 7), han identificado *mol* y masa molar, que fue el primer significado que dio Ostwald al mol, en 1900, aunque posteriormente se cambió en 1960 (Guggenheim, 1961).

A.14a. Sabiendo la masa molar (M) de una sustancia, ¿cómo se podría calcular la *cantidad de sustancia* (n) que hay en una masa de sustancia (m)?

A.14b. Sabiendo el número de partículas de sustancia contenidas en 1 mol (L), ¿cómo se podría calcular la *cantidad de sustancia* (n) a partir del número de partículas (N) de dicha sustancia?

En las actividades A.14a y A.14b se pretenden obtener las definiciones operativas de la magnitud *cantidad de*

sustancia. Dado que, en las actividades anteriores, los estudiantes habían comprendido de forma cualitativa el significado de *cantidad de sustancia* y *mol*, no eran previsibles grandes dificultades en su resolución. Las dos actividades se presentaron conjuntamente para su resolución. El ejemplo 8 muestra la reflexión de un grupo de estudiantes:

Ejemplo 8

A.14a

- 01 *Josema:* Sabiendo la masa molar (M) de una sustancia ...
 02 *Julio:* La masa molar es gramos/mol ...
 03 *Josema:* ¿Cómo se podría calcular la «cantidad de sustancia»
 04 (n) a partir de la masa de sustancia (m)?
 05 *Julio:* Por ejemplo, tienes 20 g de agua y sabes su masa molar
 06 ¿no?, pues su masa molar es 18... Pues divides los 20
 07 g del agua entre 18 g de agua y te da la «cantidad de
 08 sustancia» ...te da cuántos moles tienes. Dividimos la
 09 masa de sustancia entre la masa molar y, entonces, nos
 10 da la «cantidad de sustancia» medida en moles.

A.14b

- 11 *Josema:* Sabiendo el número de partículas de una sustancia
 12 contenidas en 1 mol (L), ¿cómo se podría calcular
 13 la «cantidad de sustancia» (n) a partir del número de
 14 partículas (N) de dicha sustancia?
 15 *Julio:* Cogemos el número de partículas de dicha sustancia
 16 (N) y lo dividimos entre el número de partículas
 17 contenidas en un mol (L), y nos dará la «cantidad de
 18 sustancia». Entonces quedaría: $N/L = n$.

La casi totalidad de los grupos llegaron, en los dos casos, a las expresiones operativas de *cantidad de sustancia*. Un ejemplo de respuesta correcta: «Masa molar es la masa que tiene un mol. Haciendo m/M podremos calcular la *cantidad de sustancia*. En el caso del cobre, que tiene 63 de masa molar, si tuviéramos 7 g, obtendríamos $7/63 \text{ mol}$.»

Tutorización del profesorado que aplicó el programa de actividades

El programa de actividades, del que se ha presentado un breve resumen en el apartado anterior, es la tercera versión y es el resultado de sucesivas modificaciones realizadas, primero, al ponerlo en práctica uno de los autores de este trabajo y, posteriormente, por las aportaciones del profesorado de química de secundaria asistente a un seminario sobre la enseñanza de los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol* impartido por el mismo investigador citado antes (titulado «*De las ideas de los estudiantes al aprendizaje de los conceptos científicos. El caso de la cantidad de sustancia y el mol*»). El objetivo del seminario consistió en efectuar una revisión sobre diversos aspectos relacionados con la introducción de conceptos científicos en clase y en particular la de *cantidad de sustancia* y *mol*. Se trataba de ofrecer al profesorado la oportunidad de debatir y reflexionar colectivamente sobre la forma habitual de introducir conceptos posibilitando un cambio del pensamiento docente habitual, que permita la introducción de estos conceptos más acorde con los resultados de la investigación didáctica.

El seminario tuvo una duración de 20 horas y asistieron 7 profesores.

En el mismo curso en que se impartió el seminario se volvió a aplicar el programa de actividades a las muestras de estudiantes antes mencionadas por uno de los autores de este trabajo, que actuó de coordinador, y por cuatro profesores interesados en el programa alternativo, que se ofrecieron voluntarios. Tres de ellos habían asistido al Seminario que hemos mencionado y aplicaron el programa en cinco clases del instituto de enseñanza media de Zarautz. Así mismo, otro profesor que no asistió al seminario se ofreció a desarrollar el programa en su clase del instituto de enseñanza media de Eibar. Este profesor ya había utilizado el modelo de enseñanza como investigación orientada y se discutió con él el programa de actividades durante tres sesiones de trabajo (8 horas).

Los 5 profesores que aplicaron el programa tenían una dilatada experiencia en el bachillerato (con siete o más años de experiencia). Respecto a la experiencia en el desarrollo de programas de actividades en el aula, 3 de ellos los habían aplicado durante cinco o más años, mientras que los otros dos era la segunda vez que trabajaban con estas estrategias de enseñanza. El profesorado implicado estaba constituido por cuatro licenciados en ciencias químicas y una licenciada en ciencias físicas.

