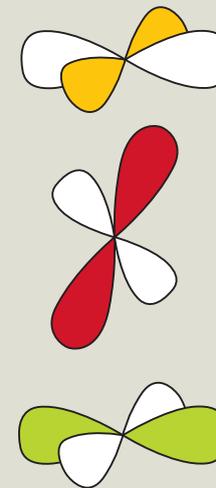


Mercè Izquierdo  
Aureli Caamaño  
Mario Quintanilla  
(Editores)

**Investigar en la enseñanza de la química.  
*Nuevos horizontes: contextualizar y modelizar***



Universitat Autònoma de Barcelona  
Departament de Didàctica de las Matemàtiques i de les Ciències  
Experimentals

---

ISBN 84- 920738-1-0

**Investigar en la enseñanza de la química**  
*Nuevos horizontes: contextualizar y modelizar*

//

**Research in chemistry teaching.**  
*News horizons: contextualizing & modelling*

Universitat Autònoma de Barcelona  
Cerdanyola del Vallès  
2007

### **Editores**

Mercé Izquierdo /Aureli Caamaño/ Mario Quintanilla

### **Copyright © 2007 Editores y contribuidores**

Agustín Adúriz-Bravo /Luiz Otávio F. Amaral /Aureli Caamaño /  
Sibel Erduran / Josep Lluís Estaña / Mercè Izquierdo / Onno de Jong /  
Cristian Merino/ Eduardo Mortimer /Teresa Prieto/ Mario Quintanilla /  
Neus Sanmartí / Jan Van Driel / Rod Watson.

### **Impresión**

Universitat Autònoma de Barcelona  
Servicio de Publicaciones  
08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès), España  
sp@uab.es  
[Http://publicacions.uab.es](http://publicacions.uab.es)

### **Compilación y maquetación**

Cristian Merino

Primera edición 2007

Impreso en España.  
ISBN: 84- 920738-1-0  
Depósito legal: B.26709-2007

## Índice

	<b>Presentación</b>	<b>5</b>
	<i>Editores</i>	
<b>Modelizar y contextualizar el curriculum de química: un proceso en constante desarrollo</b>		<b>19</b>
	<i>Aureli Caamaño</i>	
<b>Bonding epistemological aspects of models with Curriculum design in acid-base chemistry</b>		<b>41</b>
	<i>Sibel Erduran</i>	
<b>Growth of prospective chemistry teachers pedagogical content knowledge of particle models</b>		<b>73</b>
	<i>Onno de Jong &amp; Jan Van Driel</i>	
<b>Conceptual profiles: a research program on teaching and learning scientific concepts</b>		<b>91</b>
	<i>Eduardo Mortimer &amp; Luiz Otávio F. Amaral</i>	
<b>Trabajo práctico y concepciones de los alumnos: la combustión</b>		<b>115</b>
	<i>Teresa Prieto &amp; Rod Watson</i>	
<b>Actividad química escolar: modelización del cambio químico</b>		<b>141</b>
	<i>Mercè Izquierdo, Neus Sanmartí &amp; Josep Lluís Estaña</i>	
<b>Research and teaching practice in chemistry education: living apart or together?</b>		<b>165</b>
	<i>Onno de Jong</i>	
<b>Discusión en torno a un modelo para introducir la historia de la ciencia en la formación inicial del profesorado de ciencias</b>		<b>173</b>
	<i>Mario Quintanilla, Mercé Izquierdo &amp; Agustín Adúriz-Bravo</i>	
<b>Consideraciones finales entorno al debate</b>		<b>197</b>



Se reúnen en este volumen diversas ponencias sobre investigación en enseñanza de la química. La mayoría de ellas han sido presentadas en el Seminario de investigación sobre la enseñanza de la química "*Nuevos horizontes: contextualizar y modelizar*"<sup>1</sup> que se llevó a cabo en abril de 2003 y sólo una de ellas ha sido el resultado de un proyecto de cooperación entre la Universitat Autònoma de Barcelona y la Pontificia Universidad Católica de Santiago de Chile, en el cual se hicieron propuestas de formación del profesorado de química según este mismo enfoque.

Estas actividades fueron organizadas debido a una preocupación compartida por todos acerca del estado actual de la enseñanza de la química, que apenas se enseña en la Enseñanza Primaria, presenta un elevado índice de fracaso en la ESO (etapa 12-16 años) y, al ser obligatoria en una sola modalidad de Bachillerato, es estudiada de manera preceptiva por un número cada vez menor de estudiantes, puesto que son pocos los que la escogen como materia optativa. Además, y esto es lo más importante para nosotros, la enseñanza de la química se mantiene aún en un nivel muy abstracto y formalizado, con lo cual presenta dificultades específicas que hacen muy difícil 'poner en contexto' los temas y seguir, en clase, un proceso de modelización en el cual la interacción discursiva entre los estudiantes y los profesores tenga el lugar que se merece.

La difícil situación de la química en las aulas se corresponde con el cambio que están experimentando sus alumnos. Se valoran ahora los conocimientos aplicados y gestión las informaciones que aparecen en los medios de comunicación, los cuales resultan más atractivos que los que provienen de una disciplina que se presenta mediante fórmulas de difícil interpretación para quienes son ajenos a los intereses específicos de la química.

La química conquistó su estatus de disciplina científica universitaria relativamente tarde, a lo largo de los siglos XIX y XX. Pero si tenemos en cuenta la importancia de las transformaciones químicas en la vida cotidiana, en el arte y en la economía de los pueblos, la historia de la química se remonta a épocas muy remotas y debe reconocerse que,

---

<sup>1</sup> El Seminario fue organizado conjuntamente por el Departament de Didàctica de les Matemàtiques i de les Ciències Experimentals de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) i el Col·legi de Doctors i Llicenciats de Catalunya (CDL).

desde hace siglos, la capacidad de crear nuevos materiales ha formado parte del imaginario humano. La enseñanza de la química tiene una historia aún más compleja. No hace mucho tiempo que la química tiene un lugar en la enseñanza preuniversitaria y aún ha de encontrar su lugar en la formación obligatoria de los actuales ciudadanos. Siempre ha sido muy difícil enseñar química a quienes no la practican, y si bien el 'invento' (relativamente reciente) de las fórmulas y ecuaciones químicas parece allanar el camino, en general no es así, porque debería conectar con una 'experiencia química' que no se adquiere mediante las pocas prácticas de laboratorio que están previstas en los currículos actuales y que no todas las escuelas pueden llevar a cabo en condiciones óptimas.

Las dificultades actuales al enseñar química pueden interpretarse a la luz de estos planteamientos. Enseñarla 'a todos' a base de fórmulas y ecuaciones es, simplemente, imposible porque muy pocas personas llegan a intuir el significado de las entidades abstractas que las fórmulas representan y su relación con fenómenos del mundo real como por ejemplo la combustión, los procesos de limpieza, la cocina, los medicamentos... Por esto a menudo las clases no funcionan del todo bien, se genera fracaso y, en consecuencia muchos buenos profesores se desaniman.

Nuestro objetivo fue reflexionar sobre las buenas prácticas en la enseñanza de la química en programas CTS o de ciencia integrada, en los cuáles las principales ideas se presenten a partir de problemas relevantes que puedan ser resueltos mediante un proceso de modelización. Para ello intentamos poner en común algunas investigaciones que nos parecieron especialmente relevantes. Con todo ello, pretendemos poder llegar a interpretar los principales fenómenos químicos pero sin poner como condición de partida el dominio del lenguaje simbólico y la comprensión de un modelo atómico que está muy alejado del sentido común y de cualquier teoría física que pueda aplicarse a los objetos que nos rodean.

Se perfila un camino para avanzar en esta dirección, tal como se desprende de las aportaciones de este volumen: identificar temas de interés social y tecnológico que sean relevantes para la química y explicar los fenómenos químicos seleccionados mediante una teoría adaptada a las experiencias que pueden llevarse a cabo los centros y a las posibilidades cognitivas de los alumnos. Para que la innovación y investigación en didáctica de la química avancen a la par, tal como creemos que debería suceder, se ha de establecer una relación estrecha entre la universidad y las aulas, hasta el extremo de que, al

menos en algún caso, el investigador y el docente sean una misma persona. Sólo así van a poder detectarse los problemas propios de las aulas reales, que son los que deberían dar pie a la investigación en didáctica de la química.

Cada capítulo corresponde a una de las conferencias que se impartieron en el Seminario, con excepción del último de ellos, que es el resultado del trabajo conjunto con la Universidad Católica de Santiago de Chile. Los presentamos brevemente a continuación. Los dos primeros presentan los dos nuevos enfoques de la enseñanza de la química que van siendo considerados imprescindibles: contextualizar (capítulo 1) y modelizar (capítulo 2).

**1. Modelizar y contextualizar el currículum de química: un proceso en constante desarrollo.** *Aureli Caamaño, Centre de Documentació i Experimentació en Ciències i Tecnologia, Barcelona, Espanya.*

*En este capítulo el autor describe de forma breve la evolución sufrida por el currículum de química en la educación secundaria en las últimas décadas, centrándose a continuación en el debate sobre cuáles son las cuestiones clave de las que se ocupa la química y cuáles deberían de ser los contenidos básicos del currículum de química. Propone que los procesos de modelización deberían constituir el eje fundamental de la construcción de los conocimientos químicos de los cursos de química y que la contextualización de los contenidos es una necesidad ineludible para dotar de mayor relevancia a los currículos y justificar la importancia de los conceptos y métodos químicos cuyo aprendizaje se pretende.*

*Algunas de las cuestiones clave de la química de carácter teórico y práctico que el autor destaca son las siguientes: ¿cómo podemos clasificar la diversidad de sistemas químicos?, ¿cuál es la composición y la estructura interna de las sustancias?, ¿en qué consiste el cambio químico?, ¿cómo transcurren las reacciones químicas?, ¿qué cambios moleculares se producen?, ¿por qué ciertas sustancias muestran "afinidad" por otras?, ¿por qué ciertas reacciones tienen lugar hasta el final y otras "se detienen" antes de completarse?, ¿qué criterio rige la espontaneidad de las reacciones químicas?, ¿cómo se enlazan los átomos para formar moléculas o estructura gigantes?, ¿cuál es la geometría de las moléculas?, ¿de dónde proviene la energía que se desprende o se absorbe en las reacciones químicas?, ¿con qué velocidad tienen lugar y cómo podemos modificar su velocidad?, ¿a través de qué mecanismo o sucesión de reacciones elementales tienen lugar?, ¿cuál es la estructura interna de los átomos?, ¿cómo*

