

HISTORIA Y EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS



IMPLICACIONES DIDÁCTICAS DE UN ESTUDIO HISTÓRICO SOBRE EL CONCEPTO *EQUILIBRIO QUÍMICO*

RAVILOLO, ANDRÉS

Universidad Nacional del Comahue. San Carlos de Bariloche. Río Negro. Argentina.
araviolo@bariloche.com.ar

Resumen. Como resultado de una revisión histórica realizada sobre la evolución del concepto de *equilibrio químico* se han identificado tres modelos históricos y discutido sus implicaciones educativas. El estudio histórico contribuye a comprender aspectos que hacen a la naturaleza de las ciencias y aporta elementos para el diseño de secuencias didácticas en la enseñanza de este tema. También se reflexiona sobre los paralelismos entre la evolución histórica del concepto de *equilibrio químico* y la construcción del mismo por parte de los estudiantes.

Palabras clave. Estudio histórico, equilibrio químico, modelos históricos, implicaciones didácticas.

Pedagogical implications of a historical study into chemical equilibrium

Summary. Following a historical review of the evolution of the concept of chemical equilibrium, three historical models have been identified, and their pedagogical implications have been discussed. The historical study contributes to an understanding of certain aspects of the nature of science and furnishes elements for the design of didactic sequences for the teaching of this subject. Furthermore, parallels are considered between the historical evolution of the concept of chemical equilibrium and the construction of this concept on the part of students.

Keywords. Historical study, chemical equilibrium, historical models, didactic implications.

INTRODUCCIÓN

La formación del profesorado es una tarea permanente y compleja por su carácter teórico, práctico e interdisciplinario. En ella se integran, fundamentalmente, conocimientos sobre el contenido y naturaleza de las ciencias; conocimientos psicopedagógicos en general y de la didáctica de las ciencias. Para Gil (1993) el dominio del contenido a enseñar incluye conocer, entre otros: los problemas que originaron la construcción del conocimiento, los obstáculos epistemológicos asociados, las estrategias metodológicas empleadas y las interacciones CTS.

En investigaciones sobre las concepciones del profesorado acerca de la naturaleza de la ciencia suele encuadrarse a los profesores en alguna de las formas del positivismo o en posiciones eclécticas por la falta de una orientación filosófica coherente. A pesar de esto, la investigación educativa no ha determinado una correlación bien definida entre las concepciones del profesorado sobre la naturaleza de la ciencia y su práctica en el aula. Al parecer, aun en los casos en que los profesores cuentan con una formación en filosofía e historia de la ciencia, ésta no se refleja en su práctica si carecen de un conocimiento funcional para llevarla a cabo (Mellado y González, 2000).

En la formación inicial y en el ejercicio del profesorado son escasos, y a veces inexistentes, los cursos sobre la naturaleza de la ciencia y sobre la historia de los conceptos que, respectivamente, van a enseñar o enseñan. Y en caso de existir esos cursos, menos frecuentes son los momentos para discutir sus aplicaciones concretas para la enseñanza. La didáctica de las ciencias debería facilitar el acceso de los docentes con publicaciones que allanen este camino. Por ello, el objetivo de este trabajo es compartir el producto de una búsqueda de implicaciones didácticas que surgieron de una revisión histórica realizada en torno a un concepto clave en la enseñanza de la química.

El equilibrio químico constituye un tema central en el aprendizaje de la química porque completa el estudio de la reacción química, principal objeto de estudio de esta ciencia. Enseñar el equilibrio químico implica un gran desafío, tanto en la secundaria como en la universidad, por el grado de complejidad y abstracción de este tema, que promueve dificultades en los alumnos como la generación de concepciones alternativas durante su aprendizaje (Raviolo y Martínez Aznar, 2005). Al igual que con la lectura de investigaciones sobre las concepciones alternativas, un estudio histórico ayuda a revisar las concepciones propias que sostiene el profesor y a inferir estrategias posibles para su enseñanza.

ESTUDIO HISTÓRICO

Inicialmente, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre la evolución histórica del concepto de *equilibrio químico*, recurriendo a libros y artículos sobre historia de la química. Esta revisión presenta una dificultad particular debida a que en libros de historia de la química no

se encuentran capítulos que se dediquen específicamente al equilibrio químico, como sí se encuentran apartados para otros temas como termoquímica, disoluciones o electroquímica.

Las fuentes bibliográficas consultadas fueron libros de historia de la química y artículos específicos. En concreto, los libros de Moore, 1953; Partington, 1964; Ihde, 1964; Leicester, 1967; Mierzecki, 1991; Bensaude y Stengers, 1997 y Brock, 1998; y los artículos de Guggenheim, 1956; De Heer, 1957; Lindauer, 1962; Lund, 1965; Lund, 1968; Laidler, 1984; Paty, 1985; Van Driel, de Vos y Verloop, 1998; Justi y Gilbert, 1999 y Quílez, 2002.