Además de la formación inicial en el seminario, se mantuvieron reuniones de coordinación entre los diferentes profesores y el coordinador del grupo para reflexionar sobre la aplicación del programa en clase y para evaluar la experiencia al final de la aplicación. Así mismo, para facilitar la recogida de información sobre las incidencias de la puesta en práctica del programa de actividades, los profesores realizaron un diario de clase con un formato para evaluar los resultados de las actividades propuestas (Cuadro 2).

DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EVALUAR EL APRENDIZAJE LOGRADO POR LOS ESTUDIANTES

Muestras de estudiantes

La versión del programa de actividades que aquí presentamos se aplicó en 8 grupos experimentales de física y química de 1º de bachillerato, estudiantes de 16-17 años, en los institutos de enseñanza secundaria de Zarautz (5 grupos, 133 estudiantes), Hondarribia (2 grupos, 48 estudiantes) y Eibar (1 grupo, 32 estudiantes). Los estudiantes se pueden considerar de clase media en los tres centros, siendo Zarautz una localidad dedicada preferentemente al sector terciario y turístico, Hondarribia al sector turístico y pesquero y Eibar al sector industrial.

Las muestras de estudiantes de control estuvieron formadas por 6 clases de física y química de 1º de bachillerato de los institutos de enseñanza media de Irún (4 grupos, 74 estudiantes) y Valladolid (2 grupos, 54 estudiantes). Los estudiantes de ambas localidades también pueden considerarse de clase media.

Instrumentos de evaluación

Una de las características principales del modelo de enseñanza-aprendizaje antes descrito es la interdependencia de los contenidos conceptuales, procedimentales y actitudinales. El aprendizaje de los estudiantes será significativo en la medida que su forma de identificar y analizar contextos donde se aplican determinados conceptos se aproxime a la de los científicos. Así pues, para mostrar plausibilidad y posibilidades de la enseñanza realizada será necesario constatar al mismo tiempo las mejoras en los contenidos conceptuales, metodológicos y actitudinales logrados en el aprendizaje. Para ello se han diseñado tres tipos de pruebas.

Cuadro 2

Plantilla para recoger la información obtenida en clase al poner en práctica el programa de actividades.

| ACTIVIDAD | Dificultades de comprensión del enunciado | Construcciones de los estudiantes | Ideas previas de los estudiantes | Principales dificultades observadas | Actividades alternativas |
|-----------|---|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| A.1 | | | | | |
| A.2 | | | | | |
| A.3 | | | | | |
| | | | | | |

El primer diseño tiene como objetivo evaluar el aprendizaje significativo de la magnitud *cantidad de sustancia* por parte de los estudiantes de los grupos experimentales y de control. La prueba consta de dos problemas de estequiometría (Cuadro 3) que aquellos estudiantes realizan en situación de examen, después de haberse impartido este tema. Los mismos ejercicios fueron realizados por los estudiantes de control en circunstancias similares.

Cuadro 3
Problemas para evaluar cómo aplicaron los estudiantes la magnitud *cantidad de sustancia*.

| |
|---|
| <p>1) En dos recipientes herméticamente cerrados A y B tenemos gas ozono (O₃) y gas metano (CH₄) respectivamente, en las mismas condiciones de presión y temperatura. Sabemos que las masas de ozono que hay en el recipiente A y de metano que hay en el recipiente B son iguales. También se sabe que la masa molecular del ozono es el triple que la del metano. A partir de esta información deduce:</p> <p>a) la proporción del número de moléculas en ambos recipientes;</p> <p>b) la proporción de las «cantidades de sustancia» en ambos recipientes.</p> <p>Explicación:</p> |
| <p>2) 8 g de un compuesto desconocido contienen 4 g del elemento X, siendo el resto carbono. ¿Cuál es la fórmula empírica del compuesto? (La masa molar de X es 24 g/mol y la masa molar del carbono es 12 g/mol).</p> <p>Explicación:</p> |

En el análisis de los resultados de esta primera prueba se valoraran dos aspectos. Por una parte, se compararán los porcentajes de respuestas declarativas consideradas como correctas en los grupos experimentales y en los de control. Para decidir si existen o no diferencias significativas entre los grupos experimentales y los de control, se utilizó el parámetro estadístico χ^2 para el nivel de confianza habitual del 5% o menor. Por otra parte, en este primer diseño se han analizado las explicaciones dadas por los estudiantes al resolver los problemas. El análisis de estas estrategias se ha realizado tomando como referencia las consideradas

como expertas en las investigaciones sobre *cantidad de sustancia y mol* (Schmidt, 1994).

El segundo diseño tiene como objetivo profundizar en los razonamientos (conocimiento explicativo) de los estudiantes al resolver las situaciones problemáticas referidas en el diseño anterior. Se realizaron entrevistas individuales a 10 estudiantes de las clases experimentales, que fueron grabadas en cinta magnetofónica y transcritas posteriormente. Se trata de analizar las explicaciones que utilizan los estudiantes y ver si utilizan de modo significativo la magnitud *cantidad de sustancia*, tanto de forma directa (problema 1) como indirecta (problema 2). El análisis de las transcripciones de las entrevistas se hicieron de acuerdo con los criterios de Bowen (1994) y De Jong (1994), invitando a los estudiantes a expresar en voz alta sus pensamiento mientras realizaban la tarea.

