

Algunas consideraciones clave, pero generalmente olvidadas, para lograr la comprensión del concepto de cantidad de sustancia

Amparo Vilches y Daniel Gil Pérez¹

ABSTRACT (Some key considerations, usually omitted, for a full understanding of the concept of Amount of substance)

The understanding and correct use of the magnitude *Amount of substance* and its unit, the *mole*, presents serious difficulties, not only for students but even for teachers. Abundant research has shown the frequency of some erroneous conceptions shown by teachers and textbooks, which interpret amount of substance either as number of particles or, more frequently as mass... or even ignore the new magnitude, using the mole as "atomic or molecular mass, given in grams".

Our aim here is to confront teachers' difficulties, discussing *the ensemble of reasons* that justify the necessity of introducing amount of substance. This complete analysis is something that has not been undertaken, to the best of our knowledge, in either textbooks or the abundant literature on this magnitude, thereby hindering the meaningful understanding of the concept.

KEYWORDS: amount of substance, mole, fundamental units, teachers' difficulties

Introducción

La comprensión y manejo de la magnitud '*cantidad de sustancia*' y su unidad, el *mol*, plantea serias dificultades, no sólo a los alumnos (Novick y Menis, 1976; Gabel y Sherwood, 1984; Balocchi *et al.*, 2006), sino a los mismos profesores. Autores como Furió, Azcona y Guisasola (2002) y Rogado (2004) han realizado detenidas revisiones de las numerosas investigaciones centradas en el estudio de estas dificultades, mostrando la amplitud de las interpretaciones incorrectas de los propios docentes y libros de texto, que suelen asimilar cantidad de sustancia a número de partículas o, más frecuentemente, a masa (Staver y Lumpe, 1993) o que simplemente ignoran la nueva magnitud (Furió *et al.*, 1993; Garritz *et al.*, 2002), limitándose a manejar el mol como "*masa atómica o molecular expresada en gramos*" (Rogado, 2004). Nos remitimos a las amplias bibliografías manejadas por los autores indicados.

Nuestro propósito es abordar aquí las dificultades de los docentes, conscientes de que los alumnos se enfrentan a algunas otras que requieren estrategias específicas (Azcona, 1997; Garritz *et al.*, 2002; Rogado, 2004; Balocchi *et al.*, 2006; Furió, Azcona y Guisasola, 2006), pero también de que difícilmente se podrán lograr avances en el aprendizaje de estos

conceptos mientras no se superen las dificultades de los propios profesores (Furió, Azcona y Guisasola, 1999 y 2006; Padilla *et al.*, 2008). Para enfrentar las dificultades de estos últimos consideraremos las *razones* (y enfatizamos el plural) que justifican la necesidad de la magnitud '*cantidad de sustancia*'; algo que no hemos visto que se realice de *forma completa*, ni en los libros de texto ni en la abundante literatura dedicada a esta problemática.

No es nuestra intención proceder aquí a una consideración del complejo proceso histórico que condujo a introducir la cantidad de sustancia como una nueva magnitud fundamental, ya en la década de los 60 del pasado siglo, más de medio siglo después de la introducción del mol por Oswald en 1900. Un proceso histórico realmente apasionante cuyo estudio es muy recomendable, ya que contribuye a hacer comprender la forma en que se construye el conocimiento científico (Fernández *et al.*, 2005; Padilla y Furió, 2008), pues constituye un ejemplo paradigmático de la compleja evolución de los conceptos y teorías científicas y del papel jugado por debates ontológicos como el que enfrentó a atomistas como Dalton o Avogadro con empiristas como Mach, que rechazaban la existencia de todo lo que no fuera visible y tangible (Matthews, 1994; Furió y Padilla, 2003; Balocchi *et al.*, 2006; Furió, Azcona y Guisasola, 2006; Criswell, 2008; Padilla *et al.*, 2008). Pero aquí pretendemos centrarnos en discutir las razones por las cuales creemos que se consideró necesario —cuando la teoría atómica fue universalmente aceptada— introducir una nueva magnitud fundamental, no siendo suficiente la magnitud masa para el estudio de ciertos procesos como, muy especialmente, las reacciones químicas.