La revisión bibliográfica comprendió desde una introducción al origen del término *afinidad química* (del siglo XIII al siglo XVIII) hasta las publicaciones de Lewis de comienzos del siglo XX, deteniéndose en particular en la segunda mitad del siglo XIX, período donde se construyeron las principales ideas sobre el equilibrio químico que se abarcan hoy en día en un curso de química general.

Posteriormente, el producto de ese trabajo fue analizado independientemente por dos investigadores (Raviolo, 2005) con el objetivo de extraer modelos históricos sobre el equilibrio químico, para luego ponerlos en común y discutirlos hasta lograr un acuerdo en la definición de un número reducido de ellos.

Gilbert y Boulter (2000), en su clasificación ontológica de los modelos, afirman que en la comunidad científica algunos modelos considerados valiosos alcanzan, luego de un proceso de experimentación y discusión, cierta aceptación y se convierten en *modelos científicos*. Otros modelos consensuados, producidos en un contexto histórico determinado y que por diversas causas fueron reemplazados por otros, constituyen los *modelos históricos*. Versiones, generalmente simplificadas, de estos modelos científicos e históricos forman parte de los modelos incluidos en el currículo de ciencias, son los *modelos del currículo*.

Sobre la base del trabajo de Justi y Gilbert (1999) que definieron modelos históricos para la cinética química y teniendo en cuenta la finalidad educativa del presente estudio, se extrajeron tres modelos históricos sobre el equilibrio químico. Son considerados como distintos ángulos con que ha sido explicado este concepto a lo largo de su evolución histórica. Estos modelos explicativos han estado en concordancia con distintos enfoques con los cuales se ha interpretado la afinidad química. A continuación se enumeran los tres modelos históricos acompañados de una breve explicación. Su tratamiento en profundidad puede consultarse en Raviolo (2003 y 2005).

1) Modelo centrado en las fuerzas

Este modelo histórico abarca los estudios que investigaron las fuerzas químicas dentro de un paradigma mecánico. Pueden distinguirse dos versiones de este modelo: a) el modelo de las afinidades electivas: las fuerzas de atracción y repulsión dependen sólo de la naturaleza de

las sustancias (p. ej.: Bergman, Bufón, Boyle) y *b*) el modelo de la acción de las masas: las fuerzas son proporcionales a las masas (o masas activas para otros) de las sustancias reaccionantes (p. ej.: Wenzel, Berthollet, Guldberg y Waage, en 1864). Así, ninguna reacción de desplazamiento sería completa, dado que se establece una situación de equilibrio entre fuerzas opuestas cuya magnitud depende tanto de la diferencia de afinidades como de las proporciones relativas.

2) Modelo centrado en las velocidades

Incluye las investigaciones que hablan de velocidades de reacción, su igualdad en el equilibrio y la determinación cinética de la constante de equilibrio *K*. (p. ej.: Wilhelmy, Williamson, Pfaundler, Guldberg y Waage, van't Hoff, en 1877). La velocidad de reacción es proporcional a las masas activas de las sustancias reaccionantes. En el equilibrio químico, el número de moléculas que se están descomponiendo en un cierto tiempo es igual al número de moléculas que se están formando.

3) Modelo centrado en la energía

Comprende las ideas que incorporaron las técnicas matemáticas de la termodinámica al estudio de las reacciones químicas. Dentro de este modelo se distinguen dos enfoques: *a*) el primer principio: en su origen consideró que el calor desprendido en una reacción era una medida de la afinidad química (p. ej.: Berthelot, Thomsen). Allí el estado de equilibrio se logra cuando un sistema químico produce un trabajo máximo y alcanza un potencial energético mínimo; y *b*) el segundo principio: con la introducción de una nueva función termodinámica, la entropía, por parte de Clausius (en 1865), (p. ej.: Horstmann, Gibbs, Van't Hoff, en 1884). El estado de equilibrio se logra cuando un sistema químico alcanza un potencial termodinámico (no energético) mínimo. Es decir, un sistema está en equilibrio cuando su energía libre (transformación a presión y temperatura constante) tiene el valor mínimo.

IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

Según Matthews (1994), la historia y la filosofía de las ciencias pueden aportar a la enseñanza de las ciencias en cuatro aspectos:

1. para enseñar a los estudiantes sobre la naturaleza de las ciencias
2. para utilizar algún paralelismo entre la evolución histórica y el desarrollo de la comprensión de un contenido por los estudiantes
3. para superar problemas prácticos en la enseñanza y facilitar el aprendizaje
4. para desarrollar en los estudiantes capacidades de pensamiento crítico

Teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo que apunta al aprendizaje conceptual de esta temática, las implicaciones didácticas de este estudio histórico sobre el equilibrio químico se centrarán en la base de los tres primeros aspectos. Sobre este tipo de análisis, basado en las consideraciones de Matthews, no se encuentran antecedentes en la bibliografía para el equilibrio químico. No se profundizará directamente en el desarrollo del pensamiento crítico en los estudiantes, aunque es evidente que la discusión de los tres primeros aspectos influye, directa o indirectamente, en el desarrollo del pensamiento crítico de los alumnos.