El tercer diseño trata de evaluar las actitudes de los estudiantes que han seguido la nueva propuesta de enseñanza hacia el aprendizaje de la química. La prueba consiste en un cuestionario con tres partes. La primera contiene seis proposiciones para que los estudiantes valoren los contenidos trabajados en clase. En la segunda se presentan seis afirmaciones sobre la forma de trabajo en el aula. Finalmente, en la tercera, se valoran cuatro frases que hacen referencia a la satisfacción global de los estudiantes sobre el clima de aula. La valoración se efectúa mediante una escala de 0 a 10 según el nivel de acuerdo con cada frase. En el apartado de resultados expondremos alguna de las valoraciones hechas.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados obtenidos al evaluar las respuestas dadas a los dos problemas de estequiometría planteados

Los porcentajes de resultados finales correctos en los problemas planteados se presentan en la tabla 1 para los 3 grupos experimentales y los 2 de control.

Tabla 1
Porcentajes de resultados finales correctos de los problemas resueltos por estudiantes experimentales y de control.

| Problema | Porcentaje de respuestas finales correctas (%) | | | | | | | |
|--|--|---------------|---------------|--|-------------------|---------------|------------------|----------|
| | Grupos experimentales | | | | Grupos de control | | | χ^2 |
| | (A) N = 133 | (B) N = 48 | (C) N = 32 | Media N = 213 | (D) N = 74 | (E) N = 54 | Media N = 128 | |
| 1. Cálculo de proporciones de N y n. | 56,4 | 54,2 | 40,6 | 53,5 | 20,3 | 11,1 | 14,8 | 48,7 (*) |
| 2. Determinación de la fórmula empírica. | 69,2 | 85,4 | 71,8 | 73,2 | 51,3 | 42,6 | 47,6 | 21,5 (*) |
| (A) Instituto de Zarautz (B) Instituto de Hondarribia (C) Instituto de Eibar | | | | (D) Instituto de Irún (E) Instituto de Valladolid | | | | |
| (*) Diferencia significativa (p < 0,001) | | | | | | | | |

Como podemos observar, las diferencias entre la muestra experimental y la de control respecto a la solución final correcta de los respectivos problemas son significativas. En el problema 1, las diferencias son más apreciables debido a que se trata de una prueba no habitual cuya resolución exige un mayor dominio del cuerpo teórico. En este caso, debido al propio enunciado de la actividad, se han de manejar necesariamente *cantidades de sustancia*. La resolución correcta exige una estrategia experta que utiliza la igualdad entre las razones de las «cantidades de sustancia» y las del número de moléculas respectivas según indica la expresión: $N(\text{CH}_4) / N(\text{O}_3) = n(\text{CH}_4) / n(\text{O}_3)$ (1). Para ello pueden utilizarse las expresiones 2 y 3:

$$m(\text{CH}_4) / m(\text{O}_3) = n(\text{CH}_4) \cdot M(\text{CH}_4) / n(\text{O}_3) \cdot M(\text{O}_3) \quad (2)$$

o bien:

$$m(\text{CH}_4) / m(\text{O}_3) = N(\text{CH}_4) \cdot M_r(\text{CH}_4) / N(\text{O}_3) \cdot M_r(\text{O}_3) \quad (3)$$

donde M y M_r son la masa molar de la sustancia y la masa molecular de la entidad, respectivamente.

El problema 2, sin embargo, se suele proponer habitualmente como ejercicio de estequiometría en los programas de bachillerato, resultando una tarea más familiar a los estudiantes. La resolución resulta más fácil al incluir en este problema datos (las respectivas masas molares de los elementos) que permiten establecer fácilmente la relación entre *masa y cantidad de sustancia*.

Resultados obtenidos al evaluar el conocimiento explicativo de los estudiantes sobre la magnitud *cantidad de sustancia*

Al efectuar el análisis de los argumentos utilizados en la resolución, sólo hemos tenido en cuenta el problema

2 del diseño, ya que, en el problema 1, los estudiantes están obligados por el propio enunciado a manejar *cantidades de sustancia* (estrategia experta de resolución propuesta por Schmidt). Los resultados correctos de la tabla 1 para el problema 1 ponen de manifiesto una correlación directa con la utilización de dicha estrategia.

En la valoración positiva del segundo problema se ha tenido en cuenta, por una parte, que se alcance la solución final correcta (conocimiento declarativo); y, por otra, la estrategia utilizada (habilidad estratégica o explicativa). La estrategia experta, pasa por la utilización de la expresión (2) anteriormente indicada en el problema 1 pero aplicada a este caso (4):

$$m(X) / m(C) = n(X) \cdot M(X) / n(C) \cdot M(C) \quad (4)$$

ya que la proporción $n(X) / n(C)$ coincide con la de las respectivas entidades químicas $N(X) / N(C)$, que permite determinar la fórmula empírica correcta. El cálculo a través de las proporciones $m(X) / A_r(X)$ y $m(C) / A_r(C)$ será considerado como una de las estrategias rutinarias.