*interacciona la materia y la electricidad?, ¿cómo interacciona la materia con la radiación electromagnética?, ¿cómo podemos conceptualizar la gran diversidad de reacciones químicas que existen?, ¿cómo pueden sintetizarse nuevas moléculas y materiales?*

*Se considera que los conceptos y modelos que se han elaborado para dar respuesta a estas cuestiones a lo largo de la historia y los métodos que se han desarrollado para conseguirlo forman el cuerpo de conocimientos conceptuales y procedimentales de la química como ciencia, y que una parte sustancial de los contenidos curriculares de la química en la educación secundaria y universitaria procede de la transposición curricular y didáctica que se hace de estos conocimientos y procedimientos. Y se destaca que los criterios de selección de los contenidos en los currículos actuales de química no pueden guiarse sólo por la importancia disciplinar de los conceptos o procedimientos de la química como ciencia, y que es preciso plantearse con mayor énfasis que los procesos de modelización de los fenómenos y situaciones abordadas en los cursos de química constituyan el eje fundamental de estos cursos, a la vez que se presta mayor atención a los siguientes contenidos: la naturaleza de la química como ciencia, la química como ciencia aplicada, la relación de la química con el resto de ciencias, la relación de la química con la sociedad, y la implicación de la química en la consecución de un desarrollo sostenible que respete el medio ambiente.*

*Como ejemplos ilustrativos de proyectos que han intentado dar cuenta de estas dimensiones de la enseñanza de la química, el autor hace referencia especialmente a dos de ellos: la Química Faraday, un proyecto elaborado en los años 80, que se propuso desarrollar los conceptos químicos de un curso de química de secundaria siguiendo su evolución histórica y estableciendo un continuo contraste entre hipótesis y evidencias experimentales; y la Química Salters, adaptación del proyecto inglés Salters Advanced Chemistry, realizada en el período 1995-1998, y caracterizada por adoptar un enfoque basado en el contexto y por proponer actividades prácticas contextualizadas. Después de analizar brevemente las aportaciones y las limitaciones de estas experiencias, el autor considera que los cambios propuestos en los contenidos del currículum de química deberían ir acompañados de un mayor conocimiento de las dificultades de aprendizaje de los conceptos, modelos y procedimientos de la química, y de un uso más eficaz de las estrategias didácticas y recursos disponibles para ayudar a superarlas, así como de mayores avances en una formación del profesorado*

*ligada a procesos de investigación-acción sobre nuevos materiales de química contextualizados.*

**2. 'Bonding epistemological aspects of models with curriculum design in acid - base chemistry.** *Sibel Erduran, King's College, London, United Kingdom.*

*Sibel Erduran hace un repaso exhaustivo de la bibliografía sobre 'modelos' y 'modelización' en la enseñanza de las ciencias; recomienda introducir los modelos científicos al enseñar ciencias y, a la vez, hacer ver a los alumnos cómo y por qué se han construido estos modelos, proporcionando a los alumnos los recursos necesarios para que comprendan su valor epistemológico.*

*Se constata que, en química, se hace muy difícil ajustarse a este enfoque, porque los modelos (las fórmulas, por ejemplo) se presentan a los alumnos como si proporcionaran un conocimiento real de los materiales, como si mostraran su auténtica identidad; los conceptos químicos se deducen de los modelos, cuando deberían ser los modelos los que dieran significado a las entidades químicas. Finalmente, los modelos químicos se acostumbran a identificar con las maquetas hechas con bolas y enlaces que simulan átomos enlazados para formar moléculas; y estos modelos, físicos, no logran conectar con las dificultades del cambio químico. Tampoco es acertada la creciente implicación de la mecánica cuántica, puesto que parece sugerir que la comprensión de la química depende del desarrollo de la mecánica cuántica. Y, finalmente, si bien se insiste en que 'la química es una ciencia experimental', pocas veces la experimentación da lugar a una auténtica actividad de modelización.*

*Como aplicación de la propuesta, y como sugerencia para superar estas dificultades, se presenta una actividad diseñada para enseñar química (ácidos y bases) a través de modelos y modelización, con la finalidad de que, además de procurar la adquisición de conocimientos químicos, los alumnos adquieran los criterios, estándares y heurísticos que permiten que el conocimiento químico progrese; y muestra el proceso gracias al cual los alumnos llegan a interpretar las ideas principales del tema. En cada una de las etapas de la actividad se introducen modelos muy bien caracterizados, cada uno de los cuales adquiere una función específica en el proceso de enseñanza y aprendizaje.*

Los dos capítulos siguientes introducen una de las principales dificultades de la química: la intervención de las moléculas en los cambios químicos (capítulo 3) y la relación entre los cambios de los materiales y las partículas (capítulo 4).

**3. Conceptual profiles: a research program on teaching and learning scientific concepts.** Eduardo Mortimer & Luiz Otavio Fagundez Amaral, Universidad Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

*En este capítulo se presentan las líneas básicas de un programa de investigación mediante el cual se identifican las diversas zonas que constituyen el perfil conceptual de los conceptos científicos, proponiendo como ejemplo el perfil conceptual de 'molécula química'.*

*Se asume, siguiendo a Bakhtin, que coexisten, en un mismo individuo, diferentes significados para un mismo concepto o palabra, que se activan según sea el contexto al que se aplica y que determinan su 'perfil conceptual'. El aprendizaje, desde este punto de vista, consiste en la expansión de las zonas que constituyen el perfil a la vez que se toma consciencia de la multiplicidad de contextos y de significados y de la necesidad de establecer un diálogo entre todos ellos. Y, siguiendo a Vygotsky, se asume que en un mismo ambiente cultural se comparte una 'representación colectiva' que hace posible la comunicación y que se impone al sistema cognitivo individual: con ello se proporciona una dimensión social a los procesos mentales humanos.*

*Para establecer el perfil conceptual de algunos de los principales conceptos científicos (de 'molécula química', en el ejemplo que se propone aquí) se han diseñado diversos instrumentos de investigación, que han sido utilizados también para analizar propuestas de enseñanza y de aprendizaje de estos mismos conceptos. En este ejemplo, las tres zonas del perfil conceptual se establecen a partir de la historia de la química y aparecen asociadas a 'los principios', a la 'substancialización de las propiedades' y a una supuesta 'unidad formada por átomos estructurados'. Se muestra que cada una de ellas aporta algo de significado a la palabra 'molécula'*

*Con todo ello se pone en cuestión la universalidad e independencia del contexto de este concepto básico de la química y la necesidad de tener en cuenta puntos de vista complementarios para utilizarlo en diferentes contextos, a la vez que se comprenden mejor los obstáculos ontológicos y epistemológicos que se derivan de enfoque*

*estrictamente realista de las entidades científicas que dificulta un correcto aprendizaje de las ciencias en la escuela. En base a estas consideraciones, centradas en la interacción entre diferentes modos de pensamiento y de lenguaje, se pueden diseñar mejores estrategias para enseñar química.*

**4. Growth of prospective chemistry teachers pedagogical content knowledge of models and modelling.** *Onno De Jong, Utrecht University, Utrecht & Jan Van Driel, Leiden University, Leiden. Netherlands.*

*En este capítulo se proporcionan resultados de un curso de formación de profesores de química. Se analiza el desarrollo del Conocimiento Pedagógico del Contenido (Pedagogical Content Knowledge, PCK) en un grupo de 12 futuros profesores de química (todos ellos M.Sc.) durante un programa de postgraduación para la formación inicial de profesores.*

*El Conocimiento Pedagógico del Contenido tiene dos componentes: el conocimiento de la estrategia de enseñanza, que incluye las representaciones y las actividades necesarias para enseñar un tópico determinado, y el conocimiento de los procesos de aprendizaje y de las dificultades de los alumnos a lo largo de este proceso. Es de suponer que ambos conocimientos interactúan y que al conocer mejor las dificultades de los alumnos a partir de la práctica de la enseñanza evolucionan y mejoran las estrategias de enseñanza.*

*Estos futuros profesores participaron en un curso organizado en cuatro etapas o módulos sobre modelos y modelización en ciencias. Cada módulo consistió en talleres institucionales conectados con experiencias de enseñanza. En la primera etapa se discutió el PCK sobre modelos y modelización. En la segunda, se leyeron y discutieron artículos y libros sobre la enseñanza de modelos y de modelización. En la tercera, se enseñaron temas en los cuales se utilizaron modelos (partículas) y se siguió un proceso de modelización. Finalmente, en la cuarta, se discutieron los resultados de las lecciones que los profesores en formación habían realizado en los centros de prácticas.*

*Los datos de la investigación se obtuvieron a partir de las respuestas escritas a las cuestiones que guiaron la investigación, de las transcripciones de las discusiones y de los informes de las clases. Los resultados revelaron que los futuros profesores utilizaron sobretudo estrategias didácticas tradicionales que ya conocían previamente, para mostrar la relación entre las partículas y los fenómenos a pesar*

*de que, como también se demostró, conocían mayor las dificultades de aprendizaje de los alumnos en este tema específico.*

*Así, a pesar de que la mitad de los estudiantes ya sabían inicialmente que los modelos eran invenciones humanas apropiadas para enseñar y conocían también las estrategias didácticas apropiadas para enseñar a modelizar los fenómenos mediante partículas, no desarrollaron estos conocimientos a lo largo del curso de formación, sino que se limitaron a aplicar estrategias de enseñanza ya conocidas y 'seguras'.*

A continuación se presentan dos artículos que se refieren a las dificultades que plantean los experimentos sobre cambios químicos a los alumnos (capítulos 5) y se hace una propuesta de modelización a partir de 'fenómenos ejemplares' (capítulo 6).