1. Para enseñar a los estudiantes sobre la naturaleza de las ciencias

Una de las formas en que el acercamiento histórico puede resultar útil en la enseñanza de las ciencias es mejorando las actitudes hacia la ciencia y la comprensión de su funcionamiento. En este sentido, Brush (1989) afirma que para mejorar la comprensión de la ciencia misma por parte de los alumnos se debe tratar al material histórico de forma tal que ilumine ciertas características particulares de la ciencia, entre ellas: (1) el tratamiento de preguntas filosóficas amplias, que no están presentes en los libros de texto; (2) el rol de la creación de conceptos nuevos para describir y predecir hechos, teniendo en cuenta que la enseñanza tradicional suele poner demasiado énfasis en el papel del descubrimiento de hechos; y (3) rescatar las importantes contribuciones a la ciencia hechas por mujeres y algunas minorías, que por discriminación y factores sociales negativos las han mantenido en bajo número.

La ciencia adopta una postura de acercamiento a los conocimientos, no como verdades inmutables, sino como las mejores hipótesis de trabajo disponibles sobre las cuales basar las investigaciones. Un recorrido por el estudio histórico realizado sobre el equilibrio químico permite mostrar que los conocimientos científicos actuales no son «verdades eternas» descubiertas o el simple resultado de la acumulación de observaciones, sino el producto de una empresa humana realizada en un contexto social definido (Gagliardi y Giordan, 1986).

El conocimiento que hoy se posee sobre el equilibrio químico, formado por un conjunto de ideas básicas relacionadas, fue el fruto de aportes parciales de muchos científicos, en una evolución no exenta de dudas, controversias y retrocesos. En este proceso distintas concepciones predominantes fueron a veces obstáculos para la elaboración de explicaciones alternativas más abarcativas; al tiempo que los conceptos no se definieron clara y precisamente en un primer momento, sino a través de un proceso dialéctico en el que se involucraron muchos investigadores.

La ley del equilibrio químico por ejemplo, tal como la concebimos actualmente y que los estudiantes aplican constantemente en la resolución de ejercicios, no fue «descubierta» ni definida en una única vez de forma clara y definitiva por Guldberg y Waage en 1864 (como lo subrayan algunos libros de texto) sino, por el contrario,

fue el resultado de un proceso de construcción; proceso que para estos autores comprendió un período de quince años (entre 1864 y 1879) donde progresivamente se fue depurando y precisando. Un proceso en el que participaron varios investigadores y que se llevó a cabo a la luz del trabajo realizado anteriormente por otros (p. ej.: Berthelot y St. Gilles, 1862; Brodie, 1863; Ostwald, 1877). A su vez, esta ecuación logró cierta difusión gracias a las contribuciones de otros científicos como Thomsen (en 1869) y Horstmann (en 1873). Incluso, en este proceso hasta la autoría de esta ecuación puede resultar incierta dado que Van't Hoff (en 1877) introdujo el signo K y lo formalizó matemáticamente, dos años antes que Guldberg y Waage.

En este proceso también se verifica que no se produce un cambio en las teorías aceptadas por la comunidad científica de un momento histórico por la aparición de evidencia experimental que contradiga estas teorías. Por ejemplo, bajo el paradigma de las afinidades electivas sistematizadas por Bergman, de consenso general a finales del siglo XVIII, los resultados experimentales de Wenzel que la contradecían no tuvieron eco. Tuvo que acumularse gran cantidad de datos de investigaciones sobre la acción de las masas (la acción de las concentraciones en la velocidad de las reacciones químicas) para que, inicialmente, se intentara mantenerla y ampliarla con Berthollet y, posteriormente, se reemplazara.

La historia de la ciencia también permite desmitificar la imagen que se tiene de los científicos como personas puramente neutrales y racionales. Por ejemplo, la revisión histórica reveló que los científicos a veces realizan una contribución al estudio de un tema rechazando, no de una forma tan racional como podría suponerse, otros aportes al conocimiento realizados por otros científicos contemporáneos e incluso oponiéndose abiertamente a otros puntos de vista, como el caso de Berthelot y Le Chatelier en Francia con la teoría atómica.

En definitiva, reflexionar sobre la historia y filosofía de la ciencia ayuda a comprender mejor su naturaleza dado que, generalmente, se posee una imagen de la ciencia como una serie de leyes que se deducen lógicamente a partir de unos principios y no como una construcción de conocimientos con el objetivo de resolver problemas, donde no suelen mostrarse las limitaciones de las teorías y los problemas pendientes de resolución. Este enfoque ayuda a revertir la imagen deformada de cómo se construyen y evolucionan los conceptos científicos, que muestra a la ciencia como obra de grandes genios olvidando su carácter colectivo (Solbes y Traver, 1996; Izquierdo, 1996).