Tal y como muestran los resultados de las tablas 1 y 2, al tomar en consideración el manejo significativo de la magnitud *cantidad de sustancia* en la realización de la tarea (estrategia experta), las diferencias entre ambas muestras aumentan notablemente, siendo en ambos problemas estadísticamente significativas. En particular, se observa que, para el cálculo de proporciones de N y de n (problema 1), los resultados de los grupos experimentales triplican, al menos, a los de los grupos de control. En el problema 2 los resultados positivos obtenidos por los grupos experimentales casi triplican a los grupos de control.

En la tabla 3 se comparan los resultados obtenidos en el problema 2 por las muestras de estudiantes encuestados por Schmidt (1994) y las dos presentadas en este trabajo.

Tabla 2
Porcentaje de estrategias expertas en la resolución del problema 2 por estudiantes experimentales y de control.

| Problema | Porcentaje de respuestas finales correctas (%) con estrategia experta | | | | | | | χ^2 |
|--|---|---------------|---------------|------------------|-------------------|---------------|------------------|----------|
| | Grupos experimentales | | | | Grupos de control | | | |
| | (A) N = 133 | (B) N = 48 | (C) N = 32 | Media N = 213 | (D) N = 74 | (E) N = 54 | Media N = 128 | |
| 2. Determinación de la fórmula empírica. | 67,7 | 83,3 | 65,6 | 70,9 | 32,4 | 13,0 | 24,2 | 65,2 (*) |
| (*) Diferencia significativa ($p < 0,001$) | | | | | | | | |

Tabla 3
Determinación de la fórmula empírica.

| Porcentaje de estrategias expertas en los resultados correctos | |
|--|--------|
| Schmidt | 11 % |
| Experimental | 70,9 % |
| Control | 24,2 % |

Los resultados muestran que, al considerar la estrategia experta como criterio de comparación, las diferencias son claramente favorables a la muestra del grupo experimental que siguió el modelo de aprendizaje como investigación orientada.

Razonamiento de los estudiantes de los grupos experimentales al utilizar los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol*

Veamos algunos ejemplos de razonamientos de los estudiantes experimentales, en los que se utiliza una estrategia de resolución que implica el manejo significativo de *cantidades de sustancia*.

Ejemplo 1 (Bernard)

- 01 a) $m(\text{CH}_4) = m(\text{O}_3)$
- 02 $3 \cdot M_r(\text{CH}_4) = M_r(\text{O}_3)$
- 03 $m(\text{O}_3)/m(\text{CH}_4) = N(\text{O}_3) \cdot 3M_r(\text{CH}_4) / N(\text{CH}_4) \cdot M_r(\text{CH}_4)$
- 04 $N(\text{O}_3)/N(\text{CH}_4) = m(\text{O}_3)/3M_r(\text{CH}_4) / m(\text{CH}_4)/M_r(\text{CH}_4) = 1/3$ proporción entre el número de moléculas.
- 05 b) El número de partículas se relaciona con la cantidad de sustancia:
- 06 $n(\text{O}_3)/n(\text{CH}_4) = N(\text{O}_3)/L / N(\text{CH}_4)/L = 1/3$ proporción entre cantidades de sustancia
- 07 He averiguado que la proporción del número de moléculas es 1/3 sabiendo la masa molecular y que las masas son iguales.
- 08 Después he utilizado la fórmula $n = N/L$ para conocer la proporción entre las cantidades de sustancia y me ha salido que por cada
- 09 mol de O_3 hay 3 moles de CH_4 .

Bernard responde correctamente a ambos apartados del problema 1 y utiliza correctamente los conceptos de *cantidad de sustancia* y *mol*.

En el ejemplo que exponemos a continuación la alumna (Eva) trabaja con moles (líneas 3, 5 y 6) y da la respuesta correcta en ambos apartados, aunque no indica explícitamente por qué razón es triple la *cantidad de sustancia* de metano.

Ejemplo 2 (Eva)

- 01 a) Si la masa es igual, por cada mol de mol de O_3 habrá 3 moles
- 02 de CH_4 .
- 03 1 mol de O_3 \longrightarrow 3 moles de CH_4 ,
- 04 por lo que en los recipientes habrá:
- 05 A: x moles de O_3
- 06 B: 3x moles de CH_4
- 07 b) Si en cada mol hay n moléculas y $n = 6,02 \cdot 10^{23}$:
- 08 En el recipiente A habrá: x.n moléculas.
- 09 En el recipiente B habrá: 3x.n moléculas.