¹ Universitat de València.

Teléfono: 34 96 361 6193.

Correo electrónico: Amparo.Vilches@uv.es

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2009.

Fecha de aceptación: 1 de diciembre 2009

¿Por qué no basta con la magnitud masa?

Podemos comenzar recordando que en muchos de los fenómenos considerados en física, en los que interviene la masa de los objetos, la naturaleza de los mismos no suele tener importancia: toda la materia, por ejemplo, tiene la propiedad gravitatoria y una esfera de m kg de acero u otra de los mismos kg de plomo (que se encuentren a la misma distancia del centro de la Tierra) son atraídas con igual fuerza por la Tierra (y ejercen idéntica fuerza sobre la misma). No nos importa la composición de la esfera, sólo su masa, *como medida de la cantidad de materia*, del tipo que sea, que contiene. Y esa cantidad, que denominamos masa, puede medirse recurriendo a alguna propiedad general de la materia como la inercia a cambiar de estado de movimiento o la atracción gravitatoria experimentada a una cierta distancia del centro de la Tierra.

Otros fenómenos, sin embargo, dependen muy determinadamente de la naturaleza de los materiales que intervienen. Un caso paradigmático (pero no el único) es el de las reacciones químicas. Para estudiar una reacción es esencial conocer qué sustancias intervienen y cuáles se forman. Ya no basta con hablar de masa (es decir, de cantidad de materia en general), sino que es preciso referirse a cantidades de *sustancias específicas*: no es posible trabajar en química sin referirse a las sustancias específicas que intervienen, y las cantidades que interesa conocer son las cantidades de esas sustancias.

Ésta es una razón para la introducción de la nueva magnitud fundamental '*cantidad de sustancia*', que representaremos por " n ". Una razón que se olvida habitualmente al explicar esa nueva magnitud, lo que dificulta la comprensión de su necesidad. De hecho no hemos encontrado en la literatura ningún estudio que haga referencia a la distinción entre fenómenos y procesos en los que la naturaleza de los objetos no juega ningún papel (y basta, por tanto, considerar las masas como expresión de las cantidades de materia que intervienen) y otros procesos en los que esa naturaleza es fundamental, como ocurre en las reacciones químicas, las desintegraciones radiactivas, etc.

Este olvido es debido, en buena medida, al hecho de que la consideración de la especificidad de las sustancias que intervienen en una reacción química es tan obvia que parece no precisar reflexión alguna: por ello mismo no se es consciente de que al decir m gramos de hidrógeno no estamos refiriéndonos sólo a una masa (que mide la cantidad de materia sea cual sea su naturaleza) sino a una cantidad de sustancia *específica*.

Otra razón del olvido sería, en nuestra opinión, el manejo meramente operativo de la magnitud masa y en realidad de todas las magnitudes, como viene señalando la investigación didáctica (Carrascosa, Gil Pérez y Valdés, 2005), sin la necesaria reflexión acerca del propósito de medir mediante la misma la cantidad de materia (sea cual sea su naturaleza); medida vinculada, por tanto, con la existencia de propiedades genéricas de la materia, como la atracción gravitatoria o la inercia de los objetos a permanecer en el estado de movimiento en que se encuentran mientras no interactúen con otros.

En relación a esta falta de reflexión acerca del significado de la magnitud masa y su vinculación con la cantidad de materia, resulta ilustrativo que en francés y también en portugués se denomine *cantidad de materia* a la nueva magnitud que en inglés o en castellano denominamos, más apropiadamente, *cantidad de sustancia* ("*Stoffmenge*" en el original alemán) (Rogado, 2004); se produce así una confusión entre cantidad de materia y cantidad de sustancia que no contribuye, claro está, a dar sentido a los conceptos.