2. Para utilizar algún paralelismo entre la evolución histórica y el desarrollo de la comprensión de un contenido por los estudiantes

Una de las características resaltadas por la bibliografía sobre las concepciones alternativas es que frecuentemente tienen un paralelismo con explicaciones ofrecidas en algunos momentos de la historia de las ciencias. Astolfi (1994) se refiere a este hecho como cierto parentesco en-

tre las representaciones de los alumnos y los obstáculos epistemológicos que la historia de las ciencias ha tenido que superar. A pesar de esto se reconoce que no todas las concepciones de los estudiantes encuentran antecedentes históricos, que además de similitudes se encuentran diferencias y que estas concepciones similares no implican, necesariamente, que la evolución conceptual de las personas siga un proceso similar al realizado históricamente por los científicos.

Con respecto a las diferencias entre las ideas históricas y las sostenidas por los estudiantes actuales, Gauld (1991) subraya algunas diferencias sustanciales. La primera es que el proceso de desarrollo de las ideas en los estudiantes es frecuentemente inconsciente; en cambio, el proceso de construcción de teorías por los científicos es consciente. Otra diferencia es que el desarrollo de las ideas en los estudiantes es individual, mientras que las ideas científicas, para ser científicas, deben ser desarrolladas en cooperación y confrontación con las visiones de otros científicos que trabajan en el mismo campo. Por último, las ideas de los alumnos se originan generalmente en la vida cotidiana mientras que las de los científicos parten del conocimiento científico vigente.

Sobre el equilibrio químico, Van Driel, De Vos y Verloop (1998) hallaron tres similitudes entre el razonamiento de los estudiantes durante la enseñanza del tema y el de los científicos del siglo XIX (como Williamson, Clausius, o Pfandler):

- El reconocimiento de que la existencia de reacciones químicas que no se completan entra en conflicto con la concepción existente acerca de las reacciones químicas.
- La aceptación de la necesidad de revisar la idea de que moléculas de una misma especie son idénticas (que tienen el mismo estado de movimiento).
- La suposición de que dos reacciones opuestas continúan ocurriendo con el fin de explicar la conversión incompleta.

Este estudio reveló también algunas importantes diferencias; por ejemplo, pocos estudiantes explicaron espontáneamente el fenómeno de las reacciones incompletas en términos de partículas, y la mayoría de ellos razonó en términos macroscópicos que no reflejaban antecedentes históricos.

Otras concepciones que sostienen actualmente los alumnos, y que resultan similares a las sostenidas en la evolución histórica del concepto, son:

- La consideración del equilibrio químico como estático puede derivarse de una concepción de equilibrio como equilibrio mecánico, logrado por una igualación de fuerzas, por ejemplo en Berthollet (1801) y Guldberg y Waage (en 1864). La concepción de que el equilibrio se logra cuando la cantidad de reactivos es igual a la cantidad de productos puede estar asociada a esta imagen.
- La idea pendular del equilibrio: que primero se completa la reacción directa, luego la inversa y así sucesiva-

mente; ésta se apoyaría también en esta analogía mecánica del equilibrio mecánico que oscila alrededor de un estado de equilibrio (Bensaude y Stengers, 1997).

– La confusión cantidad-concentración (Furió y Ortiz, 1983). Por ejemplo Berthollet rescató la importancia de la cantidad pero no de la concentración, cuando concluye que las reacciones químicas dependen no sólo de la naturaleza de las sustancias sino también de las cantidades de los reactivos.

– Ante una perturbación del equilibrio (como el agregado de más reactivo o la entrega de calor a una reacción endotérmica), algunos estudiantes consideran, por ejemplo, al incremento en la velocidad de la reacción directa como el cambio impuesto, y que el sistema contrarresta ese cambio incrementando la velocidad de la reacción inversa. Para Niaz (1995) los alumnos consideran a la reacción directa e inversa como el análogo químico de la tercera ley de Newton. En ésta la fuerza es una propiedad innata o adquirida de los objetos, que no proviene de la interacción de dos objetos. Esto los conduce a una versión algorítmica de la tercera ley como «para cada acción existe una reacción igual y opuesta».

– La concepción alternativa referida a que un catalizador, en un sistema en equilibrio químico, produce un aumento en la proporción de producto es frecuente en los alumnos. El catalizador, como un factor que influye en las cantidades presentes en el equilibrio químico, fue una idea invocada a menudo a comienzos del siglo XIX; el trabajo de Le Chatelier contribuyó a descartarla (Paty, 1985).

– Las inadecuadas explicaciones que brindan los alumnos sobre cómo funciona un catalizador. Es el caso de las curiosas explicaciones ofrecidas por Ostwald al no aceptar la existencia de átomos, por ejemplo, la analogía de que el catalizador actúa como aceite en una máquina (Partington, 1964).

Actualmente se debate acerca del grado de coherencia de las concepciones alternativas; por ejemplo, está comprobado que los alumnos no recurren espontánea y coherentemente a modelos con partículas de mayor poder explicativo y predictivo.