Veamos algunos ejemplos de respuestas de los estudiantes experimentales al problema 2, en las que se utiliza una estrategia de resolución que implica el manejo de *cantidades de sustancia*:

Ejemplo 3 (Maialen)

- 01 Masa de X + masa de carbono = Masa total
- 02 $4 \text{ g} + \text{masa de carbono} = 8 \text{ g}$
- 03 $\text{masa de carbono} = 8 \text{ g} - 4 \text{ g} = 4 \text{ g}$
- 04 He aplicado la ley de Lavoisier o principio de conservación de la masa. A partir de la proporción de masa podemos deducir la fórmula empírica. Para lograr la fórmula empírica debemos saber la
- 05 proporción del número de átomos. Los átomos no pueden contarse de cualquier manera. La magnitud para contar partículas
- 06 es la cantidad de sustancia. Contamos las partículas de un modo
- 07 indirecto, pesando los gramos por medio de la balanza.
- 08 Proporción de masa:
- 09 $m_x/m_c = 4 \text{ g}/4 \text{ g}$
- 10 Proporción de cantidad de sustancia ($n = m/M$):
- 11 $n_x/n_c = m_x/M_x / m_c/M_c = 4 \text{ g}/24 \text{ g/mol} / 4 \text{ g}/12 \text{ g/mol} = 48 \text{ mol}$
- 12 $96 \text{ mol} = 1 \text{ mol}/2 \text{ mol}$
- 13 Proporción del número de átomos: $n = N/L$; $N = n \cdot L$
- 14 $N_x/N_c = n_x \cdot L / n_c \cdot L = 1 \text{ átomo}/2 \text{ átomos}$
- 15 Fórmula empírica: XC_2 .

Ejemplo 4 (Eneko)

- 01 Estrategia que voy a utilizar:
- 02 $n = m/M$ $n = N/L$
- 03 proporción de masa \longrightarrow proporción de n \longrightarrow
- 04 proporción de N \longrightarrow fórmula empírica.
- 05 Aplicando el principio de conservación de la masa de Lavoisier
- 06 obtengo la masa de carbono:
- 07 $m_x + m_c = m_{\text{compuesto}}$
- 08 $4 \text{ g X} + m_c = 8 \text{ g compuesto}; m_c = 4 \text{ g}$
- 09 $m_x/m_c = 4/4 = 1/1$
- 10 Utilizando la relación entre masa y cantidad de sustancia, $n = m/M$,
- 11 saco la proporción de n :
- 12 $n_x/n_c = m_x/M_x / m_c/M_c = 1 \text{ g}/24 \text{ g/mol} / 1 \text{ g}/12 \text{ g/mol} = 12/24 = 1/2$
- 13 por cada mol del elemento X hay 2 moles de C. He obtenido la
- 14 proporción de cantidad de sustancia y, utilizando $n = N/L$, obtendré
- 15 la proporción entre el número de átomos.
- 16 $n_x/n_c = N_x/L / N_c/L = N_x/N_c = 1/2$
- 17 Por cada átomo del elemento X hay 2 átomos del elemento C. De
- 18 este modo he conseguido la fórmula empírica: C_2X .

En los dos ejemplos, ambos estudiantes experimentales utilizan una estrategia de resolución semejante partiendo de la proporción en masa de los respectivos elementos en el compuesto, si bien Eneko previamente explicita la estrategia que va a emplear. Ambos utilizan la proporción de las respectivas «cantidades de sustancia» de ambos elementos y, a partir de ella, determinan la proporción de átomos de cada uno en el compuesto y, por consiguiente, la fórmula empírica.

Resultados obtenidos al medir las actitudes hacia el aprendizaje de la química de los estudiantes experimentales

Para finalizar, vamos a presentar los resultados obtenidos al analizar la incidencia del programa alternativo en las actitudes de los estudiantes hacia el aprendizaje. La tabla 4 recoge algunos de los resultados medios obtenidos al aplicar el diseño correspondiente a estudiantes de los grupos experimentales.

Tabla 4
Valoración de la enseñanza recibida por los estudiantes experimentales.

| Aspecto estudiado | 1º de bachillerato | | | |
|--|--------------------|---------------|---------------|------------------|
| | (A) N = 95 | (B) N = 47 | (C) N = 31 | Media N = 173 |
| 1. Contenidos trabajados | | | | |
| 1.1. Cantidad de contenidos adecuada | 6,7 | 6,4 | 6,8 | 6,6 |
| 1.2. Claridad de objetivos | 5,6 | 6,0 | 5,8 | 5,7 |
| 1.3. Objetivos interesantes | 6,1 | 6,1 | 5,6 | 6,0 |
| 1.4. Dificultad adecuada | 6,7 | 6,9 | 6,0 | 6,6 |
| 1.5. Relación entre conceptos | 6,2 | 6,7 | 6,2 | 6,3 |
| 1.6. Bien organizado | 6,3 | 6,6 | 7,0 | 6,5 |
| 2. Forma de trabajo | | | | |
| 2.1. Método adecuado | 6,2 | 6,0 | 7,1 | 6,3 |
| 2.2. Condiciones para aprender | 6,1 | 6,2 | 6,8 | 6,3 |
| 2.3. Actividades adecuadas | 6,7 | 6,9 | 7,0 | 6,8 |
| 2.4. Puestas en común | 6,1 | 7,0 | 7,4 | 6,6 |
| 2.5. Buen clima de trabajo | 6,3 | 6,5 | 7,6 | 6,6 |
| 2.6. Forma de trabajo discutida con los estudiantes | 4,2 | 4,6 | 5,7 | 4,6 |
| 3. Satisfacción | | | | |
| 3.1. Clases interesantes | 5,7 | 5,9 | 6,2 | 5,8 |
| 3.2. No quiero que llegue la clase | 4,7 | 4,7 | 4,8 | 4,7 |
| 3.3. Menos horas de clase | 4,1 | 4,0 | 3,2 | 3,9 |
| 3.4. Clima de cooperación | 6,3 | 5,9 | 7,2 | 6,4 |
| (A) Instituto de Zarautz (B) y (D) Instituto de Hondarribia (C) Instituto de Eibar | | | | |