**5. Trabajo práctico y concepciones de los alumnos: la combustión.**  
*Teresa Prieto, Universidad de Málaga, Málaga, España & Rod Watson, King Collage, London, United Kingdom.*

*En el capítulo 5 Teresa Prieto y Rod Watson describen una investigación sobre las concepciones acerca de la combustión de una muestra de estudiantes españoles e ingleses y sobre el efecto del trabajo práctico sobre la comprensión de este fenómeno. Consideran que las concepciones de los estudiantes son constructos dotados de cierta complejidad y coherencia, la cual es preciso descubrir a través de la investigación.*

*Para investigar estas ideas han construido un cuestionario abierto en que las cuestiones se centran en la naturaleza del proceso de combustión, los reactivos y productos de la combustión, la participación del oxígeno en la combustión, aspectos de conservación, y ejemplos aportados por los alumnos sobre sustancias combustibles y no combustibles. El análisis de las respuestas lo realizan basándose en tres grandes categorías de explicaciones: explicaciones basadas en las ideas de reacción química, de transmutación y de modificación, y teniendo en cuenta tres dimensiones: el papel del oxígeno/aire el fuego/llama, los reactivos y los productos de la reacción. Por ejemplo, por lo que se refiere la interacción y papel del oxígeno, encuentran alumnos que reconocen que la sustancia combustible y el oxígeno del aire interaccionan y forman parte de los productos de combustión (modelo de reacción química), alumnos que creen que no existe interacción entre el combustible y el oxígeno del aire, aunque el oxígeno pueda ser*

*considerado necesario para que la combustión tenga lugar, tratándose de un proceso destructivo no reversible (modelo de transmutación), y alumnos que creen que el oxígeno o el aire no están implicados en el cambio y que el proceso es reversible (modelo de modificación).*

*Una comparación entre las tipología de explicaciones que encuentran en ambas muestras de alumnos pone de manifiesto diferentes grados de proximidad a la teoría científica, desde los alumnos que no dan ninguna explicación o que fallan en distinguir un cambio físico de uno químico, hasta los alumnos que dan una explicación científica de un nivel adecuado a su edad. En su trabajo intentan identificar una progresión en la comprensión del proceso de combustión a través de los modelos mentales descritos (abandonando el modelo de transmutación y ganando conocimiento de la interacción de los reactivos, la conservación de la masa, el papel de los gases, etc.) y la comprensión del cambio químico, al poder reconocer diferentes ejemplos de combustión.*

*Posteriormente los autores indagaron cuál puede haber sido el impacto de la experiencia escolar en un amplio rango de fenómenos relativos a la combustión sobre la comprensión de los alumnos de este proceso. Para ello realizaron una serie de entrevistas centradas en la experiencia práctica que los estudiantes han tenido sobre ejemplos específicos de combustión utilizados en un cuestionario y en la extensión en la cual los profesores utilizan trabajos prácticos realizados por los alumnos o bien demostraciones. Los resultados de estas entrevistas muestran que el enfoque didáctico en el Reino Unido es mucho más práctico que en España y que aporta a los alumnos experiencias sobre aspectos de las reacciones químicas que no son perceptibles en la vida diaria, tales como la implicación de los gases en el cambio de masa de las sustancias en las reacciones de combustión. También muestran la gran influencia de los ejemplos de combustión que los alumnos experimentan en su vida diaria, mientras que la influencia del trabajo de laboratorio tiene un impacto en la comprensión conceptual de los estudiantes, pero no en la medida que se podría esperar. Los autores concluyen que los resultados muestran claramente la utilidad del trabajo práctico para mejorar la comprensión de la combustión, aunque también evidencian que una proporción alta de alumnos no consiguen, a pesar de ello, apropiarse de un modelo explicativo científico y apuntan como una posible razón de esta situación el que no se dedique suficientemente tiempo a la interacción de los estudiantes para discutir sus ideas.*

**6. 'Actividad química escolar: modelización del cambio químico'.**  
Mercè Izquierdo, Neus Sanmartí & Josep Lluís Estaña. Univesritat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Espanya.

*En este capítulo se da un nuevo significado a 'Modelo' y Modelización', que no contradice a la numerosa bibliografía existente sobre este tema ni se opone a las aportaciones que se hacen en los restantes capítulos de este volumen, sino que la complementa.*

*Se utiliza la historia de la química para presentar un episodio que sirve de ejemplo para el proceso de modelización gracias al cual emergieron los conceptos básicos de química como elemento, sustancia...gracias a los cuales 'hechos' que parecían desconectados entre si llegaron a constituirse en una trama de relaciones con sentido y se identificaron las 'reglas' que guían las acciones, las ideas y los lenguajes con los cuales se interviene de manera coherente en los fenómenos químicos.*

*En la propuesta didáctica que se hace en este capítulo se llama 'Modelo de Cambio Químico' a un conjunto de afirmaciones o reglas de comportamiento conectadas a fenómenos químicos seleccionados por su importancia conceptual y práctica, en los que los alumnos pueden intervenir y que les permiten representarse determinadas 'entidades químicas' con las cuales dar razón de los cambios que se están estudiando. Los fenómenos seleccionados van concretando la química que los alumnos puede hacer a lo largo de la escolaridad; con ello, la 'Modelización' se vincula al diseño curricular.*

*En el ejemplo de 'fenómeno ejemplar' que se presenta, se introduce el cambio químico a partir de la carbonización de la madera que se lleva a cabo en las aulas mediante una genuina actividad química escolar gracias a la cual los conceptos químicos adquieren el sentido práctico y axiológico que tuvieron en su origen y que da significado a la teoría atómica química. Este conjunto de fenómenos llegarán a ser, todos ellos, 'modelos' del Cambio Químico*

Los dos últimos capítulos se refieren a la formación del profesorado, que debería estar cercana a la investigación (capítulo 7) y ofrecer contenidos de historia y filosofía de las ciencias (capítulo 8).

## **7. Teaching practice and research in chemistry education: living apart or together? Onno de Jong, Utrecht University, Utrecht, Netherlands.**

*En el capítulo 7 Ono de Jong aborda el problema que plantea el problema de la distancia existente entre la investigación en didáctica de la química y la enseñanza de la química, intentando buscar explicaciones a este hecho y proponer posibles acciones para superar esta situación, basadas en establecer vínculos más estrechos entre la investigación didáctica y la práctica docente.*

*El autor analiza brevemente los orígenes de la investigación didáctica en química, que considera estuvieron influenciados por la reforma a gran escala del currículum de ciencias emprendido en los EEUU en los años 50, y en el Reino Unido en la primera mitad de los años 60. Estas reformas estaban fundamentalmente guiadas por el objetivo de presentar más adecuadamente el cuerpo de conocimientos de la química en función de conceptos y principios químicos básicos, en lugar de basarse en largas series de hechos químicos. Los nuevos materiales curriculares fueron desarrollados por equipos de químicos y profesores de química con la colaboración de especialistas de otras áreas, como los de la psicología del aprendizaje, pero faltó la colaboración de la investigación en educación química, por la simple razón que no existía. Sin embargo, este desarrollo curricular estimuló el interés para aportar evidencia sobre los efectos de los nuevos currículos en el conocimiento y en la formación científica de los estudiantes. Un desarrollo posterior de la educación química en los años 80 y 90 tuvo lugar como consecuencia de la emergencia de áreas de investigación como las concepciones alternativas de los estudiantes y sus formas de razonamiento, y el aprendizaje de los conceptos químicos en contexto. Ejemplos de este último enfoque lo constituyen proyectos curriculares como el Salters Chemistry o el ChemCom, que muestran una mayor preocupación por el aprendizaje de los estudiantes y por la contribución de la química a su cultura científica y a su formación como futuros ciudadanos.*

*El autor señala a continuación que en años recientes se ha producido un creciente interés en investigar las causas del distanciamiento existente entre investigación y enseñanza. Las razones encontradas pueden clasificarse en dos categorías: personales, expresadas desde la perspectivas del profesor o del investigador; y estructurales, expresadas desde una perspectiva común. Respecto a las primeras, se señala que los profesores aducen que no tienen tiempo para leer los artículos de investigación didáctica y que, incluso si los leen, no*

*disponen del tiempo para poderlos integrar en su práctica. Por otra parte, los investigadores alegan que se ven obligados a publicar los resultados de sus investigaciones en revistas específicamente de investigación, que pocos profesores leen. Otra explicación se encuentra en la forma en que los investigadores y los profesores ven el trabajo que hacen los otros. Así los profesores tienden a pensar que los investigadores deberían proporcionarles soluciones concretas a sus problemas didácticos, y los investigadores tienden a creer que los profesores deberían ser capaces de transformar los resultados de las investigaciones en ideas útiles para la enseñanza. Onno de Jong es de la opinión que uno de los factores estructurales más importantes para explicar las dificultades descritas se encuentra en que la mayor parte de las investigaciones iniciales que se realizaron estuvieron basadas en teorías de aprendizaje que se centraron más en los resultados del aprendizaje que en explorar la interacción de los procesos de instrucción y aprendizaje, y que se ocuparon de aspectos didácticos generales no ligados a los contenidos.*

*Onno de Jong finaliza el capítulo señalando que en la última década el interés la investigación se ha centrado en la perspectiva del aprendizaje como un proceso dinámico y social. Sin embargo, de acuerdo con el autor el valor de estas investigaciones depende de la naturaleza de los instrumentos de investigación escogidos. La realización de cuestionarios y entrevistas a los estudiantes antes y después de la instrucción son necesarios, pero no suficientes. Es preciso investigar el proceso de aprendizaje que se da en las propias aulas y potenciar una mayor comunicación y colaboración entre investigadores y profesores. Una posibilidad que se propone es iniciar desarrollos curriculares a pequeña escala unidos con una investigación en profundidad sobre los procesos de enseñanza-aprendizaje que tienen lugar en su aplicación, que puedan ser desarrollados y evaluados en colaboración entre investigadores y profesores. De Jong cita como ejemplo de este tipo de investigación-acción un proyecto holandés sobre la enseñanza y el aprendizaje de los conceptos de química en contexto, que se está realizando utilizando módulos como el que trata del estudio de los materiales súper absorbentes, detrás del cual se encuentran conceptos relacionados con la química orgánica, los polímeros y el carácter hidrofílico de las sustancias. Este tipo de investigación es un ejemplo de investigación-acción que puede contribuir a establecer un puente entre la investigación y la práctica.*

**8. Discusión de un modelo teórico- metodológico para introducir la historia de la ciencia en la formación inicial del profesorado de ciencias.** Mario Quintanilla, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile; Mercè Izquierdo, Univesritat Autònoma de Barcelona, Barcelona, Barcelona, Espanya & Agustín Adúriz- Bravo, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

En este capítulo se propone que la formación del profesorado de ciencias incluya, además de los conocimientos en una disciplina científica, conocimientos de otras disciplinas que constituyen una mirada sobre las ciencias: la historia, la filosofía y la didáctica y que son llamadas, por ello, 'metaciencias'. En concreto, los autores se refieren aquí a una de ellas, la historia de las ciencias; sin embargo, se hace de tal manera que la conexión con las otras dos sea imprescindible y necesariamente complementaria.