En la enseñanza frecuente los estudiantes han realizado abundantes ejercicios numéricos con la ecuación de la constante de equilibrio y aplicado el principio de Le Chatelier para predecir la evolución de un sistema en equilibrio químico que ha sido perturbado, aunque la resolución de estos ejercicios no ha conducido a la superación de concepciones alternativas al respecto (Raviolo y Martínez Aznar, 2005). Por ejemplo, con respecto a la concepción alternativa de considerar a las cantidades presentes como iguales a los coeficientes estequiométricos («en el equilibrio los reactivos y productos están presentes en cantidades iguales, o proporcionales, a los coeficientes estequiométricos de la ecuación química») (Raviolo, 2005), se observa que esta concepción no fue una idea que haya estado presente entre los investigadores a lo largo de la historia dado que partían de observaciones experimentales. Incluso en las primeras formula-

ciones de la ley de equilibrio químico (p. ej.: Guldberg y Waage, en 1864) se consideraba que los exponentes debían ser hallados experimentalmente y no correspondían a los coeficientes estequiométricos.

En definitiva, la historia de la ciencia puede desempeñar un papel en la comprensión de la lógica que los estudiantes utilizan para dar coherencia a sus modelos explicativos (Bizzo, 1993); aunque, si bien algunas dificultades y concepciones presentes en algún momento histórico del desarrollo científico están presentes en estudiantes en la actualidad, sería inadecuado afirmar que existe un paralelismo general en la construcción del concepto de *equilibrio* por parte de los estudiantes y el proceso seguido en la evolución histórica del concepto, dado que resultaría ingenuo pensar que estos complejos modelos explicativos del equilibrio químico, que llevaron muchos años de construcción consciente, sigan una evolución similar en su construcción individual en un número reducido de clases.

3. Para superar problemas prácticos en la enseñanza y facilitar el aprendizaje

Un problema práctico en la enseñanza del equilibrio químico es la toma de decisiones respecto al enfoque con que se presenta el tema. Se habla siempre de dos enfoques curriculares en la enseñanza del equilibrio químico: el enfoque basado en la cinética química y el basado en la termodinámica. El enfoque cinético es más tangible dado que brinda explicaciones macro y microscópicas sobre cómo se logra el equilibrio; en cambio, el enfoque termodinámico es más abstracto aunque conceptualmente más actualizado. En general, los libros de texto presentan una combinación de estos modelos del currículo. A continuación se abordará, en particular, la relación entre los modelos históricos definidos anteriormente y una secuencia para la enseñanza del tema.

Los modelos históricos vistos interpretan el equilibrio químico desde las fuerzas, desde las velocidades o desde la energía. Las fuerzas, a su vez, se refieren al nivel macroscópico (como afinidad entre sustancias), y a nivel micro (fuerzas entre partículas). En el enfoque de las velocidades también se aprecian estos dos niveles, donde la explicación micro de las velocidades se interpreta desde el modelo de las colisiones. Finalmente, la energía es vista desde dos ángulos: calor y entropía. ¿Seguir esta secuencia de modelos puede constituir una secuencia adecuada para la enseñanza del equilibrio químico a nivel introductorio?

Niaz (1995) encontró que los estudiantes conceptualizan las velocidades de reacción como fuerzas, en el mismo sentido que el usado en la evolución histórica del concepto *equilibrio químico* y de las concepciones erróneas de los estudiantes sobre la tercera ley del movimiento de Newton. Niaz acepta la hipótesis según la cual la conceptualización de los estudiantes de las reacciones directa e inversa como fuerzas es ontológicamente un paso hacia una más profunda conceptualización del equilibrio químico dinámico. Este autor, asumiendo el marco teórico

de Lakatos (1970), especula afirmando que sí cuando los científicos construyen modelos de complejidad creciente recurren a transiciones epistémicas que incrementan el poder heurístico/explicativo; en forma similar, los estudiantes construirían una serie de modelos que evolucionan, a través de transiciones progresivas, y que los conducirían a una mayor comprensión conceptual.

En este sentido, en este artículo se sugiere una secuencia didáctica que aborde los tres modelos históricos en el orden mencionado anteriormente. Esta propuesta comenzaría por revisar las imágenes que se tienen de un sistema en equilibrio químico, diferenciando equilibrio químico de físico, y discutiendo los distintos significados que se dan al término *equilibrio*, generalmente asociado con una igualdad de fuerzas (Gorodetsky y Gussarsky, 1986). Continuaría con actividades que favorezcan la construcción del modelo cinético y de las colisiones, es decir un enfoque submicroscópico del cambio químico y de las velocidades de reacción. Para, finalmente, arribar al modelo termodinámico. Esto permitiría al alumno construir una imagen del sistema químico con valor explicativo y predictivo, dado que el aspecto dinámico del equilibrio no puede abstraerse directamente del nivel macroscópico del fenómeno.