Teniendo en cuenta que la puntuación 5 sería neutra, parece que los estudiantes experimentales, en general, muestran su interés y aceptación con los aspectos generales relativos a la puesta en práctica del programa de actividades. Los estudiantes reconocen que el programa está bien organizado y que las actividades son adecuadas. Respecto a la forma de trabajar en el aula, los estudiantes muestran su buena aceptación y valoran positivamente cinco de los seis ítems propuestos. A pesar de ello, la discusión previa con los estudiantes sobre la forma de trabajo a desarrollar (ítem 2.6) será un aspecto a mejorar. En el tercer apartado, los estudiantes expresan un moderado interés por el tema tratado (ítem 3.1.) y su acuerdo con el clima de cooperación que ha habido en las clases (ítem 3.4).

CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado, de forma breve, una propuesta de enseñanza de los conceptos de *cantidad de sustancia* y *mol* basada en la investigación en didáctica de las ciencias. Las estrategias de enseñanza mostradas se sitúan dentro del paradigma constructivista del proceso de enseñanza-aprendizaje y, en concreto, dentro del denominado modelo de aprendizaje como investigación orientada (Furió, 2001; Gil et al., 1999).

Los resultados obtenidos parecen poner de manifiesto que los estudiantes debidamente orientados en un contexto de enseñanza-aprendizaje como investigación orientada son

capaces de utilizar con comprensión conceptos de alto nivel de dificultad como los tratados. Los estudiantes de los grupos experimentales, además de resolver satisfactoriamente ejercicios estequiométricos, utilizan estrategias de resolución en las que manejan de modo significativo la magnitud *cantidad de sustancia*, al contrario de lo que ocurre con la mayoría de los estudiantes de control, poniéndose de manifiesto, tal y como refiere Schmidt (1994), que la resolución correcta de ejercicios estequiométricos no implica necesariamente que los estudiantes dominen los conceptos implicados. Así mismo, los estudiantes experimentales muestran una actitud positiva hacia los conceptos tratados y la forma de trabajarlos en clase, siendo un aspecto a mejorar la promoción de un mayor interés por los contenidos y la consideración de sus opiniones al comienzo de programa.

Es necesario resaltar el esfuerzo realizado por los profesores que voluntariamente se prestaron a desarrollar el programa alternativo y las dudas que expresaron al comienzo de su implicación. En un contexto de enseñanza, el bachillerato, que no propicia los esfuerzos de innovación y que se ve condicionada por la prueba de acceso a la universidad, una de las primeras preocupaciones del profesorado fue si los estudiantes experimentales lograrían el mismo nivel de aprendizaje repetitivo de determinados algoritmos tipo para resolución de problemas estándar que los estudiantes de control. Las pruebas de la evaluación continua que se realizaron pronto lograron disminuir esta inquietud. Otra de las principales inquietudes manifestada por los profesores fue el tiempo necesario para llevar a cabo el programa de actividades y la

adecuación de las actividades para los estudiantes. Como hemos indicado, el dominio por parte del profesor de los contenidos implicados (conceptuales y epistemológicos) y su entrenamiento en las nuevas estrategias de enseñanza son básicos para desarrollar el programa en un tiempo que no condicione el programa general del curso.

Como conclusiones de la experiencia realizada, los profesores que participaron en el desarrollo del programa de actividades con sus estudiantes indicaron que el programa había servido para mejorar sus ideas sobre estos conceptos y que era adecuado para llevarlo a la práctica con los estudiantes. Todos los profesores coincidían en indicar que es necesario dejar tiempo suficiente a los estudiantes para realizar las actividades pero que no lo pierdan en cuestiones ajenas al trabajo. En este sentido, indicaron que es fundamental que el profesor sea capaz de interesar en el trabajo a la mayoría de los estudiantes y que fueron muy

útiles las actividades de introducción al tema y las relacionadas con problemas CTSA. Asimismo consideraron que el programa de actividades les había resultado más satisfactorio que la forma de enseñar habitual considerando que los estudiantes también habían comprendido mejor los conceptos. En este sentido, todos los profesores indicaron que, al principio, tenían dudas de si sus estudiantes no llegaría a aprender a resolver problemas habituales como los estudiantes de control, pero que, a medida que veían el trabajo de sus estudiantes, las dudas iban desapareciendo.