Merece la pena insistir en la importancia de la introducción significativa de los conceptos (Carrascosa, Gil Pérez y Valdés, 2005): el manejo de la magnitud masa, por ejemplo, supone haber intuido —y llegado a establecer experimentalmente— que existen propiedades genéricas de toda la materia (atracción gravitatoria, inercia...) cuya intensidad depende, pues, de la cantidad de materia y no de su naturaleza.

Esta reflexión acerca de lo que mide la masa y de su insuficiencia para el estudio de los procesos que dependen de la especificidad de las sustancias que intervienen nos ofrece una primera razón para la introducción de la nueva magnitud. Pero se trata de una razón insuficiente, en sí misma, para comprender plenamente la necesidad de la nueva magnitud y de su unidad el mol: al fin y al cabo, cabría pensar, se podrían seguir manejando masas, añadiendo a sus valores la indicación de a qué sustancias corresponden (algo que, lógicamente, siempre se ha hecho en química y que no tendría sentido ignorar).

No haría falta según esto introducir una nueva magnitud fundamental ni definir la unidad correspondiente, pues no comportaría ninguna ventaja real. Convendría, eso sí, una reflexión explícita acerca de la distinción entre los procesos en los que sólo influye la cantidad de materia y aquéllos en que tiene importancia su naturaleza y que van acompañados de transformaciones profundas de las entidades que intervienen, lo que nos pone en contacto con otro nivel de organización de la materia. Estas consideraciones cualitativas son, por supuesto, muy convenientes, pero no parecen exigir la introducción de una nueva magnitud. Existe, sin embargo, otra razón de peso que justifica esa introducción. Nos referiremos a ella en el siguiente apartado.

¿Qué aporta la introducción de la magnitud cantidad de sustancia y su unidad el mol?

Conviene comenzar insistiendo en que las magnitudes introducidas por la comunidad científica en los distintos campos de conocimiento son deudoras de los conocimientos adquiridos en dichos campos. Por ejemplo, la magnitud *masa* conlleva, como ya hemos señalado, la comprensión de la existencia de propiedades genéricas de toda la materia cualquiera sea su naturaleza, lo que, a su vez, supone el establecimiento de todo un cuerpo de conocimientos teóricos y experimentales. Y lo mismo ocurre con cualquier otra magnitud.

En algún caso, como, por ejemplo, el de la magnitud "longitud" y su unidad el "metro", el proceso podría suponerse más simple, incluso trivial (así suele enseñarse, lamentable-

mente). Pero basta asomarse al proceso histórico del establecimiento del metro —algo que recomendamos vivamente (Alder, 2003)— para comprender toda la apasionante aventura del pensamiento y de la acción que exigió su definición inicial, basada en el uso de un patrón de longitud natural y, por tanto, universal: el meridiano terrestre. Una aventura del conocimiento que la búsqueda de una mayor precisión y reproducibilidad siguió impulsando, por lo que se pasó a asociar la definición del metro a longitudes de onda correspondientes a un determinado salto cuántico y finalmente, dada la precisión alcanzada en la medida de intervalos de tiempo mediante los relojes atómicos, se llegó a la definición actual, establecida en 1983 por la XVII Conferencia General de Pesas y Medidas, como “la distancia recorrida por la luz en el vacío en una fracción $1/299792458$ de segundo”.

Nos hemos referido a estos ejemplos para dejar claro que la introducción de una magnitud fundamental y de su unidad no constituye, en ningún caso, un hecho trivial. Esto es algo a lo que sin embargo no se suele hacer referencia en la enseñanza habitual y cuyo olvido constituye un obstáculo para la comprensión de la naturaleza de la ciencia al no mostrar los problemas que están en el origen de la construcción de los conocimientos científicos, ignorando que, como afirma Bachelard (1938), todo conocimiento es la respuesta a una cuestión, a un problema. Y este olvido dificulta la comprensión del proceso científico y hace que los conocimientos aparezcan como construcciones arbitrarias (Fernández *et al.*, 2005).