Como producto de una enseñanza expositiva con hincapié en ecuaciones, y ante la falta de contacto experimental con sistemas en equilibrio químico y de modelos microscópicos en la construcción del concepto, los alumnos recurren a razonamientos analógicos basados en sus experiencias previas. Así, muchos estudiantes asocian el equilibrio químico con equilibrios mecánicos de igualdad de pesos en una balanza, o equilibrios hidrostáticos entre recipientes, que los conducen a imágenes compartimentadas y estáticas del equilibrio químico. En este caso el equilibrio está asociado a una situación de igualdad, que les puede llevar a sostener que en el equilibrio químico las cantidades de reactivos y productos tienen que ser iguales. En conjunción con estas ideas, el peso puesto en la enseñanza en los aspectos simbólicos como la ecuación química puede conducir a los estudiantes, como ya se mencionó, a la idea de una «composición estequiométrica» del equilibrio. Es, en este sentido, de revisar los significados cotidianos y físicos del término *equilibrio* y las imágenes asociadas a ellos, que se comenzaría con el modelo centrado en fuerzas.

La sugerencia anterior se basa en que, como se extrae de este trabajo, en el origen del concepto de *equilibrio químico* tuvo un rol importante el estudio de las velocidades de reacción y las explicaciones microscópicas del fenómeno, y que, posteriormente (y también paralelamente) surgieron las explicaciones termodinámicas. Como ya se mencionó, recurrir directamente al campo de la termodinámica se debió, en varios casos, a la desconfianza en la existencia de los átomos que manifestaron algunos científicos, como el caso de Ostwald.

Bensaude-Vincent y Stengers (1997) se refieren al cambio cualitativo que ha significado el surgimiento de los enfoques cinético y termodinámico en la historia y advierten sobre el grado de abstracción del concepto *en-*

tropía: «...La cinética, con la colisión de reacción, propone una conexión con la física que acentúa el realismo de los átomos y de las moléculas, y les atribuye, más allá de los fenómenos observables, la responsabilidad tanto de las propiedades de los cuerpos químicos como de las modalidades de las transformaciones químicas. Por el contrario, la termodinámica química acentúa la dimensión positivista de la química, y aleja de toda representación intuitiva del fenómeno químico y de sus causas para hacer de ella una función abstracta de los parámetros manipulables.» (p. 187)

La naturaleza termodinámica del equilibrio es la aceptada actualmente. El enfoque termodinámico permite explicar, por ejemplo, por qué las constantes de equilibrio son adimensionales y también, utilizando el concepto *actividad*, por qué no se incluyen sólidos y líquidos puros en la ecuación *K*. Las críticas al enfoque cinético se basan en la determinación de la constante de equilibrio a partir de igualar las dos ecuaciones de velocidad de reacción directa e inversa. Esta crítica puede conducir a sugerir la supresión total del enfoque cinético y a su reemplazo por fórmulas de la termodinámica; esto puede llevar a los alumnos a avanzar «a ciegas» sin una imagen del sistema. En lugar de ello, seguramente ocurrirá que los estudiantes construirán imágenes en sus mentes que, generalmente, no coincidirán con los objetivos deseados (por ejemplo sistemas mecánicos o derivados de la ecuación química). Por ello, es necesario ofrecer modelos alternativos conformados por proposiciones e imágenes adecuadas, como se sugiere en esta propuesta con la progresión de los tres modelos históricos abordados, que lleven a revisar los modelos que se van formando en la mente de los estudiantes.

Para Quílez (2002), un estudio histórico puede servir para fundamentar la introducción del concepto de *equilibrio químico* mediante una apropiada secuencia de aprendizaje. Esta secuencia comenzaría cuestionando las ideas iniciales de que las reacciones químicas se producen en forma completa y en un solo sentido, a través de experimentos que brinden evidencias a nivel macroscópico. La formulación de la ley de equilibrio se obtendría de datos empíricos y, sobre esta base, se introducirían modelos que intenten explicar a nivel submicroscópico los aspectos previos.

Por otro lado, la historia de las ciencias puede ayudar en la definición de *conceptos estructurantes*, es decir aquellos conceptos que una vez que han sido construidos por el alumno determinan una transformación de su sistema conceptual que le permite continuar con el aprendizaje (Gagliardi, 1988). Existen conceptos que han permitido la transformación de una ciencia a través de la elaboración de nuevas teorías; por ejemplo, relacionar los fenómenos macroscópicos con lo microscópico determinó la aparición de nuevos problemas a resolver en química, como los referidos a la composición de las sustancias. En este sentido, para ir más allá de suministrar excesiva información inconexa, la enseñanza debería procurar presentar los conceptos o principios estructurantes de cada disciplina. Sobre esta argumentación, puede rescatarse el espíritu de Guldberg y Waage o de Le Chatelier que bus-

caban principios o leyes generales para la química que hasta ese momento era considerada como una ciencia puramente empírica.