Creemos que la vía de la enseñanza-aprendizaje como investigación orientada utilizada en este trabajo abre nuevos y fructíferos modos de actuación, a través de la implicación de profesorado y alumnado en una tarea de carácter colectivo, en sintonía con las aportaciones de la investigación didáctica, y promueve una labor docente más eficaz, creativa y satisfactoria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZCONA, R. (1997). «Análisis crítico de la enseñanza-aprendizaje de los conceptos de *cantidad de sustancia* y de *mol*. Una alternativa didáctica basada en el aprendizaje por investigación». Tesis doctoral. San Sebastián: Facultad de Ciencias químicas. Universidad del País Vasco.
- AZCONA, R., FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (2002). Algunas reflexiones sobre la magnitud *cantidad de sustancia* y su unidad el *mol*. Implicaciones para su enseñanza. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 98(3), pp. 30-33.
- AZCONA R., FURIÓ C., INTXAUSTI S. y ÁLVAREZ A. (2004). ¿Es posible aprender los cambios químicos sin comprender qué es una sustancia? Importancia de los prerrequisitos. *Alambique*, 40, pp. 7-17.
- BÁRCENAS, S. L. (2000). «Análisis crítico de la enseñanza-aprendizaje de las reacciones ácido-base en el bachillerato. Una propuesta alternativa basada en el aprendizaje por investigación dirigida». Tesis doctoral. Valencia: Universidad de Valencia.
- BOWEN, C.W. (1994). Think-aloud methods in Chemistry education. *Journal of Chemical Education*, 71(3), pp. 184-190.
- BROCK, W. H. (1967). *The Atomic Debates. Brodie and the Rejection of the Atomic Theory*. Gran Bretaña: Leicester University Press.
- BURBULES, N. y LINN, M. (1991). Science Education and Philosophy of Science: Congruence or Contradiction? *International Journal of Science Education*, 13 (3), pp. 227-241.
- DE JONG, O. (1994). Protocol análisis as a fruitful method of research in science education. *Second European Summer School for Research in Science Education*. Tesalónica. Grecia.
- DIERKS, W. (1981). Teaching the mole. *European Journal of Science Education*, 3(2), pp. 145-148.
- DRIVER, R. y OLDDHAM, V. (1986). A Constructivist Approach to Curriculum Development in Science. *Studies in Science Education*, 13, pp. 105-122.
- DRIVER, R., LEACH, J., SCOTT, P. y WOOD-ROBINSON, C. (1994). Young people's understanding of science concept: implications of cross-age studies for curriculum planning. *Studies in Science Education*, 24, pp. 75-100.
- DUHEM, P. (1910). *Thermodynamique et Chimie. Leçons élémentaires*. París: Hermann et fils editeurs.
- DUSCHL, R.A. (1990). *Restructuring science education. The importance of theories and their development*. Nueva York: Teachers College Press.
- DUSCHL, R. y GITOMER, D. (1991). Epistemological Perspectives on Conceptual Change: Implications for Educational Practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), pp. 839-858.
- FURIÓ, C. (2001). La enseñanza-aprendizaje de las ciencias como investigación: un modelo emergente, en Guisasola, J. y Pérez de Eulate, L. (eds.). *Investigaciones en didáctica de las ciencias experimentales basadas en el modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación orientada*. Bilbao: Universidad del País Vasco.
- FURIÓ, C. y GIL, D. (1978). *El programa-guía: una propuesta para la renovación de la didáctica de la física y química en el bachillerato*. Universitat de Valencia - ICE.
- FURIÓ, C., AZCONA, R., GUIASOLA, G. y MUJICA, E. (1993). Concepciones de los estudiantes sobre una magnitud «olvidada» en la enseñanza de la química: la cantidad de sustancia. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), pp. 107-114.
- FURIÓ, C., AZCONA, R., GUIASOLA, J. y RATCLIFFE, M. (2000). Difficulties in teaching the concepts of «amount of substance» and «mole». *International Journal of Science Education*, 22(12), pp. 1285-1304.
- FURIÓ, C., AZCONA, R. y GUIASOLA, J. (2002). The learning and teaching of the concepts «amount of substance» and «mole». A review of the literature. *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 3(3), pp. 277-292.
- FURIÓ, C., GUIASOLA, J., ALMUDÍ, J.M. y CEBERIO, M. (2003). Learning the electric field concept as oriented research activity. *Science Education*, 87(6), pp. 640-662.