Para el caso que aquí nos ocupa de la magnitud *cantidad de sustancia* y de su unidad el *mol*, su comprensión exige tomar en consideración conocimientos fundamentales establecidos en el desarrollo de la química: exige comprender que, como ha llegado a mostrar la teoría atómica (aceptada tras décadas de conflictos), los procesos químicos son el fruto de interacciones que tienen lugar entre entidades elementales discretas (átomos, moléculas, iones...) que intervienen en proporciones determinadas y en general muy simples. Así, por ejemplo, la liberación de energía que se produce al hacer reaccionar incluso pequeñas cantidades de hidrógeno gas (constituido por moléculas H_2) y oxígeno gas (moléculas de O_2) es el resultado de la interacción de trillones de moléculas de ambas sustancias en una proporción muy sencilla (cada molécula de oxígeno reacciona con dos moléculas de hidrógeno dando lugar a dos moléculas de agua). En el estudio de una reacción, de un cambio químico, interesa conocer, pues, además de cuáles son las sustancias que intervienen, *cuáles son las entidades elementales que intervienen y en qué proporción lo hacen* (en unas condiciones que favorezcan su interacción). Ésas son informaciones que se precisan para hacer predicciones y planificar procesos. Y la magnitud cantidad de sustancia se apoya en dichos conocimientos y facilita su manejo. Su introducción, en definitiva, remite a la teoría atómico-molecular y a una doble necesidad:

- manejar sustancias específicas y
- facilitar el manejo del elevado número de entidades elementales de dichas sustancias que intervienen en un pro-

ceso real para, por ejemplo, realizar cálculos estequiométricos.

No se trata, por supuesto, de contar los trillones de partículas de cada sustancia que intervienen en cualquier proceso químico ordinario. Necesitamos una *unidad* manejable de cantidad de sustancia y que se corresponda fácilmente, a la vez, con números definidos de partículas y con masas determinadas de las sustancias (puesto que lo que manejamos operativamente, lo que podemos medir con facilidad, son masas). Para ello, como sabemos, basta considerar masas de cada sustancia proporcionales a las masas atómicas o moleculares relativas *Mr*. Ésa es la razón de tomar como unidad de cantidad de sustancia el mol, definido así por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada): “*The mole is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon-12*”. De ese modo se tiene el mismo número de átomos de hidrógeno en 1 g de hidrógeno que átomos de carbono en 12 de carbono y ese número coincide con el de moléculas H_2 en 2 g de hidrógeno, o de moléculas CH_4 en 16 g de metano, etc. Este número de entidades contenidas en un mol de cualquier sustancia se denomina “Constante de Avogadro”, cuyo valor se ha determinado experimentalmente por diversos procedimientos con el siguiente resultado: $N_A = (6,0221417 \pm (3 \times 10^{-7}) \times 10^{23}$ entidades elementales/mol (o bien mol^{-1}).

Podemos, así, decir que el oxígeno diatómico reaccionará con el hidrógeno diatómico en la *proporción* de 1 mol de moléculas de O_2 (cuya masa es de 32 g) por 2 moles de moléculas de H_2 (4g de masa) para dar 2 moles de moléculas de agua (36g de masa).

Al utilizar cantidades de sustancias, medidas en moles, las cantidades manejadas en los problemas estequiométricos adquieren significatividad, puesto que traducen directamente las proporciones, generalmente muy simples, en que intervienen las entidades microscópicas en el proceso químico.

En definitiva, la nueva magnitud ‘cantidad de sustancia’, *n*, y su unidad el *mol*, se introducen porque son necesarias al trabajar con sustancias *específicas* (que hemos de saber aislar, reconocer y manejar) que intervienen en las transformaciones químicas en forma de *entidades discretas* (átomos, moléculas, iones...).