Se argumenta una propuesta de formación del profesorado en 10 etapas recurrentes dando lugar al diseño 'en espiral' que es ya clásico en la didáctica de la ciencias. Estas etapas contemplan alternativamente la formación en metaciencias y la formación profesional. En las primeras etapas, esta formación es descriptiva, basada en el conocimiento de determinados episodios tanto de la historia como del oficio de profesor. Poco a poco se avanza hacia la construcción de un modelo de ciencia según el cual el conocimiento científico emerge en un determinado contexto, orientado por preguntas y valores; en consecuencia, se plantea la necesidad de presentar este mismo modelo a los futuros profesores, haciendo que ellos mismos identifiquen los factores que harán que la ciencia escolar promueva también la emergencia de conocimiento teniendo en cuenta sus propios valores y objetivos. Todo ello tiene como consecuencia un mayor espacio para la metacognición (análisis del propio pensamiento profesional) para que, finalmente, el profesorado en formación elabore una propuesta docente concreta en la que la reflexión histórica, epistemológica y didáctica colabora para dar una finalidad educativa a los conocimientos científicos.

Se proponen instrumentos específicos para sostener esta propuesta de formación del profesorado: la Memoria Didáctica y la V de Gowin; y se citan ejemplos concretos de unidades docentes que se han elaborado según esta orientación específica.

Finalmente, debemos referirnos a la modalidad bilingüe que se ha escogido en este libro. Nos ha parecido innecesario llevar a cabo una

traducción de las ponencias originales, ya sean en castellano o en inglés. Creemos que es un ejercicio útil para todos practicar la lectura en dos de las lenguas más habladas, junto con el portugués, del mundo occidental y que los documentos bilingües contribuyen a recordar que la diversidad de lenguas es un bien precioso que merece el esfuerzo de intentar comprender lo que se nos dice en una lengua que no es la propia.

Creemos que una publicación como la que aquí se presenta puede ser útil para los profesores, los investigadores y los editores de libros de texto, ofreciendo nuevas finalidades a la enseñanza de la química a partir de las cuales se diseñen nuevas actividades y nuevas pruebas de evaluación, dando así lugar a nuevos perfiles profesionales docentes y de divulgación. Agradecemos la colaboración de las instituciones que han hecho posible la celebración del seminario y esta publicación. La colaboración entre el CDL (el Colegio Profesional de los Profesores de secundaria), que ha impulsado importantes innovaciones docentes a través del Centre Didàctic de Ciències, y el Departament de Didàctica de les Matemàtiques i de les Ciències, que tiene ya una larga tradición, abre el camino para una conexión estrecha entre la investigación didáctica y la innovación docente.

**Los editores**

## Capítulo 1

---

### *Modelizar y contextualizar el currículum de química: un proceso en constante desarrollo*

---

#### **Aureli Caamaño**

Centre de Documentació i Experimentació en Ciències i Tecnologia  
IES Barcelona-Congrés  
Departament d'Educació. Generalitat de Catalunya  
CDCE (Col·legi de Drs. i Llicenciats de Catalunya)  
acaamano@xtec.cat

**SUMMARY.** This chapter briefly describes the evolution undergone by the chemistry curriculum for secondary education in the last decades. It then centres in the debate on which should be the basic contents of the chemistry curriculum. On the other hand, it proposes that modelling processes should constitute the fundamental axis of the construction of chemical knowledge in chemistry courses and that contextualisation of contents and STS approaches should be more and more present in the development of the chemistry curriculum. These proposals are illustrated with the critical review of some significant chemistry projects in the history of the chemistry curriculum in Spain, such as Faraday Chemistry and the adaptation of Salters Chemistry

**RESUMEN.** En este capítulo se describe de forma breve la evolución sufrida por el currículum de química en la educación secundaria en las últimas décadas, centrándose a continuación en el debate sobre cuáles habrían de ser los contenidos básicos del currículum de química. Por otro lado se propone que los procesos de modelización constituyan el eje fundamental de la construcción de los conocimientos químicos de los cursos de química y que la contextualización de los contenidos y los enfoques CTS estén cada vez más presentes en el desarrollo del currículum de química. Estas propuestas son ilustradas con la revisión crítica de algunos proyectos de química significativos en la historia curricular de la química en España, como la Química Faraday y la adaptación de la Química Salters.

#### **Introducción**

Algunas de las cuestiones clave que se encuentran en el centro del debate curricular de la química en la educación secundaria son las siguientes:

- ¿Qué contenidos se tendrían que enseñar?
- ¿Cuál es el mejor contexto con que abordar los contenidos?

- ¿Qué dificultades de aprendizaje comportan estos contenidos?
- ¿Cuáles son las mejores estrategias para construir los conceptos y modelos químicos?

En esta comunicación abordaremos cuál es la respuesta que se ha dado a las dos primeras preguntas en las últimas décadas y cuáles se están dando en la actualidad, analizando los contenidos conceptuales y CTS que se consideran más relevantes. Y describiremos brevemente algunas de las propuestas que se han desarrollado para elaborar modelos químicos escolares en relación a las evidencias experimentales, superando las dificultades que su aprendizaje supone.

### **¿Cuál es la química que se ha enseñando en las últimas décadas?**

La química es una de las cuatro disciplinas básicas del currículum de ciencias de la educación secundaria. El currículum de química al igual que la del resto de disciplinas científicas, ha sufrido en estas últimas décadas cambios importantes motivados por diferentes factores:

- los nuevos objetivos de la educación secundaria definidos en las sucesivas reformas del sistema educativo, que enfatizan los objetivos de alfabetización científica de los estudiantes y la adquisición de competencias.
- los resultados de la investigación en didáctica de la química
- las nuevas experiencias de innovación curricular en química.
- el desarrollo de la propia química.

Los años setenta supusieron un cambio importante en el enfoque de la química a nivel internacional. En esta época se potenciaron los aspectos conceptuales de la química, enfatizando los principios químicos frente al conocimiento puramente descriptivo de las sustancias y de sus reacciones, y los procedimientos de la ciencia y el trabajo experimental, en el marco de una concepción sobre la enseñanza de las ciencias que se denominó descubrimiento orientado. De esta época son los proyectos estadounidenses CBA, CHEM e IPS y los proyectos ingleses de la Fundación Nuffield. Estos proyectos fueron traducidos al español con los títulos de Sistemas Químicos (1966), Química: una ciencia experimental (1972), Curso de introducción a las ciencias físicas (1973), Curso Modelo de Química Nuffield (1969-1972) y Química Avanzada Nuffield (1974-1976). Su

difusión tuvo una indudable influencia en la enseñanza de la química de la década de los setenta y principios de los ochenta, siendo fuente de inspiración en España de proyectos como la Química Faraday (Grup Recerca-Faraday 1988), basado en la secuenciación conceptual de la química inspirada en la evolución histórica de los conceptos y modelos químicos y en la importancia del contraste de las hipótesis y las pruebas experimentales.

La década de los 80 y parte de los 90 supuso la introducción de la perspectiva constructivista del aprendizaje y la enseñanza de las ciencias en la enseñanza de la química, con la valoración de las ideas previas de los estudiantes y el conocimiento de los resultados de una serie de investigaciones sobre las concepciones alternativas de los estudiantes. Se sugieren toda una serie de ciclos de aprendizaje que partiendo de las ideas previas de los estudiantes se plantean conseguir un cambio conceptual significativo. Esta visión implica una crítica a algunos aspectos del modelo de descubrimiento orientado, que no tenía en cuenta que la interpretación de las observaciones y de los experimentos viene condicionada por el marco teórico previo de los estudiantes, es decir, por sus concepciones previas sobre los fenómenos que se les presentan o investigan. Como consecuencia de ello muchos de los proyectos y secuencias didácticas elaboradas en años anteriores fueron revisados para incorporar el nuevo paradigma constructivista de enseñanza de las ciencias. Por otro lado, a finales de los ochenta y principios de los 90 se comienza a introducir y experimentar unidades didácticas y proyectos basados en los objetivos de la educación ciencia-tecnología-sociedad, un enfoque que pretende una enseñanza de las ciencias más contextualizada e interdisciplinar, que tenga en cuenta la naturaleza de los conceptos y teorías científicas, las aplicaciones de la ciencia y las relaciones entre la ciencia, la tecnología y la sociedad (CTS).

Sin embargo una apreciable renovación de los contenidos y metodología de la enseñanza de la química no va a tener lugar en España hasta bien entrada la década de los 90 con la introducción de la reforma del sistema educativo. En efecto, al igual que en España las reformas de los sistemas educativos en otros muchos países abrió un periodo de renovación de los objetivos y contenidos de la enseñanza de las ciencias y de la química en particular. En esta época se elaboran proyectos de ciencias con fundamentación constructivista y, en algunos casos, con carácter CTS para la enseñanza secundaria obligatoria (Caamaño, 2005) y proyectos de química para el bachillerato basados en el contexto, como los proyectos estadounidenses QuímCom (Química en la Comunidad) y

Chemistry in context, o el proyecto inglés *Salters Advanced Chemistry* (Pilling y Waddington, 2005), que es adaptado en diferentes países, entre ellos España (Grupo Salters 1999; Caamaño, Gómez Crespo, Gutiérrez Julián, Llopis y Martín Díaz, 2001). En Portugal se ha aprobado recientemente un currículum de química claramente contextualizado (Costa et al. 2003) y en Holanda y en Alemania se han desarrollado unidades didácticas contextualizadas (Westbroek, Bulte y Pilot, 2001).

En los primeros años del 2000 muchos países han proseguido procesos de reforma de sus sistemas educativos y de revisión del currículum de ciencias, poniendo el énfasis en la en la adquisición de competencias y la formación científica de los estudiantes con el objetivo de alcanzar niveles satisfactorios de alfabetización científica para todo el alumnado (Osborne, 2002). El proyecto internacional PISA que pretende en una de sus áreas evaluar el nivel de formación científica de los estudiantes de 15 años define así la formación o capacidad científica (término equivalente al de "literacia científica" o alfabetización científica): "la capacidad de utilizar el conocimiento científico para identificar preguntas y obtener conclusiones a partir de pruebas, con la finalidad de comprender y ayudar a tomar decisiones sobre el mundo natural y los cambios que la actividad humana producen en él". Así pues se considera que los estudiantes han de estar preparados para la comprensión de la naturaleza de la ciencia, de sus procedimientos, de sus puntos fuertes y de sus limitaciones, así como del tipo de preguntas a las cuales puede responder. También se considera importante que los estudiantes sean capaces de argumentar y comunicar eficazmente sus conocimientos a audiencias concretas y que puedan tener opiniones fundamentadas y participar en los temas que se discuten en la sociedad. Todo ello está teniendo claras repercusiones en los objetivos del currículum de ciencias y, en particular, en el de química (Caamaño, 2001a; 2001b, 2006; Breslow y Gárritz, 2002; Bennett y Colman, 2002; Gómez Crespo, Gutiérrez, Martín-Díaz, 2003; De Vos, Bulte y Pilot, 2002; Caamaño e Izquierdo, 2003; Bulte, de Jong y Pilot, 2005; Chamizo e Izquierdo, 2005), tanto en la educación secundaria obligatoria como en el bachillerato, como veremos a continuación.