- FURIÓ, C., HERNÁNDEZ, J. y HARRIS, H. (1987). Parallels between adolescents' conceptions of gases and the history of Chemistry. *J. Chem. Educ.*, 64(7), pp. 617-618.
- GABEL, D.L. y BUNCE, D.M. (1994). Research on problem solving: Chemistry, en Gabel, D.L. (ed.). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. Nueva York: MacMillan Publishing Company.
- GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIÓ, C. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. Barcelona: ICE-Horsori.
- GIL, D., FURIÓ, C., VALDÉS, P., SALINAS, J., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., GUIASOLA, J., GONZÁLEZ, J., DUMAS-CARRÉ, A., GOFFARD, M. y PESSOA, A.M. (1999). ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2), pp. 311-320.
- GIL, D., GUIASOLA, J., MORENO, A., CACHAPUZ, A., PESSOA DE CARVALHO, A., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., SALINAS, J., VALDÉS, P., GONZÁLEZ, E., GENÉ, A., DUMAS-CARRÉ, A., TRICÁRICO, H. y GALLEGU, R. (2002). Defending constructivism in science education. *Science Education*, 11, pp. 557-571.
- GUGGENHEIM, E.A. (1961). The mole and related quantities. *Journal of Chemical Education*, 30(2), pp. 86-87.
- HODSON, D. (1992). In Search of a Meaningful Relationship: An Exploration of Some Issues Relating to Integration in Science and Science Education. *International Journal of Science Education*, 14(5), pp. 541-566.
- HOLTON, G. y ROLLER, D. (1963). *Fundamentos de física moderna*. Barcelona: Reverté.
- KOLB, D. (1978). The mole. *Journal of Chemical Education*, 55(1), pp. 728-732.
- KRISHNAN, S.R. y HOWE, A.C. (1994). The mole concept developing an instrument to assess conceptual understanding. *Journal of Chemical Education*, 71(8), pp. 653-655.
- LAZONBY, J.N., MORRIS, J.E. y WADDINGTON, D.J. (1985). The mole: questioning format can make a difference. *J. Chem. Edu.*, 62(1), pp. 60-61.
- MILLAR, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education* 1, pp. 587-596.
- MILLS, I.M., CVITAS, T., HOMANN, K., KALLAY, N. y KUCHITSU, K. (1993). IUPAC. *Quantities, units and symbols in physical chemistry*. Oxford: Blackwell.
- MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., DOMÉNECH, J.L. y VERDÚ, R. (1993). Del derribo de ideas al levantamiento de puentes: la epistemología de la ciencia como criterio organizador de la enseñanza en las ciencias física y química. *Currículo*, 6-7, pp. 67-89.
- MORTIMER, E. (1995). Conceptual change or a conceptual profile change? *Science y Education*, 4, pp. 267-285.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1996). National Science Education Standards. Washington DC: National Academic Press.
- NERSESSIAN, N.J. (1989). Conceptual change in science and in science education. *Synthese*, 80, pp. 163-183.
- OLIVA J.M. (1999). Algunas reflexiones sobre las concepciones alternativas y el cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias* 17(1), pp. 109-114.
- OSBORNE, R. y WITTROCK, M. (1983). Learning Science: A Generative Process. *Science Education*, 67, pp. 490-508.
- OSTWALD, W. (1900). *Grundlinien der Anorganischen Chemie*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann.
- POSNER, G., STRIKE, K., HEWSON, P. y GERTZOG, W. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Sci. Educ.*, 66(2), pp. 221-227.
- PRIETO, T., BLANCO, A. y BRERO, V. (2002). La progresión en el aprendizaje de dominios específicos: una propuesta para la investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, pp. 3-14.
- RAHAYU, S. y TITLER, R. (1999). Progression in Primary School childrens' conceptions of burning: towards an understanding of the concept of substance. *Research in Science Education*, 29(3), pp. 295-312.
- ROCKE, A.J. (1984). *Chemical Atomism in the Nineteenth Century. From Dalton to Cannizaro*. Columbus: Ohio State University Press.
- SCHMIDT, H. J. (1994). Stoichiometry problem solving in high school Chemistry. *Int. J. of Science Education*, 16(2), pp. 191-200.
- SOLBES, J. y TARIN, F. (2004). La enseñanza del principio de conservación de la energía: una propuesta y unos resultados. *Enseñanza de las Ciencias* (aceptado para su publicación).
- SOLOMON, J. (1991). Teaching about the nature of science in the British National Curriculum. *Science Education*, 75(1), pp. 95-103.
- STAVER, J.R. y LUMPE, A.T. (1995). Two Investigations of students' understanding of the mole concept and its use in problem solving. *Journal of Resources in Science Teacher*, 32(2), pp. 177-193.
- STRIKE, K.A. y POSNER, G.J. (1992). A revisionist theory of conceptual change, en Duschl, R.A. y Hamilton, R.J. (eds.). *Philosophy of science, cognitive psychology and educational theory and practice*, pp. 147-176. Albany, NY: SUNY Press.
- STRÖMDAHL, H., TULBERG, A. y LYBECK, L. (1994). The qualitatively different conceptions of 1 mol. *International Journal of Science Education*, 16(1), pp. 17-26.
- THUILLIER, P. (1990). *De Arquímedes a Einstein. Las caras de la invención científica*, 2. Madrid: Alianza Editorial.
- TULLBERG, A., STRÖMDAHL, H. y LYBECK, L. (1994). Students' conceptions of 1 mol and educators' conceptions of how they teach «the mole». *International Journal of Science Education*, 16(2), pp. 145-156.
- WANDERSEE, J.H. (1992). The historicity of cognition: Implications for science education research. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, pp. 423-434.

[Artículo recibido en junio de 2004 y aceptado en agosto de 2005]