

QUÍMICA: ¿Tiene que ver con sustancias o con procesos?

Un inventario valioso para los profesores de química

ANDONI GARRITZ RUIZ

Introducción

¿Es la química una ciencia dedicada al estudio de cosas o al de procesos, acerca de sustancias o acerca de reacciones químicas? ¿Se define una reacción química por el cambio de ciertas sustancias o las sustancias son definidas por sus reacciones químicas características? Esta es una cuestión ontológica importante para esta ciencia. Por ejemplo Steven Weininger (2000), apunta que a pesar de que los procesos químicos son el centro de mucha de la investigación química, el aparato conceptual para describir estos procesos es sorprendentemente pobre comparado con el que existe para describir estructuras.

Shummer (2004) ha argumentado por un enfoque integrador que combine conceptualmente sustancias y procesos químicos en una red de relaciones dinámicas, de tal forma que sustancias y reactividades se definan mutuamente una a la otra, tanto al nivel teórico como en el experimental.

Este ensayo es como un “inventario”, de acuerdo a como lo definimos en otro escrito (Raviolo y Garritz, 2005) que pretende reunir todo un conjunto de recomendaciones a los profesores de química, cuando se enfrenten a la cuestión total de definir su ciencia y sus conceptos fundamentales:

Un inventario se refiere a un ejemplo concreto de aspectos de enseñanza y aprendizaje de un tema en particular. Se intenta que el inventario represente el razonamiento del profesor, o sea, el pensamiento y acciones de un profesor de ciencia exitoso al enseñar un aspecto específico del contenido científico. Los inventarios ofrecen una forma de capturar la naturaleza holística y la complejidad del conocimiento pedagógico del contenido.

Una definición de química

Empecemos por dar una definición plausible de la química, a partir de la definición

del australiano-británico Ronald Sydney Nyholm, que es una de mi preferencia:

La química es el estudio integrado de la preparación, propiedades, estructura y reacciones de los elementos y sus compuestos, así como de los sistemas que forman.

Quizá la razón de tal preferencia provenga de mi dedicación durante más de treinta años a la educación superior, ya que esta definición es utilizable una vez que el alumno, al llegar a este nivel educativo, tiene una idea más o menos aceptable —¿la tendrá, verdaderamente?— de términos como "preparación", "propiedades", "estructura", "reacciones", "elementos", "compuestos" y "sistemas". En breve, la definición expresada es utilizable después del tránsito del alumno por un curso previo de química. Por lo anterior, no es útil para la educación básica ni como una definición primaria de la química.

Sin embargo, se puede avanzar hacia una definición mejor que la anterior mediante la incorporación de algunos términos más comunes o más fundamentales. Por ejemplo, si sustituimos "los elementos y sus compuestos, así como los sistemas que forman" por el término "las sustancias", nos quedamos con una definición más aceptable y breve:

La química es el estudio integrado de la preparación, propiedades, estructura y reacciones de las sustancias.

La simplicidad de la definición es solamente aparente, pues en el concepto de "sustancia" está escondida toda una compleja riqueza sin definir, por ahora. Con esta definición como válida, podríamos decir que la química es el estudio de cuatro cuestiones de "las sustancias", por tanto, según esta definición, "las sustancias" dominan el panorama de la química. No obstante, dos de las cuatro cuestiones que se estudian tienen relación con procesos químicos: la preparación y las reacciones; las otras dos cuestiones tienen que ver más con características de las sustancias: las propiedades y la estructura.

No obstante, este nuevo concepto introducido, el de "sustancia", es más operativo, además de que puede ser sustituido por otro equivalente: "muestra de materia pura"¹, que quizá sea más cercano al neófito.

¹ Definido de esta manera, involucrando el término "pureza", el concepto de

Veamos otro par de definiciones de química que nos dan Gillespie *et al* (1994), en las que se da el mismo énfasis en el concepto de "sustancia".

Chemistry is the science of the properties and transformation of substances (al pie de la fotografía en la página 0)

Chemistry is the science that study substances (en la página 1)

Otro modo de proceder para alcanzar una definición de química consiste en plantear una serie de cuestiones a las cuales la química debe responder. He aquí un ejemplo (Miller y Lygre, 1991): ¿De qué están hechos los objetos naturales? ¿Cómo difiere un tipo de materia de otro? ¿Cómo se puede transformar un tipo de materia en otro? ¿Cómo pueden controlarse dichos cambios? ¿Cuánta energía está involucrada en estos cambios?