### **Las cuestiones clave de las que se ocupa la química y los contenidos del currículum**

La Química se ocupa del estudio de las propiedades y estructura de las sustancias químicas y de las reacciones químicas entre ellas. Su objetivo teórico principal es modelizar la estructura de las sustancias y de los cambios químicos con la finalidad de predecir el

comportamiento de los sistemas químicos. Pero, la química también tiene una finalidad práctica que es la obtención de productos químicos básicos a partir de materias primas y de nuevas sustancias con propiedades útiles (materiales, fármacos, cosméticos, detergentes, fertilizantes, pinturas, tintes, etc.). Para conseguir estos objetivos la química ha desarrollado métodos de extracción, de síntesis, de purificación y de análisis de las sustancias. La química también estudia las reacciones que tienen lugar en los seres vivos, los procesos químicos geológicos y los cambios químicos que tienen lugar en la atmósfera, en la corteza terrestre y en la biosfera, e incluso en el universo. Es pues a la vez una ciencia central e instrumental para otras muchas ciencias (física, biología, medicina, ciencias de la Tierra y del medio ambiente, astronomía, etc.). Por último la química tiene una gran influencia en la calidad de vida de los ciudadanos tanto por los materiales y productos beneficiosos que proporciona como por los efectos que la fabricación de estos productos puede producir en el medio ambiente.

Para poder valorar cuáles son los contenidos conceptuales y procedimentales más importantes que es necesario mantener en el currículum de química de secundaria puede ser útil recordar cuáles son las preguntas clave que ha intentado responder la química y cuáles son los métodos que ha desarrollado para darles respuesta. Algunas de estas cuestiones clave referidas a los aspectos teóricos de la química son las siguientes:

- ¿Cómo podemos clasificar los diferentes sistemas químicos que se presentan en la naturaleza y en la industria química: mezclas, soluciones, sustancias, dispersiones?
- ¿Cómo podemos separar e identificar las sustancias que se encuentran mezcladas en la naturaleza o en los procesos químicos que conducen a su obtención?
- ¿Cuál es la constitución interna de la materia y las sustancias?  
¿Pueden las sustancias descomponerse en otras más simples?  
¿Cuál es su composición? ¿Cómo podemos determinar la cantidad de una sustancia? ¿Cuál es su estructura? ¿Qué relación hay entre las propiedades y la estructura de las sustancias en sus diferentes estados de agregación?
- ¿Cómo transcurren las reacciones químicas? ¿Qué cambios atómicos y moleculares se producen? ¿De dónde proviene la energía que se desprende o se absorbe? ¿Con qué velocidad tienen lugar y qué factores la modifican? ¿A través de que "mecanismo" o sucesión de reacciones elementales tienen lugar?

- ¿Por qué ciertas sustancias muestran "afinidad" por otras"?
- ¿Por qué ciertas reacciones tienen lugar hasta el final y otras se detienen antes de completarse? ¿De qué factores dependen las concentraciones de las sustancias en los sistemas químicos en equilibrio? ¿Cómo se alcanza el equilibrio químico a nivel molecular? ¿Qué criterios rigen la espontaneidad de las reacciones químicas?
- ¿Cómo interacciona la materia y la electricidad? ¿Cómo interacciona la materia con la radiación electromagnética? ¿Cuál es la estructura interna de los átomos?
- ¿Por qué los átomos se unen para formar moléculas? ¿Cuál es la estructura y geometría de las moléculas? ¿Cómo se enlazan los átomos para formar nuevas moléculas y estructuras?
- ¿Cómo pueden sintetizarse nuevas moléculas y materiales?

Los conceptos y modelos que se han elaborado para dar respuesta a estas cuestiones a lo largo de la historia y los métodos experimentales que se han desarrollado para conseguirlo han formado el cuerpo de conocimientos conceptuales y procedimentales de la química como ciencia. Una parte sustancial de los contenidos del currículum de química procede de la transposición curricular y didáctica que se hace de estos conocimientos y procedimientos en la educación secundaria y universitaria.

Los objetivos generales de la educación secundaria y el tiempo horario asignado a las asignaturas de química (o a las de ciencias en etapas de la educación secundaria más iniciales) obligan a realizar una selección adecuada de estos contenidos conceptuales y procedimentales, lo que requiere tener en cuenta: su importancia en la estructura lógica de la disciplina, su potencial explicativo, su nivel de complejidad en relación a la capacidad cognitiva de los estudiantes según su edad, y también su relevancia funcional y social.

En la práctica los contenidos que se imparten vienen establecidos por los currículos oficiales, la interpretación que de ellos hacen los libros de texto y las pruebas externas, en el caso que las haya. Sin embargo, un margen más o menos amplio de decisión queda a criterio del profesorado, sobre todo en lo que respecta al énfasis, el contexto y la profundidad con que cada contenido es tratado.

### **Selección de conceptos y procedimientos versus contenidos CTS**

Diferentes autores han propuesto en los últimos años los contenidos conceptuales básicos que creen que deberían formar la estructura

disciplinar del currículum de química (Gillespie, 1997; Caamaño, 2003a; Atkins, 2005). La mayor parte de estas propuestas se encuentran recogidas en un reciente artículo de Educación Química (Padilla, 2006) que analiza la estructura conceptual de diferentes libros de texto (Gárriz y Chamizo, 2001; Caamaño y Obach, 2000; Quílez, 2006). La propuesta de Atkins (2005) es extraordinariamente sintética y estrictamente basada en una lógica disciplinar. Propone nueve ideas centrales a partir de las cuales construir el currículum conceptual de química: la materia es atómica; los elementos presentan periodicidad en sus propiedades; los enlaces químicos se forman cuando se aparean los electrones; la forma de las moléculas; las fuerzas intermoleculares; la energía se conserva; la entropía tiende a aumentar; hay barreras energéticas para que tengan lugar las reacciones; únicamente existen cuatro tipos de reacciones: transferencia de protones (reacciones ácido-base), transferencia de electrones (reacciones redox), compartición de electrones (reacciones entre radicales) y compartición de pares de electrones (reacciones ácido-base de Lewis).

Efectivamente toda esta serie de conceptos y teorías son especialmente importantes en la estructura de la química como disciplina. Sin embargo, algunos de estos contenidos pueden estar presentados en los diseños curriculares oficiales y en los libros de texto con un formalismo excesivo, con aproximaciones que se han podido quedar obsoletas (Caamaño, 2001a) o con enfoques que no tienen en cuenta las aplicaciones y relaciones de la química con la sociedad (Caamaño, 2001b).

Un buen criterio de selección de los contenidos conceptuales, complementario del de la lógica disciplinar, es preguntarse cuáles son los conceptos que son necesarios para comprender los temas de química aplicada y de ciencia-sociedad que se consideran suficientemente relevantes para ser incluidos en el currículum. A continuación exponemos algunas de las cuestiones CTS que pueden ser relevantes en el campo de la química, agrupadas en cuatro apartados: naturaleza de la química (Erduran y Scerri, 2002), química aplicada, química y sociedad, y química y otras ciencias.

#### Naturaleza de la química

- ¿Cuál es la naturaleza de la química como ciencia?
- ¿Cuál es la génesis y evolución de los conceptos y teorías más importantes?
- ¿Qué influencia han tenido las técnicas instrumentales disponibles en la evolución de la química?

### Química aplicada

- ¿Cuáles son las propiedades y aplicaciones de las sustancias más importantes en la vida cotidiana?
- ¿Cómo se obtienen los elementos químicos (sustancias simples) a partir de los minerales y otras materias primas?
- ¿Cómo se obtienen y qué propiedades, estructura y aplicaciones tienen los combustibles, los materiales cerámicos, los metales, las aleaciones, los plásticos, las fibras, los fármacos, las pinturas, los cosméticos, etc.?

### Química, sociedad y medio ambiente

- ¿Cuáles son los beneficios que la química aporta a la sociedad?
- ¿Qué riesgos suponen y qué precauciones deben tomarse en la manipulación de determinados productos químicos?
- ¿Cuáles son las repercusiones medioambientales de la obtención de materias primas y de la industria química?  
¿Cuáles son los costes medioambientales del transporte y consumo de los combustibles fósiles?
- ¿Cómo contribuye la química a potabilizar las aguas, tratar las aguas residuales y reducir la contaminación producida por la propia industria química?

### La química y otras ciencias

- ¿Cuáles son los procesos químicos que han intervenido en la formación y evolución de la atmósfera, los océanos y el relieve terrestre y en la composición de los suelos?
- ¿Cuáles son las moléculas que forman los seres vivos? ¿Cuáles son los procesos bioquímicos más importantes? ¿Qué es la ingeniería genética?

Veamos algún ejemplo de aplicación del criterio de selección de contenidos conceptuales basado en su relación con contenidos CTS. Supongamos que tuviéramos que decidir si incluir o no en el currículum de bachillerato los siguientes conceptos: la interacción de la radiación electromagnética con las moléculas en fase gas, los radicales químicos, los derivados halogenados y las reacciones en cadena. Podríamos preguntarnos qué fenómenos naturales importantes o qué campos de investigación química actuales precisan del conocimiento de estos conceptos. Si, por ejemplo, pensamos que la disminución de la capa de ozono es un problema de suficiente identidad para ser tratado en un curso de química y

analizamos los conceptos químicos que son precisos para entender los procesos naturales de formación y desaparición del ozono en la estratosfera y su proceso de destrucción por acción de los clorofluorocarbonos, podemos llegar fácilmente a la conclusión de que los conceptos citados anteriormente deberían estar en el currículum, al menos en el nivel mínimo necesario para comprender este fenómeno.

Las disoluciones reguladoras del pH pueden ser un aspecto que se considere que no da tiempo abordar en el estudio de los equilibrios ácido-base, pero en cambio desempeñan un papel muy importante en la química de los seres vivos y en el estudio de las reacciones enzimáticas. Quizás no sea preciso saber calcular el pH de estas disoluciones, pero sí comprender la forma en que actúan para poder mantener el pH casi constante.