El cambio histórico de concepción que significó pasar de las afinidades electivas a considerar también la acción de las cantidades (la acción de masas o de concentraciones) fue un cambio histórico resistido, no aceptado inicialmente a pesar de su sustento experimental. Esta idea puede ser considerada como apoyada en una base intuitiva, que le otorga toda la causa de que una reacción se produzca o no en un sentido, a la naturaleza de las sustancias que reaccionan. La enseñanza refuerza esta idea con el hincapié que se da a la formulación de compuestos en reacciones que se completan (irreversibles), donde siempre algunas sustancias reaccionan entre sí (en un único sentido) y otras, no lo hacen. En cambio, la idea de que el equilibrio se logra desde distintas situaciones iniciales, a T constante, con la misma K_c , no es una idea a la que se le preste la necesaria atención que merece, si se tiene en cuenta el cambio de concepción que se está introduciendo en el currículo. Por ello, el llamado *enfoque empírico*, en el que se presentan datos de concentraciones iniciales y sus posteriores concentraciones en el equilibrio, debería discutirse detenidamente.

Otra cuestión, que apoya esta secuencia de enseñanza, es tener en cuenta cómo determinados científicos se basaron en las ideas de sus predecesores y contemporáneos para emitir nuevo conocimiento. Por ejemplo, Pfaundler, en 1867, reformuló la idea de Williamson que explicaba el equilibrio como la producción simultánea de dos reacciones químicas en sentidos opuestos; otro ejemplo es la explicación molecular dada por Clausius en 1857, basada en la teoría cinética de la evaporación de un líquido. Pfaundler supuso que igual número de moléculas se unen y se descomponen por colisión. Curiosamente Caruso y otros (1997), sin mencionar referencias históricas, proponen para construir la idea de equilibrio dinámico la alternativa de usar la evaporación del agua, hecho

conocido y significativo para el alumno. Estos autores consideran la evaporación del agua como un fenómeno de partida para que los estudiantes lo interpreten utilizando el modelo de partículas hasta llegar al modelo del sistema en equilibrio dinámico.

En definitiva, en el párrafo anterior se ha propuesto rescatar las analogías usadas en la construcción del conocimiento para un uso didáctico. Si los científicos utilizaron analogías para divulgar sus ideas entre otros científicos, para hacer más accesible aspectos complejos, con mayor razón se justifica su utilización en el ámbito de la enseñanza.

Por último, en el estudio de la evolución histórica del concepto *equilibrio químico* se encuentran muchas referencias a reacciones químicas que actualmente se citan en los textos y se emplean en los laboratorios de enseñanza. Por ejemplo, los experimentos de investigadores de la segunda mitad del siglo XIX: Wilhelmy (inversión de la sacarosa), Gladstone (ión hierro III + tiociocianato), Bethelot y St. Gilles (alcohol + ácido), Playfair y Wanklyn (disociación del tetraóxido de dinitrógeno), Hautefeuille y Lemoine (yodo + hidrógeno), Horstmann (la descomposición del CaCO_3 y del PCl_5), etc. Estos experimentos dieron apoyo a la idea de la acción de las cantidades en las reacciones químicas y al reconocimiento del equilibrio químico. En este sentido, podría resultar beneficioso discutir con los alumnos alguna publicación original de dicha reacción química mientras dicha reacción se realiza paralelamente en el laboratorio.

La utilización didáctica de estos experimentos ha tenido su propia evolución, en muchos casos acompañada de un extenso debate en publicaciones de enseñanza de la química (Raviolo, 1999). Esto permitiría referirse a una «historia» del uso didáctico de experimentos que contribuyeron a la construcción conceptual de la química como ciencia. Esa mirada histórica también contribuiría a consolidar la didáctica de la química como ciencia, en el campo de la didáctica de las ciencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTOLFI, J.P. (1994). El trabajo didáctico de los obstáculos, en el corazón de los aprendizajes científicos. *Enseñanza de las Ciencias*, 12(2), pp. 206-216.
- BENSAUDE-VINCENT, B. y STENGERS, I. (1997). *Historia de la Química*. Madrid: Addison-Wesley/Universidad Autónoma de Madrid.
- BIZZO, N. (1993). Historia de la ciencia y enseñanza de la ciencia: ¿qué paralelismos cabe establecer? *Comunicación, Lenguaje y Educación*, 18, pp. 5-14.
- BROCK, W.H. (1998). *Historia de la química*. Madrid: Alianza.
- BRUSH, S. (1989). Historia de la ciencia y enseñanza de las ciencias. *Comunicación, Lenguaje y Educación*, 11-12, pp. 169-180.
- CARUSO, F. et al. (1997). Propuesta didáctica para la enseñanza-aprendizaje del equilibrio químico. *Enseñanza de las Ciencias*. Número Extra. V Congreso.
- DE HEER, J. (1957). The principle of Le Chatelier and Braun. *Journal of Chemical Education*, 34(8), pp. 375-380.
- FURIÓ, C. y ORTIZ, E. (1983). Persistencia de errores conceptuales en el estudio del equilibrio químico. *Enseñanza de las Ciencias*, 1(1), pp. 15-20.