Este conjunto de cuestiones puede llevarnos hacia una definición como la siguiente, que en este caso se presenta también involucrando la definición previa de "sustancia":

La química es el estudio integral y controlado de las sustancias, su modo de obtención, estructura interna, propiedades, caracterización, transformaciones estructurales y cambios de energía presentes en éstas.

Es evidente que el concepto más fundamental en química es el de materia —escondido en esta última definición dentro de la palabra "sustancias". Si fuéramos temerarios, la química podría aceptar aún la siguiente definición condensada:

La química es el estudio de la materia en sí y el de sus procesos de transformación.

que acierta en señalar dos aspectos esenciales, el estudio de la materia "estática", en tanto tal, y el de la materia en proceso de cambio.

sustancia es una idealización, ya que todas las sustancias reales son más o menos impuras. No obstante, como esperamos que las impurezas se presenten a una concentración baja, las propiedades de una dada sustancia serán prácticamente las mismas. Eso sí, la definición de "sustancia" como "muestra de materia pura" es equivalente a la dada con anterioridad: "los elementos, sus compuestos y los sistemas que forman".

Desde luego, cualquiera de las definiciones que nos hemos planteado no considera un aspecto delicado, que es el de la frontera que, en principio, existe entre las transformaciones físicas y las químicas. La física también estudia la materia y cierto tipo de sus transformaciones... No obstante, este punto será abordado más adelante en este inventario.

De este breve juego de definiciones de química, podemos identificar finalmente un conjunto de seis puntos esenciales de esta ciencia, a partir de los cuales puede integrarse su definición más o menos formal, y que giran alrededor del concepto fundamental de **materia**² o el de **sustancia**³:

- a) propiedades físicas y caracterización de las sustancias
- b) tipos de materia
- c) composición de la materia y pureza de las sustancias
- d) transformaciones químicas de las sustancias y cambios energéticos
- e) estructura de las sustancias
- f) modos de obtención de las sustancias

A partir de estos seis puntos podremos hablar de varios conceptos derivados en química, pero conviene para este inventario aclarar antes el embrollo y sobreposición entre los llamados fenómenos físicos y químicos.

Las definiciones de sustancia y de reacción química

La IUPAC (McNaught & Wilkinson, 1997) define “chemical substance” de la siguiente manera:

“Matter of constant composition best characterized by the entities (molecules, formula units, atoms) it is composed of. Physical properties such as density, refractive index, electric conductivity, melting point etc. characterize the chemical substance.”

Nótese que dentro de las propiedades de la “sustancia química” no se consideran cuestiones acerca de su reactividad, pues se han restringido a comentar sobre sus

² Por simplicidad, y con la ayuda que nos pueda proporcionar la física, lo definiremos como todo aquello que ocupa un espacio y tiene masa.

³ Muestra de materia con alto grado de pureza, considerada bajo estudio controlado.

“propiedades físicas” como las que caracterizan a las sustancias. Sin duda, las sustancias químicas tendrían también propiedades químicas, de las que no habla la IUPAC, que también caracterizarían a las sustancias y de forma mucho más completa. De esta forma, la IUPAC no hace evidente la dependencia de la definición de un concepto “reacción química” de la definición del otro concepto “sustancia”.

Otra cuestión notable en esta definición de “sustancia” es que está ligada al microcosmos, cuando se dice que la mejor caracterización de la sustancia es a través de las entidades (moléculas, unidades fórmula o átomos) de las que está compuesta.

Veamos ahora, en algunos libros de texto, la definición que dan de “reacción química”. Empecemos por la de Brown, LeMay y Bursten (1997):

In **chemical changes** (also called **chemical reactions**), a substance is transformed into a chemically different substance.

Spencer, Bodner y Rickard (2000) introducen una definición de reacción química muy similar a la del libro de Brown *et al*, y lo hacen en la misma definición de química, cuando dicen:

La química es la ciencia que estudia la composición, la estructura y las propiedades de las sustancias, y las reacciones por las que una de éstas se convierte en otra.

De esta manera, la definición de sustancia debería ser previa a la definición de cambio químico o reacción química, para que de esta forma estos últimos términos queden definidos propiamente. Éstas son definiciones de carácter aparentemente macroscópico del concepto de “reacción química” y decimos “aparentemente” por la mención de las entidades elementales citadas en la definición de sustancia de la IUPAC.

Hay por ahí otras definiciones de reacción química (Gillespie, 1994) que se centran en los aspectos microscópicos:

A *chemical reaction* is a process in which the atoms in the reactant

molecules are rearranged to form the molecules of the products.