Las reacciones de formación de complejos pueden considerarse un tipo de reacciones no abordables en el tiempo disponible en el currículum de química de secundaria, sin embargo, su conocimiento resulta imprescindible si se quiere comprender la estructura de algunas macromoléculas biológicas tan importantes como la hemoglobina o la clorofila, o aplicaciones cotidianas o industriales de tanto interés como la eliminación de la dureza del agua mediante la formación de iones complejos.

Los ejemplos que acabamos de comentar pueden bastar para evidenciar que la decisión sobre si un contenido conceptual debe estar o no presente en el currículum, depende en gran parte de la relevancia para comprender fenómenos y aspectos importantes relacionados con el medio ambiente, la vida cotidiana y la sociedad. Y que en muchos casos la cuestión no radica tanto en decidir su permanencia o supresión sino en precisar el grado de profundidad con que debería ser tratado, de acuerdo con los objetivos que se pretenden.

Existe un amplio consenso en aceptar que si se desea una mayor comprensión de los conceptos y procedimientos de la química y dar cabida a los contenidos CTS y una mayor presencia del trabajo experimental, debe reducirse el formalismo con que se abordan determinados conceptos y a la vez incluir otros a un nivel cualitativo, pero suficiente para la comprensión de los fenómenos y hechos que se consideran relevantes para figurar en el currículum de química. En particular, convendría reflexionar si un excesivo énfasis en la formulación y la nomenclatura, la igualación de ecuaciones y la

realización de cálculos estequiométricos y otros tipos de cálculos, así como el hecho de centrar los exámenes externos en este tipo de actividades, no está impidiendo el desarrollo de un currículum de química más equilibrado y relevante para la vida de los estudiantes como futuros ciudadanos y profesionales en muy diversos campos.

### **El proceso de modelización: eje de la construcción de conocimientos**

La elaboración de modelos químicos es una de las actividades más importantes que se realizan en las clases de química (Justi y Gilbert, 2002; Izquierdo y Aliberas, 2004; Gutiérrez, 2004). Su uso es necesario para interpretar los hechos e imaginar los procesos microscópicos subyacentes al mundo material macroscópico (Prieto, Blanco y González, 2000; Mortimer, 2000). Los modelos teóricos están enmarcados en teorías de los que son instrumentos explicativos con diferentes grados de sofisticación. El modelo cinético-corpúscular de los gases, el modelo atómico-molecular de Dalton, el modelo de ión, el modelo estructural de los diferentes tipos de sólidos, el modelo de enlace químico, los sucesivos modelos atómicos, el modelo de reacción química (en sus aspectos corpúscular, termoquímico, cinético, de equilibrio, etc.), los diferentes modelos o teorías de ácido y base, etc., son ejemplos de diferentes modelos que deben ser construidos en un curso de química.

El proyecto Química Faraday (Grup Recerca-Faraday, 1988) se propuso desarrollar los conceptos químicos de un curso de química de secundaria siguiendo su evolución histórica y estableciendo un continuo contraste de las hipótesis con las evidencias experimentales. A continuación se describe brevemente la secuenciación conceptual de este proyecto.

- La naturaleza corpúscular de la materia se establece a partir de la interpretación de las propiedades de los gases.
- El concepto de átomo y de molécula se postula para dar una primera interpretación a la diferencia de comportamiento entre las sustancias simples y los compuestos. Este modelo daltoniano es posteriormente revisado introduciendo la idea de molécula formada por átomos iguales y el concepto de estructura gigante.
- El concepto de estructura gigante se propone como una hipótesis para explicar las grandes diferencias entre las propiedades de las sustancias que son gaseosas o líquidas a temperatura ambiente, o bien sólidas con baja temperatura de fusión, y las que son sólidas con alta temperatura de fusión.

- El concepto de ión se establece como una hipótesis capaz de interpretar hechos experimentales como la electrólisis y las propiedades de las soluciones de los electrólitos, integrando el modelo corpuscular de la materia y el modelo de carga eléctrica (Caamaño, Maestre 2004).
- Los modelos de estructura gigante metálica, covalente e iónica se desarrollan para poder explicar las diferentes propiedades de los sólidos metálicos, covalentes e iónicos.
- El modelo de reacción química se elabora a partir de la interpretación atómico-molecular del cambio químico.
- El concepto de energía de enlace se utiliza para la interpretación del calor de reacción.
- El concepto de electrón resulta de la interpretación corpuscular de los rayos catódicos.
- Los primeros modelos del átomo se establecen a partir del análisis de las experiencias de Thomson y Rutherford.
- El modelo de capas de electrones se construye a partir del análisis de las sucesivas energías de ionización de los átomos.
- El modelo iónico de electrolito en solución se establece a partir de las evidencias experimentales que permitieron a Arrhenius proponer la teoría de la disociación iónica y de evidencias experimentales posteriores.
- El modelo de ácido y de base de Arrhenius se propone como una hipótesis sobre la composición de los ácidos y las bases en el marco de la teoría de la disociación iónica para interpretar sus propiedades.
- El modelo electrónico de enlace químico se construye a partir de las primeras hipótesis de Lewis y del concepto de valencia química.
- Los sucesivos conceptos de oxidación y de reducción y los modelos de reacción redox se introducen a partir de la interpretación de las reacciones de combustión y de oxidación.

Este proyecto, finalizado el 1988, constituye un excelente ejemplo de una propuesta didáctica que toma la modelización como eje de construcción de los contenidos de un curso completo de química, siguiendo la evolución histórica de los conceptos químicos. En la actualidad sería interesante poder revisar sus presupuestos incorporando los resultados de la investigación que se ha llevado a cabo posteriormente sobre concepciones y modelos mentales en química, e introduciendo la necesaria contextualización de los contenidos.

La apropiación de los modelos químicos, es decir, la construcción de modelos mentales próximos a los modelos científicos no está exenta de dificultades (Gutiérrez, 2004). Las dificultades conceptuales que presenta el aprendizaje de la química pueden clasificarse en dificultades intrínsecas de la química, dificultades relativas al pensamiento y forma de razonamiento de los estudiantes y dificultades de aprendizaje atribuibles al proceso de instrucción (Caamaño, 2004). Entre estas últimas destaca la presentación de modelos híbridos en los libros de texto o en las explicaciones del profesorado correspondientes a diferentes teorías. Investigaciones realizadas sobre las ideas de los estudiantes muestran que construyen modelos híbridos tomando ideas de diferentes modelos que se les presentan en interacción con sus ideas previas. En un trabajo reciente (Caamaño, 2003b) se describen tres áreas conceptuales en las que se ha observado este proceso de hibridación: modelos híbridos sobre la estructura y el enlace químico (De Posada, 1993, 1999; Caamaño, 1994; Taber y Coll, 2002), modelos híbridos de ácidos y bases (Furió, Furió, Calatayud y Bárcenas 2003; Peña, 2002), y modelos híbridos sobre la velocidad de reacción entre la teoría de colisiones y la teoría del estado de transición (Justi y Gilbert, 1999).

De Vos y Pilot (2001) han señalado que los libros de texto de química adquieren a través de los años una complicada estructura conceptual que, como las rocas sedimentarias, muestra un número de capas sucesivas de conceptos, cada uno de ellos con su propia historia. Los conceptos introducidos en el contexto de una "capa" que puede referirse a un contexto experimental, conceptual o de aplicación, se suelen solapar con ideas de otros contextos dando lugar a una estructura conceptual incoherente. Analizando el tratamiento que se da a los ácidos y bases en los libros de texto, desde 1930 hasta 1990, han identificado hasta seis capas sucesivas: el contexto artesanal (experimental), el contexto de síntesis (óxidos ácidos y básicos, Lavoisier), el contexto analítico (valoraciones ácido-base), el contexto de Arrhenius (teoría de la disociación iónica de Arrhenius), los contextos de Brønsted y de Lewis, y el contexto de la química aplicada (usos y aplicaciones de los ácidos). Las ideas expuestas por estos autores tienen puntos de contacto con las descritas sobre la existencia de modelos híbridos.

Otras áreas conceptuales ampliamente investigadas han sido los conceptos de sustancia pura (Sánchez y Valcárcel 2003), mezcla y compuesto (Sanmartí, 1992), la naturaleza corpuscular de la materia (Harrison y Treagust, 2002), cambio químico (Solsona y Martín, 2004), equilibrio químico (Quílez, 1998, van Driel y Gräber, 2002; Gárriz y

Raviolo, 2007), cinética química (Justi, 2002), electroquímica (de Jong y Treagust, 2002), y termoquímica y termodinámica química (Goedhart y Kaper, 2002).

### **Algunas actividades de aprendizaje fundamentales**

Más allá de los típicos problemas de cálculo numérico y de algunas experiencias o prácticas ocasionales es necesario introducir en las clases de química un abanico más amplio de actividades y reflexionar sobre la utilidad y efectividad de las que se vienen utilizando. Es necesario, dar una importancia mayor a las cuestiones cualitativas de comprensión conceptual, a las actividades de modelización de los fenómenos químicos a partir del contraste entre hipótesis y evidencias experimentales, y a las actividades de argumentación que permiten justificar los modelos establecidos. Y es necesario reorientar el trabajo práctico en una doble dirección: proponer trabajos prácticos de carácter investigativo (Watson, 1994; Caamaño, 2002, 2005) que ayuden a realizar procesos de modelización (Sanmartí, Márquez, García, 2002), y contextualizar cada vez más estos trabajos en relación con los temas CTS que se aborden.

### **Contextualizar los contenidos de química: una perspectiva ineludible**

Por contextualizar la ciencia entendemos relacionarla con la vida cotidiana, actual y futura, de los estudiantes y hacer ver su interés para sus futuras vidas en los aspectos personal, profesional y social. Esta finalidad de contextualizar la ciencia está estrechamente relacionada con el enfoque ciencia-tecnología-sociedad (CTS) de la enseñanza de las ciencias y con la finalidad de conseguir la alfabetización científica de los estudiantes. Y de hecho, la manera de utilizar el contexto- las aplicaciones de la ciencia y las interacciones entre la ciencia y la sociedad- permite diferenciar dos enfoques CTS de la enseñanza de las ciencias: en uno se parte de los conceptos para interpretar y explicar el contexto, y en otro se parte del contexto para introducir y desarrollar los conceptos. Este último enfoque, que es el que propiamente se denomina "enfoque basado en el contexto" (o las aplicaciones primero), está siendo ampliamente utilizado en los nuevos enfoques de la enseñanza de la ciencia y de la química en particular, y empezando a ser introducida con diferente énfasis en las reformas curriculares de muchos países (Benett y Colman, 2002; Bulte, de Jong y Pilot, 2005; Caamaño, 2006; Quílez, 2006).