De acuerdo con las consideraciones precedentes debe quedar claro que *el mol no es una cierta masa*, no es una unidad más (introducida por razones de comodidad) de la magnitud fundamental masa. Ello supondría olvidar lo que se refiere al número de entidades, que constituye un aspecto esencial de la nueva magnitud.

También debe quedar claro que el mol *no es tampoco un número de partículas*: ello llevaría a no tomar en consideración lo que, sin duda, es el otro aspecto fundamental, el carácter específico de las partículas que intervienen. El mol resulta ser, como expresa su definición, una cierta cantidad de sustancia, una unidad de una nueva magnitud fundamental, la cantidad de sustancia, que incorpora y vincula tanto el conocimiento

químico macroscópico acerca de las propiedades de las sustancias (sin lo cual ni siquiera podríamos aislarlas), como el microscópico acerca de las entidades que intervienen en las reacciones químicas.

Así pues, hay que tener cuidado en no confundir la magnitud 'cantidad de sustancia' con otras magnitudes como masa, volumen o número de partículas *con las que se relaciona*. Se puede determinar la cantidad de sustancias, n , de moléculas de hidrógeno contenida en m gramos de hidrógeno dividiendo m por la Mr del hidrógeno (la masa de un mol de moléculas de hidrógeno); se obtiene así la cantidad de sustancia (antes erróneamente denominada número de moles) n de moléculas de hidrógeno dividiendo, podríamos decir, dos masas, una expresada en gramos y la otra, la masa molecular relativa, en gramos/mol ($n = m/Mr$), *pero ello no significa que el mol sea una unidad de masa*, es decir, de cantidad de materia.

Del mismo modo se puede calcular esta cantidad de sustancia dividiendo el número N de moléculas de hidrógeno contenidas en los m gramos por el número N_A de partículas contenidas en un mol de cualquier sustancia, es decir, dividiendo dos números de partículas ($n = N/N_A$) (número de partículas dividido por el número de partículas/mol), pero de nuevo hay que insistir en que el mol no es una unidad de número de partículas, sino de cantidad de sustancia.

Últimas consideraciones

Podemos resumir afirmando que, si lo que se pretende es la comprensión del concepto de cantidad de sustancia y su unidad el mol venciendo las dificultades —es decir, evitando las interpretaciones incorrectas a las que se refiere una abundante literatura—, será necesario plantear, desde el principio, una reflexión cualitativa que haga ver la importancia, *en determinados procesos como son las reacciones químicas*, de la naturaleza de las sustancias que intervienen y del hecho de que las interacciones tienen lugar entre entidades elementales microscópicas.

Ello permite llamar la atención sobre el hecho de que *la química estudia un nuevo nivel de organización de la materia no reducible al de la mecánica* (en el que la magnitud masa es suficiente como expresión de cantidad de materia). De hecho, las dificultades relacionadas con la introducción de la nueva magnitud están asociadas a la resistencia inicial que se produjo históricamente a aceptar la teoría atómico-molecular y a una tendencia más o menos inconsciente al reduccionismo mecanicista. Un reduccionismo que no ha sido, creemos, bien estudiado, pero que intuimos bastante extendido y que merecería ser investigado, como parte del estudio del proceso histórico que condujo a la introducción de la nueva magnitud. Algo esencial, como ya hemos señalado, para una plena comprensión de su significado y para favorecer un conocimiento contextualizado capaz de despertar un mayor interés.

Referencias

Alder, K., *La medida de todas las cosas*. Madrid, España: Editorial Taurus, 2003.

Azcona, R., *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, España: Universidad del País Vasco, 1997.

Bachelard, G., *La Formation de L'esprit scientifique*, Paris, France: Vrin, 1938.

Balocchi, E., Modak, B., Martínez, M., Padilla, K., Reyes, F. y Garritz, A., Aprendizaje cooperativo del concepto cantidad de sustancia con base en la teoría atómica de Dalton y la reacción química. Parte III. Concepciones acerca de la 'Cantidad de sustancia' y de su unidad 'el mol', *Educ. quim.*, 17(1), 14-32, 2006.