Cuando la IUPAC define “chemical reaction”, lo hace de la siguiente forma:

“Chemical reaction”: A process that results in the interconversion of chemical species. Chemical reactions may be elementary reactions or stepwise reactions. (It should be noted that this definition includes experimentally observable interconversions of conformers.) Detectable chemical reactions normally involve sets of molecular entities, as indicated by this definition, but it is often conceptually convenient to use the term also for changes involving single molecular entities (i.e. ‘microscopic chemical events’).

Vemos que ahora la palabra “sustancias” ha sido substituida por la de “especies químicas”. Pero ¿cómo define entonces la IUPAC a las “especies químicas”?

(Jenkins, 2001):

“Chemical species”: An ensemble of chemically identical *molecular entities* that can explore the same set of molecular energy levels on the time scale of the experiment. The term is applied equally to a set of chemically identical atomic or molecular structural units in a solid array...

Except where the context requires otherwise, the term is taken to refer to a set of molecular entities containing isotopes in their natural abundance. The wording of the definition given in the first paragraph is intended to embrace both cases such as graphite, sodium chloride or a surface oxide, where the basic structural units may not be capable of isolated existence, as well as those cases where they are.

Podemos percatarnos de que la IUPAC no involucra al término “sustancia” en su definición de “reacción química”, pero lo hace con un término equivalente, el de “especie química”, caracterizado por “entidades moleculares” con un significado amplio, pues incluye al cloruro de sodio en sus ejemplos. Concluimos por lo tanto nuestro acuerdo con Schummer (2004): “sustancias y reactividades se definen mutuamente una a la otra, tanto al nivel teórico como en el experimental”. Como

veremos en la siguiente sección este no es todo el problema en la definición de reacción química.

Física y química ¿hay una frontera?

Siempre se falla en el intento de definir un universo de estudio de la física perfectamente ajeno al de la química. No existe una frontera claramente definida entre ambas, lo que afortunadamente habla acerca de la unidad de la ciencia. Desde 1970 se adoptan tanto la actitud de defensa como la de ataque con relación a la enseñanza de una distinción entre “cambios físicos” y “cambios químicos” en dos artículos del *Journal of Chemical Education* (Gensler, 1970; Strong, 1970).

Es notable que la prudencia con la que toma este tema el libro clásico de Samuel Glasstone (1946) se haya disipado luego en centenas de libros que insisten en definir y diferenciar los fenómenos físicos de los fenómenos químicos. Glasstone indica —el subrayado es nuestro:

"Con el propósito de su estudio, se ha encontrado conveniente dividir los fenómenos naturales en dos clases:

- Una consiste de cambios de naturaleza aparentemente permanente, que involucran la transformación de una forma de materia en otra (QUÍMICA).
- Otros son cambios temporales, generalmente resultantes de la alteración de condiciones externas (FÍSICA)."

Linus Pauling (1947) define asimismo como propiedades químicas de las sustancias a "aquéllas que se refieren a su comportamiento en las reacciones químicas" y a éstas como "los procesos por los cuales unas sustancias se transforman en otras". En los procesos físicos no habría sustancias formadas o destruidas. Así, todo estaría posiblemente claro si pudiéramos en forma nítida caracterizar lo que significa "la transformación de una forma de materia en otra". ¿Cómo podemos asegurar que "unas sustancias se transforman en otras"?

Para avanzar, se nos insiste en la naturaleza temporal del cambio físico contra la "aparentemente permanente" de los cambios químicos, así como en que la energía

involucrada en éstos es notablemente mayor que la de los cambios físicos y que éstos pueden simplemente echarse marcha atrás por la alteración de las condiciones externas —y los químicos no, en forma general. Acerca de los cuatro criterios que se han dado en los libros de texto para diferenciar cambios físicos de químicos durante los últimos ciento setenta años trata el artículo de Palmer y Treagust (1996), así como de cuatro hipótesis acerca de la longevidad de este tema en dichos libros:

- 1) El concepto es un remanente de la teoría aristotélica de la materia, retenido por el conservadurismo natural de los científicos.
- 2) La distinción entre cambio físico y químico en los libros es un artilugio pedagógico, que ayuda a los estudiantes a entender los conceptos relacionados.
- 3) El concepto puede ser ilustrado por un conjunto de experimentos excitantes e interesantes que le satisfacen a aquellos profesores que se ven a sí mismos orientados hacia el trabajo práctico.
- 4) El concepto es un ardid empleado por los químicos para definir la frontera entre química y física, con ventaja para la química, de tal forma que los jóvenes tiendan a seleccionar esta disciplina como objeto de estudio, en lugar de física.