Una de las ventajas que se aducen para promover este enfoque contextualizado en la enseñanza de las ciencias, y de la química en

particular, es la mayor motivación que produce en el alumnado. Esta mayor motivación parece ser útil tanto para los alumnos de perfil más académico como para los menos académicos, aumentado en todos ellos su interés por una química más conectada con su vida cotidiana y la sociedad en que viven.

El intento más ambicioso en España de contextualizar la química del bachillerato a partir de sus aplicaciones en el mundo actual ha sido la adaptación y experimentación de la Química Salters, un proyecto de química basado en el contexto, adaptado del proyecto inglés *Salters Advanced Chemistry* de la Universidad de York (Burton et al., 2000; Pilling y Waddington, 2005). Esta adaptación fue realizada por un equipo de profesores de secundaria y de universidad de Barcelona, Madrid y Valencia, con el patrocinio de las administraciones educativas de Cataluña, Valencia y del MEC (Grup Salters, 2000; Grupo Salters, 1999, 2000a, 2000b). El proyecto adaptado consta de ocho unidades: Elementos de la vida, Desarrollo de combustibles, De los minerales a los elementos, La revolución de los polímeros, La atmósfera, Aspectos de agricultura, La química del acero y Los océanos, y de dos actividades complementarias: la Visita a una industria química y un Trabajo de investigación. Además de las unidades complementarias La química de los medicamentos y La química del color (Caamaño et al., 2003). La experimentación de este proyecto en unos 30 centros de secundaria durante el período 1996-99 evidenció el gran interés de un enfoque de este tipo, pero también las dificultades de la introducción de estos contenidos en el currículum de química actual, mientras no se expliciten más claramente en las orientaciones curriculares y no varíe la orientación de la prueba de química de acceso a la universidad (Puigvert, 2000).

El proyecto Química Salters ha sido adaptado y experimentado en otros países como Eslovenia, Suecia, Rusia y Argentina (Pilling y Waddington, 2005), y ha inspirado proyectos y desarrollos curriculares similares en Alemania y en Portugal (Costa et al., 2003). El diseño curricular de química portugués para el bachillerato (16-18 años) se caracteriza por ser uno de los más avanzados del entorno europeo, después del programa del proyecto inglés *Salters Advanced Chemistry*, en cuanto a la formulación explícita de un enfoque basado en el contexto y también por enfatizar la importancia de las actividades experimentales. El currículum francés también muestra influencia de esta orientación especialmente en los cursos correspondientes a los primeros años de la educación secundaria (de los 13 a los 16 años), aunque sigue siendo muy disciplinar en los dos

últimos años (17-18 años), al igual que ocurre en España (Caamaño e Izquierdo, 2003).

## **Conclusiones**

De acuerdo con las finalidades de la educación secundaria que se han expuesto, los objetivos de la educación química se centran actualmente en seleccionar los contenidos de química que deben estar presentes en un currículum equilibrado de química, mejorar la comprensión de los conceptos y modelos químicos, contextualizar los contenidos, de manera que los estudiantes puedan adquirir conciencia de la utilidad y aplicabilidad de los conceptos y modelos que aprenden, y promover una mejor apreciación de la naturaleza de la química y sus implicaciones sociales. Por otro lado se investigan nuevas estrategias didácticas que tengan en cuenta las dificultades de aprendizaje de los estudiantes y su motivación y estilos de aprendizaje. Entre ellas tienen especial importancia las que se plantean cómo enfocar la elaboración de modelos, la resolución de situaciones-problema, la realización de actividades prácticas investigativas, el uso de la argumentación en la aceptación de las hipótesis y modelos, y la utilización de las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación.

El proceso de actualización y reequilibrio de los contenidos del currículum de química en la educación secundaria está siendo abordado con diferentes estrategias y ritmos diferentes en cada país, si bien podemos decir que es un objetivo claramente establecido en la comunidad de educadores, formadores y planificadores del currículum de química, e investigadores en didáctica de la química.

La introducción en el currículum de química de contenidos CTS relevantes requiere cambios importantes en la estructuración de las materias y adoptar estrategias que permitan superar las dificultades detectadas en las experiencias innovadoras llevadas a cabo hasta el momento. Es necesario promover en el profesorado una reflexión profunda sobre los objetivos de la química en la educación secundaria, que permita apreciar la importancia de enfocar la enseñanza de la química desde la perspectiva de elaboración de modelos, contrastando ideas y evidencias experimentales, y haciendo uso de la argumentación, así como la necesidad de un enfoque contextualizado basado en las aplicaciones de la química y en su relación con otras ciencias.

Los cambios propuestos en los contenidos de química sería necesario que fueran acompañados de un mayor conocimiento de las dificultades de aprendizaje de los conceptos, modelos y procedimientos, y de un uso más eficaz de las estrategias didácticas y recursos disponibles para ayudar a superarlas. De esta manera conseguiríamos una mayor comprensión de los principios de la química, de sus procedimientos y de sus aplicaciones, y contribuiríamos a conseguir una mejor formación y cultura científica de los estudiantes.

Afortunadamente cada vez es mayor el número de colectivos de profesores, de elaboradores de materiales curriculares y de investigadores en didáctica de la química interesados en reflexionar, debatir y replantearse el currículum de química desde estas nuevas perspectivas de la educación científica. Esperemos que estos esfuerzos se concreten en currículos más contextualizados, nuevas propuestas didácticas y nuevos materiales curriculares, y mejores oportunidades de formación a través del trabajo conjunto de seminarios de innovación, grupos de desarrollo curricular y grupos de investigación. La celebración de este Seminario internacional de Investigación en la enseñanza de la química, organizado por el Departamento de didáctica de las ciencias de la UAB y el Centro Didáctico de Ciencias Experimentales del Colegio de Doctores y Licenciados de Cataluña es un buen ejemplo del interés existente en la renovación del currículum de química y del trabajo que ya se está haciendo en esta dirección.

## Referencias

- ATKINS, P. (2005). Skeletal chemistry, *Education in Chemistry*, 42, 1, p.20 y 25.
- BENNETT, J. y HOLMAN, J. (2002). Context-based approaches to the teaching of chemistry: what are they and what are their effects? en J.K. Gilbert *et al.* (eds.): *Chemical Education: Towards research-based practice*. Kluwer. Dordrecht.
- BRESLOW, R. y GÁRRITZ, A. (2002). Algunos retos de la química en el siglo XXI. *Educación Química*, 13, 4, pp. 222-225.
- BULTE, A., DE JONG, O. y PILOT, A. (2005). *A development research approach to designing a chemistry curriculum using authentic practices as contexts*. Comunicación presentada en la conferencia de ESERA. Barcelona. Setiembre 2005.
- BURTON, G., HOLMAN, J., LAZONBY, J., PILLING, G. y WADDINGTON, D. (2000). *Salters Advanced Chemistry*. 2ª edición. Oxford: Heinemann.

- CAAMAÑO, A. (1994). *Concepciones dels alumnes sobre la composició i estructura de la matèria i sobre el canvi químic*. Tesis doctoral. Barcelona. Facultat de Químiques. Universitat de Barcelona.
- CAAMAÑO, A. y OBACH, D. (2000). *Química. Bachillerato*. Barcelona: Teide.
- CAAMAÑO, A., GÓMEZ CRESPO, M. A., GUTIÉRREZ JULIÁN, M. S., LLOPIS, R. y MARTÍN-DÍAZ, M. J. (2001). Proyecto Salters: un enfoque CTS para la Química en el bachillerato, en P. Membiela (ed.), *Enseñanza de las Ciencias desde la perspectiva ciencia-tecnología-sociedad*, pp. 179-192. Madrid: Narcea.
- CAAMAÑO, A. (2001a). La enseñanza de la química en el inicio del nuevo siglo: una perspectiva desde España, *Educación Química*, 12, 1, pp.7-17.
- CAAMAÑO, A. (2001b). Repensar el currículum de química en los inicios del siglo XXI, *Alambique*, 29, p. 43.
- CAAMAÑO, A. (2002). ¿Cómo transformar los trabajos prácticos tradicionales en trabajos prácticos investigativos? *Aula de innovación educativa*, 113-114, pp. 21-26.
- CAAMAÑO, A., PUIGVERT, M. T., MELIÀ, R. M., LLAVERÍA, A. y COROMINAS, J. (2003). Química cotidiana a través de la química Salters: La química del color y la química de las medicinas. En G. Pinto (ed.), *Didáctica de la Química y Vida cotidiana*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- CAAMAÑO, A. y IZQUIERDO, M. (2003). El currículum de química del bachillerato en Cataluña: todavía muy lejos de una química contextualizada, *Alambique*, 36, pp. 67.
- CAAMAÑO, A. (2003a). La enseñanza y el aprendizaje de la química, en M.P.Jiménez (coord). *Enseñar Ciencias*, pp. 203-228. Barcelona: Graó.
- CAAMAÑO, A. (2003b). Modelos híbridos en la enseñanza y en el aprendizaje de la química. *Alambique*, 35, p.70-79.
- CAAMAÑO, A. (2004). La enseñanza de la química: conceptos y teorías, dificultades de aprendizaje y replanteamientos curriculares. *Alambique*, 41, pp. 68-81.
- CAAMAÑO, A. y MAESTRE, G. (2004). La construcción del concepto de ión, en la intersección entre el modelo atómico-molecular y el modelo de carga eléctrica. *Alambique*, 42, pp.29-40.
- CAAMAÑO, A. (2005). Trabajos prácticos investigativos en química en relación con el modelo atómico-molecular de la materia, *Educación Química*, 16, 1, pp. 10-19.