- GAGLIARDI, R. (1988). Cómo utilizar la historia de las ciencias en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(3), pp. 291-296.
- GAGLIARDI, R. y GIORDAN, A. (1986). La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 4(3), pp. 253-258.
- GAULD, C. (1991). History of science, individual development and science teaching. *Research in Science Education*, 21, pp. 133-140.
- GIL, D. (1993). Aportaciones de la didáctica de las ciencias a la formación del profesorado, en Montero, L. y Vez, J. (eds.). *Las didácticas específicas en la formación del profesorado*, pp. 277-293. Santiago: Tórculo.
- GILBERT, J.K. y BOULTER, C.J. (2000). *Developing models in Science Education*. Dordrecht: Kluwer.
- GORODETSKY, M. y GUSSARSKY, E. (1986). Misconceptualization of the chemical equilibrium concept as revealed by different evaluation methods. *European Journal of Science Education*, 8(4), pp. 427-441.
- GUGGENHEIM, E.A. (1956). More about law of reaction rates and of equilibrium. *Journal of Chemical Education*, 33(11), pp. 544-545.
- IHDE, A.J. (1964). *The development of modern chemistry*. Nueva York: Harper & Row.
- IZQUIERDO, M. (1996). Relación entre la historia y la filosofía de la ciencia y la enseñanza de las ciencias. *Alambique*, 8, pp. 7-21.
- JUSTI, R. y GILBERT, J.K. (1999). History and philosophy of science through models: the case of chemical kinetics. *Science and Education*, 8, pp. 287-307.
- LAIDLER, K.J. (1984). The development of the Arrhenius equation. *Journal of Chemical Education*, 61(6), pp. 494-498.
- LAKATOS, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes, en Lakatos y Musgrave (eds.). *Criticism and the growth of knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LEICESTER, H.M. (1967). *Panorama histórico de la Química*. Madrid: Alhambra.
- LINDAUER, M.W. (1962). The evolution of the concept of chemical equilibrium from 1775 to 1923. *Journal of Chemical Education*, 39(8), pp. 384-390.
- LUND, E.W. (1965). Guldberg y Waage and the law of mass action. *Journal of Chemical Education*, 42(10), pp. 548-550.
- LUND, E.W. (1968). «Activated complex» – a centenarian? A tribute to Leopold Pfaundler. *Journal of Chemical Equilibrium*, 45(2), pp. 125-128.
- MATTHEWS, M.R. (1994). *Science teaching: The role of history and philosophy of science*. Londres: Routledge.
- MELLADO, V. y GONZÁLEZ, T. (2000). La formación inicial del profesorado de ciencias, en Perales, F. y Cañal, P. (dir.). *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. Cap. 22. Alcoy: Ed. Marfil.
- MIERZECKI, R. (1991). *The historical development of chemical concepts*. Londres: Kluwer Academic Publishers.
- MOORE, F.J. (1953). *Historia de la Química*. Barcelona: Salvat.
- NIJAZ, M. (1995). Chemical equilibrium and Newton's third Law of Motion: ontogeny/phylogeny revisited. *Interchange*, 26(1), pp. 19-32.
- PARTINGTON, J.R. (1964). *A history of chemistry*. Volume four. Londres: Macmillan.
- PATY, M. (1985). Le Chatelier y la ley de los equilibrios químicos. *Mundo Científico*, 5(49), pp. 808-810.
- QUÍLEZ, J. (2002). Aproximación a los orígenes del concepto de equilibrio químico: algunas implicaciones didácticas. *Educación Química*, 13(2), pp. 101-112.
- RAVIOLO, A. (1999). Color y enseñanza en equilibrio. *Educación en Ciencias*, (a) Revisión de experimentos sobre equilibrio químico, 3(7), pp. 21-27; (b) Revisión de experimentos sobre equilibrio químico (Segunda parte), 3(8), pp. 51-58; (c) Revisión de experimentos sobre equilibrio ácido-base, 3(9), pp. 66-74.
- RAVIOLO, A. (2003). Modelos históricos sobre el equilibrio químico. *Educación en la Química*, 9(3), pp. 17-26.
- RAVIOLO, A. (2005). «Enseñanza y aprendizaje de modelos sobre el equilibrio químico. Una propuesta didáctica con alumnos universitarios españoles y argentinos». Tesis Doctoral. Facultad de Educación. Universidad Complutense de Madrid.
- RAVIOLO, A. y MARTÍNEZ AZNAR, M. (2003). Una revisión sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en relación con el equilibrio químico. Clasificación y síntesis de sugerencias didácticas. *Educación Química*, 14(3), pp. 60-66.
- RAVIOLO, A. y MARTÍNEZ AZNAR, M. (2005). El origen de las dificultades y de las concepciones alternativas de los alumnos en relación con el equilibrio químico. *Educación Química*, 16 (número extraordinario), pp. 159-166.
- SOLBES, J. y TRAVER, M. (1996). La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la física y la química. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(1), pp. 103-112.
- VAN DRIEL, J.H., DE VOS, W. y VERLOOP, N. (1998). Relating students' reasoning to the history of science: the case of chemical equilibrium. *Research in Science Education*, 28(2), pp. 187-198.

[Artículo recibido en mayo de 2004 y aceptado en marzo de 2007]