Vale la pena transitar por algunos ejemplos para entender plenamente el inicio de la definición de Glasstone: "con el propósito de su estudio, se ha encontrado conveniente ...". Se intentará así hacer evidente por qué Glasstone insiste en su carácter convencional y en introducir las expresiones "aparentemente" y "generalmente" que, por ser tan vagas, definen con tan poca lucidez los conceptos. Veamos algunos casos en los que la frontera entre cambio físico y cambio químico resulta francamente nebulosa.

- 1) Tradicionalmente se habla de los cambios de estado de agregación como fenómenos físicos. Así, la ebullición es un fenómeno físico, por ejemplo. Ello implica que el vapor de agua y el agua líquida no deben considerarse como formas diferentes de materia, a pesar del enorme cambio que presentan sus propiedades físicas —por ejemplo, la densidad del agua durante la ebullición

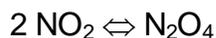
disminuye más de mil veces y algo similar sucede con su viscosidad. La energía involucrada en la ebullición es de 40.66 kJ/mol, producto del rompimiento de los enlaces de puente de hidrógeno entre las moléculas del agua líquida. A pesar de la notable diferencia en las posiciones relativas de las moléculas de agua en cada una de sus fases, Pauling indica claramente que hielo, agua líquida y vapor de agua son una misma sustancia: agua. Un cambio en las condiciones externas —enfriamiento, por ejemplo— nos lleva al proceso inverso, la condensación del vapor de agua. Parece éste un cambio físico, sin duda.

- 2) Tradicionalmente también, se habla de cambio químico al que ocurre en una transformación alotrópica del tipo grafito-diamante. El primer pero que encontramos es que las reacciones químicas de ambas formas son casi las mismas —algo enteramente similar a lo que sucede con agua líquida, hielo y vapor—, ya que están compuestas únicamente por átomos de carbono: las dos se transforman en CO_2 en presencia de oxígeno a alta temperatura, por ejemplo. ¿Tenemos derecho entonces a decir que estamos frente a dos diferentes formas de materia? ¿Por qué no en el caso hielo-vapor? Quizá la razón para calificar al grafito-diamante como cambio químico sea la ruptura y posterior formación de poderosos enlaces covalentes, como sucede en cualquier otro cambio químico ordinario —cuestión que, por cierto, no sucede en los cambios de fase. Además, durante el proceso se trastoca notablemente la estructura interna de la materia, ya que se pasa de un arreglo en el que todos los átomos de carbono cuentan con cuatro vecinos cercanos enlazados, a otro en el que sólo tienen tres (¿Qué no sería un cambio estructural mucho más notable la vaporización del diamante? Por el ejemplo dado en (1), a éste lo catalogaríamos como un cambio físico ¿o no?). Sobre el carácter "aparentemente permanente" de la reacción grafito-diamante habría que insistir en que la forma termodinámicamente estable es el grafito y que es inevitable que el diamante degenera en aquél, aunque muy lentamente. Sin embargo, la energía involucrada en esta transformación es de sólo 1.9 kJ/mol, es decir, veinte veces menor que la necesaria para bullir un mol de agua. Con la argumentación dada, vemos que una transformación alotrópica tiene algunos de los elementos característicos del cambio químico, pero también

algunos de los del cambio físico. Aun concediendo que diamante y grafito son una misma sustancia: carbono, empezamos a ver los problemas de identificar la frontera entre los fenómenos físicos y los químicos.

- 3) En el proceso de cocimiento de un huevo, ¿hablaríamos de una modificación de una forma de materia en otra? Desde el punto de vista observacional la transformación es notable, y hacerlo sería de justicia, calificando como cambio químico a la desnaturalización de la proteína de la clara y la yema del huevo. Desde luego, el proceso es irreversible, para empezar. No obstante, posiblemente el fenómeno básico que ocurre aquí es la ruptura de diversos enlaces de puente de hidrógeno, hecho que provoca el desmadrado de las hélices proteicas y su consecuente pérdida de estructura secundaria y terciaria. Al final de cuentas, entonces, el suceso es similar al que ocurre en la ebullición del agua: puentes de hidrógeno que se rompen ¿por qué calificar a este último como proceso físico?
- 4) Podría decirse que el proceso de desnaturalización mencionado en (3) es equivalente a una transformación isomérica: existen los mismos átomos antes y después del proceso, enlazados por los mismos enlaces covalentes, pero la configuración espacial molecular es diferente. ¿Qué decir entonces en el caso de una transformación isomérica de posición, cis-trans o geométrica? ¿Se trata de un fenómeno químico? Tradicionalmente así lo consideramos, pero debe quedar claro al lector que un isómero no necesariamente posee con claridad diferente comportamiento químico que otro. Además, en ocasiones, la energía involucrada en la transformación isomérica es tan baja que ambas especies se encuentran en equilibrio a temperaturas ordinarias, como si se tratara de dos conformeros —etano eclipsado y alternado— cuya transición ocurre debido a rotaciones o a vibraciones cuyas barreras energéticas son vencidas térmicamente. Nunca nos atreveríamos a calificar como una reacción química a una transformación entre conformeros ¿o sí?
- 5) En multitud de reacciones químicas "verdaderas" la reversibilidad es evidente y se manifiesta a la menor alteración de las condiciones externas, como sucede en