Carrascosa, J., Gil Pérez, D. y Valdés, P., ¿Cómo hacer posible el aprendizaje de conceptos y teorías? En: Gil-Pérez, D., Macedo, B., Martínez Torregrosa, J., Sifredo, C., Valdés, P. y Vilches, A. (eds.), *¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años* (pp. 123-140), Santiago de Chile, Chile: OREALC/UNESCO, 2005.

Criswell, B., Teaching Avogadro's Hypothesis and Helping Students to See the World Differently, *Journal of Chemical Education*, 85(10), 1372-1376, 2008.

Fernández, I., Gil-Pérez, D., Valdés, P. y Vilches, A., ¿Qué visiones de la ciencia y la actividad científica tenemos y transmitimos? En: Gil-Pérez, D., Macedo, B., Martínez Torregrosa, J., Sifredo, C., Valdés, P. y Vilches, A. (eds.), *¿Cómo promover el interés por la cultura científica? Una propuesta didáctica fundamentada para la educación científica de jóvenes de 15 a 18 años* (pp. 29-62), Santiago de Chile, Chile: OREALC/ UNESCO, 2005.

Furió, C., Azcona, R. y Guisasola, J., Dificultades conceptuales y epistemológicas del profesorado en la enseñanza de los conceptos de cantidad de sustancia y de mol, *Enseñanza de las Ciencias*, 17(3), 359-376, 1999.

Furió, C., Azcona, R. y Guisasola, J., Revisión de investigaciones sobre la enseñanza-aprendizaje de los conceptos cantidad de sustancia y mol, *Enseñanza de las Ciencias*, 20(2), 229-242, 2002.

Furió, C., Azcona, R., Guisasola, J., Enseñanza de los conceptos de cantidad de sustancia y de mol basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada, *Enseñanza de las Ciencias*, 24(1), 43-58, 2006.

Furió, C., Azcona, R., Guisasola, J. y Mujika, E., Concepciones de los estudiantes sobre una magnitud «olvidada» en la enseñanza de la química: la cantidad de sustancia, *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), 107-114, 1993.

Furió, C. y Padilla, K., La evolución histórica de los conceptos científicos como prerrequisito para comprender su significado actual: el caso de la "cantidad de sustancia" y el "mol", *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 17, 55-74, 2003.

Gabel, D. L. y Sherwood, R. D., Analyzing difficulties with mole-concept tasks by using familiar analog tasks, *Journal of Research in Science Teaching*, 21(8), 843-851, 1984.

- Garritz, A., Gasque, L., Hernández, G. y Martínez, A., El mol: un concepto evasivo. Una estrategia didáctica para enseñarlo, *Alambique*, 33, 99-110, 2002.
- Matthews, M., Planck's Realism and Mach's Empiricism. En: Matthews, M., *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science (170-174)*, London, England: Routledge, 1994.
- Novik, S. y Menis, J., A Study of Students' Perceptions of the Mole Concept, *Journal of Chemical Education*, 53(11), 720-722, 1976.
- Padilla, K. y Furió-Mas, C., The importance of knowing the history and philosophy of science to question if the distorted views of the nature of science are in the teaching of the amount of substance and mole concepts, *Science & Education*, 17, 403-424, 2008.
- Padilla, K., Ponce-de León, A. M., Rembado, F. M. y Garritz, A., Undergraduate professors' «amount of substance» pedagogical content knowledge, *International Journal of Science Education*, 30(10), 1389-1404, 2008.
- Rogado, J., A grandeza quantidade de material e sua unidade, o mol: algumas considerações sobre dificuldades de ensino e aprendizagem, *Ciência & Educação*, 10(1), 63-73, 2004.
- Staver, J. R. y Lumpe, A. T., A content analysis of the presentation of the mole conception in chemistry textbooks, *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 321-337, 1993.