los fenómenos físicos. Por ejemplo, el equilibrio gaseoso



puede desplazarse hacia el lado izquierdo al disminuir la presión o la temperatura, de acuerdo con el Principio de Le Châtelier. La evidencia de dicha reacción inversa es notable por la desaparición del color característico del N_2O_4 .

Definitivamente, **no hay sino una frontera nebulosa entre los cambios físicos y los químicos**. Por ello, se dice que hacer esa distinción en el aula no es una ayuda pedagógica ni tampoco significativo desde el punto de vista científico (Borsese y Esteban, 1998). Se trata en última instancia de modelos extremos sobre el comportamiento de la materia en los procesos naturales. Y, en ciencia, es elemental no confundir los modelos con la realidad. Quizá podamos encontrar casos reales de transformaciones de la materia que se adapten cercanamente a alguna definición arbitraria o convencional de modelo de cambio físico o a una de cambio químico, pero nada más.

Además, hemos tenido inevitablemente que introducir en el análisis y discernimiento de uno u otro tipo de procesos la noción microscópica de estructura interna de la materia y cómo se ve afectada. Así, hemos de resignarnos a perder la posibilidad de definir el concepto desde un punto de vista puramente observacional, para entrar en las entrañas del microcosmos, tan abstracto, ajeno y lejano al alumno en la educación básica.

Referencias

Borsese, A. y Esteban, S., Los cambios de la materia, ¿deben presentarse diferenciados como químicos y físicos? *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales* **17**, 85-92, 1998.

Brown, T. L., LeMay Jr., H. E. y Bursten, B. E. *Chemistry. The central science*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 7th edition, 1997.

Gensler, W. J. Physical versus chemical change, *Journal of Chemical Education* **47**(2), 154-155, 1970.

Gillespie, R. J., Eaton, D. R., Humphreys, D. A. y Robinson, E. A. *Atoms, molecules and reactions. An introduction to chemistry*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1994.

Glasstone, S., *Textbook of Physical Chemistry*, Macmillan, Nueva York, 2^a edición,

1946.

Jenkins, A. D., *IUPAC Compendium of Chemical Terminology*. Actualización del *gold book* que se inició en el año de 2001, con una última entrega de material en 2003, que puede consultarse en la URL <http://www.iupac.org/projects/2001/2001-062-2-027.html>.

McNaught, A. D. y Wilkinson, A., *IUPAC Compendium of Chemical Terminology*, (*The gold book*). Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, publicada en forma impresa por Blackwell Science, 2nd edition, 1997. Puede consultarse en la URL <http://www.chemsoc.org/chembytes/goldbook/>.

Miller Jr., G. T. y Lygre, D. G., *Chemistry. A contemporary approach*, California, USA: Wadsworth Publishing Company, tercera edición, 1991.

Pauling, L., *General Chemistry*, San Francisco, USA: W.H. Freeman, 1947.

Palmer, W. y Treagust, D. F. Physical and chemical changes in textbooks: an initial view, *Research in Science Education* **26**(1), 129-140, 1996.

Raviolo, A. y Garritz, A., Decálogos e inventarios, *Educación Química* **16**(x), 122-128, 2005.

Shummer, J. Substances versus reactions, *HYLE International Journal for Philosophy of Chemistry*, **10**(1), 3-4, 2004.

Spencer, J. N., Bodner, G. M. y Rickard, L. H. *Química. Estructura y dinámica*, México: CECSA, 2000.

Strong, L. E. Differentiating Physical and Chemical Changes, *Journal of Chemical Education* **47**(10), 689-690, 1970.

Weininger, S. J.: 2000, 'Butlerov's Vision. The Timeless, the Transient, and the Representation of Chemical Structure', in: N. Bhushan & S. Rosenfeld (eds.), *Of Minds and Molecules*, New York: Oxford University Press, pp. 143-61.

Whitehead, A. N., *Process and Reality*, edición corregida por D.R. Griffin y D.W. Sherburne, New York, NY: Macmillan, 1978 [1929].