- CAAMAÑO, A. (2006a). Proyectos de ciencias: entre la necesidad y el olvido. *Alambique*, 48, pp.10-24.
- CAAMAÑO, A. (2006b). Retos del currículum de química en la educación secundaria. La selección y contextualización de los contenidos de química en los currículos de Inglaterra, Portugal, Francia y España. *Educación Química*, 17, 2, pp.195-208.
- COSTA, J. A., MAGALHÃES, C., MARTINS, I., LOPES, J. M. y OTILDE, M<sup>a</sup>., SOBRINHO, T. (2003). La química en la educación secundaria en Portugal: una perspectiva de cultura científica. *Alambique*, 36, pp. 68-75.
- DE JONG, O. y TREAGUST, D. (2002). The teaching and learning of electrochemistry. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp.317-337. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- DE POSADA, J.M. (1993). Concepciones de los alumnos de 15-18 años sobre la estructura interna de la materia en estado sólido. *Enseñanza de las Ciencias*, 11, p.12.
- DE POSADA, J.M. (1999). Concepciones de los alumnos sobre el enlace químico ante, durante y después de la enseñanza formal. Problemas de aprendizaje. *Enseñanza de las ciencias*, 17, 2, p. 227.
- DE VOS, W. y PILOT, A. (2001). Acids and bases in layers: the structure of an ancient topic. *Journal of Chemical Education*, 78, 4, pp. 494-499.
- DE VOS, W., BULTE, A. y PILOT, A. (2002). Chemistry curricula for general education: analysis and elements of a design, en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp.101-124, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- ERDURAN, S. y SCERRI, E. (2002). The nature of chemical knowledge and chemical education. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp. 7-27, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht
- FURIÓ, C., FURIÓ, C., CALATAYUD, M.L., y BÁRCENA, S. (2003). ¿Cómo se presentan los conceptos y teorías en la reacciones ácido-base? Visiones deformadas de la química en libros de texto (y profesores). *Aspectos didácticos de Física y Química (Química)*, 11, pp. 121-155. ICE de la Universidad de Zaragoza.
- GÁRRITZ, A. y CHAMIZO, J. A. (2001). *Química*. Addison-Wesley Iberoamericana.
- GÁRRITZ, A., y RAVIOLO (2007). Analogías en la enseñanza del equilibrio químico, *Educación Química*, 18(1), en prensa.

- GILLESPIE, R. J. (1997). The great ideas of chemistry. *Journal of Chemical Education*, 74, pp. 862-864.
- GOEDHART, M.J. y KAPER, W. (2002). From chemical energetics to chemical thermodynamics. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp. 339-362, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- GÓMEZ CRESPO, M.A, GUTIÉRREZ, M. y MARTÍN-DÍAZ, M.J. (2003). La química en el bachillerato. Pasado reciente, presente y futuro. *Alambique*, 36, pp. 48-54.
- GRUP RECERCA-FARADAY. (1988). *Química Faraday*. Un enfoque conceptual, experimental e histórico. Teide. Barcelona.
- GRUP SALTERS (1999). *Química Salters. Batxillerat. Materials de treball*. Generalitat de Catalunya. Departament d'Ensenyament.
- GRUPO SALTERS. (1999). Proyecto química Salters. *Cuadernos de Pedagogía*, 281, pp. 68-72.
- GRUPO SALTERS. (2000a). *Química Salters. Bachillerato*. Centro de Investigación y Documentación Educativas (CIDE). Madrid.
- GRUPO SALTERS. (2000b). *Química Salters. Bachillerato. Materiales didácticos*. Valencia: Generalitat Valenciana. Conselleria de Cultura i Educació.
- GUTIÉRREZ, R. (2004). La modelización los procesos de enseñanza-aprendizaje. *Alambique*, 42, pp. 8-18.
- HARRISON, A. y TREAGUST, D. (2002). The particulate nature of matter. challenges in understanding the submicroscopic world. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp.189-212. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- IZQUIERDO, M., ALIBERAS, J. (2004). *Pensar, actuar i parlar a la classe de ciències. Un ensenyament de les ciències racional i raonable*. Materials 150. Universitat Autònoma de Barcelona. Servei de Publicacions.
- JUSTI, R. (2002). Teaching and learning chemical kinetics. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp.293-315. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- JUSTI, R., y GILBERT, J. (1999). A cause of ahistorical science teaching: use of hybrid models. *Science Education*, 83, pp. 163-177.
- JUSTI, R. y GILBERT, J. (2002). Models and modelling in chemical education, en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp.47-68, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- MORTIMER, E.F. (2000). *Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências*. Editora UFMG: Belo Horizonte.

- OSBORNE, J. (2002). Hacia una educación científica para una cultura científica. En M. Benlloch (comp.) *La educación en ciencias: ideas para mejorar su práctica*. Barcelona: Paidós Educador.
- PADILLA, K. (2006). El contenido del libro de química para el bachillerato, *Educación Química*, 17,1, pp. 2-13.
- PEÑA, A. (2002). *La enseñanza y el aprendizaje de los conceptos de ácido y base*. Tesis de licenciatura dirigida por A. Caamaño y A. Gárriz. México. D.F. Facultad de Químicas. UNAM.
- PILLING, G.M., WADDINGTON, D. (2005). Implementation of Large-Scale Science Curricula: A study in Seven European Countries. *Journal of Science Education and Technology*, 14, 4, pp. 393-407.
- PRIETO, T., BLANCO, A. y GONZÁLEZ, F. (2000). *La materia y los materiales*. Síntesis Educación. Madrid.
- PUIGVERT, M.T. (2000). Resultats de l'experimentació del projecte Salters. *Revista del Col·legi*, 111, p.55. Col·legi de Drs. i Llicenciats de Catalunya. Barcelona.
- QUÍLEZ, J. (1998). Dificultades semánticas en el aprendizaje de la química: el principio de Le Chatelier como ejemplo paradigmático. *Alambique*, 17, p.105.
- QUÍLEZ, J., (2006). Bases para una propuesta de tratamiento de las interacciones CTS dentro de un currículo cerrado de química, *Educación Química*, 16, 3, pp.416-436.
- SÁNCHEZ, G. y VALCÁRCEL, M.V. (2003). Los modelos en la enseñanza de la química: concepto de sustancia pura. *Alambique*, 35, 45-52.
- SANMARTÍ, N. (1992). *Estudio sobre las dificultades de los estudiantes en la comprensión de la diferenciación entre los conceptos de mezcla y compuesto*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- SANMARTÍ, N., MÁRQUEZ, C. y GARCÍA, P. (2002). Los trabajos prácticos, punto de partida para aprender ciencias. *Aula de innovación educativa*, 113, pp. 8-13.
- SOLSONA, N. y MARTÍN, R. (2004). Los cambios químicos: de los modelos del alumnado a los modelos escolares. *Alambique*, 42, pp. 19-28.
- TABER, K.S y COLL, R.K. (2002). Bonding. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical Education: Towards Research-base Practice*, pp. 213-234, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- VAN DRIEL, J.H. y GRÄBER, W. (2002). The teaching and learning of chemical equilibrium. en J.K. Gilbert et al. (eds.), *Chemical*

- Education: Towards Research-base Practice*, pp.271-292, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- WATSON, R. (1994). Diseño y realización de investigaciones en las clases de ciencias. *Alambique*, 2, p. 57.
- WESTBROEK, H. B., BULTE, A. y PILOT, A. (2001). Development of a prototype module: An example of a new vision on A-level Chemistry curriculum, en O. de Jong, E.R. Savelsbergh, O. de Jong, A. Alblas (eds.), *Teaching for scientific literacy. Context, competency and curriculum*, Utrecht University, Centre for Science and Mathematics Education.



## Capítulo 2

---

### *Bonding epistemological aspects of models with curriculum design in acid-base chemistry*

---

**Sibel Erduran**

University of Bristol, Graduate School of Education

sibel.erduran@bristol.ac.uk

**SUMMARY.** *Even though the significance of models and modelling in chemistry has been acknowledged and promoted in chemistry education, epistemological aspects of models as learning outcomes have been underemphasized in the curriculum. For instance, such features of models as projectability and compositionality which can be decisive epistemological criteria in model evaluation have neither been promoted in the chemistry curriculum nor explored in students' thinking. In this chapter, a study is described to illustrate the design and implementation of a curriculum unit that fosters epistemological reasoning in the context of modelling acids and bases. The results of the study suggest that middle-school students are capable of employing epistemological criteria in modelling acids and bases, and furthermore that engagement in tasks that foster epistemological reasoning could be instrumental in improving students' conceptual understanding of models. Implications for curriculum design, theory of learning and teacher education are discussed.*

**RESUMEN.** *A pesar de que se ha reconocido la importancia de los modelos y la modelización en química y se ha promovido en la educación química, los aspectos epistemológicos de los modelos como punto de partida para el aprendizaje han tenido poca presencia en los planes de estudios. Algunas características de los modelos como por ejemplo, la proyectabilidad y la composicionalidad, que pueden ser criterios epistemológicos decisivos en la evaluación de los modelos, no se han introducido en el plan de estudios de química ni se han explorado en el pensamiento de los estudiantes. En este capítulo, se describe un estudio como ejemplo de diseño y la puesta en práctica de una unidad didáctica que fomenta el razonamiento epistemológico en el contextote modelización de ácidos y bases. Los resultados del estudio sugieren que los estudiantes son capaces de emplear criterios epistemológicos al hacerlo, y además que este compromiso en tareas que impulsan un razonamiento epistemológico podría ser un instrumento para mejorar la comprensión conceptual de los modelos en los estudiantes. Se discuten las implicaciones de esta propuesta en el diseño del*

*plan de estudios, en las teorías de aprendizaje y en la formación del profesorado.*

## **1. Introduction**

There is substantial evidence that children learn and use models from an early age (Clement, 1983; Gilbert & Boulter, 1997; Schauble, Klopfer, & Raghavan, 1991; Scott, Driver, Leach, & Millar, 1993). Children's learning of models in the classroom has been promoted on the grounds that models can act as "integrative schemes" (National Research Council, 1996, p. 117) bringing together students' diverse experiences in science across grades K-12. The "Unifying Concepts and Processes Standard" of The National Science Education Standards specifies that:

*"Models are tentative schemes or structures that correspond to real objects, events, or classes of events, and that have explanatory power. Models help scientists and engineers understand how things work. Models take many forms, including physical objects, plans, mental constructs, mathematical equations and computer simulations" (NRC, 1996, p.117).*

"Science as Inquiry Standards" emphasize the importance of students' understanding of *how* we know what we know in science. Taken together, these standards suggest it is not enough that students have an understanding of models as such. In other words, acquisition of declarative knowledge or conceptual information on models is only one aspect of learning models. Students need also to gain an appreciation of *how* and *why* models are constructed. What is implied with the latter standard is that students need to also develop an understanding of the epistemological aspects of models (Erduran, 2001). From this point of view, the teaching and learning of criteria for determining whether or not a model has explanatory power, for instance, become significant goals.

Even though the significance of models and modelling in chemistry has been acknowledged (Suckling, Suckling and Suckling, 1978) and promoted in education (Gilbert & Boulter, 2000) epistemological aspects of models have been underemphasized in the chemistry curriculum. In other words, such features of models as projectability and compositionality (Woody, 1995) which can be decisive epistemological criteria in model evaluation have neither

been promoted in the chemistry curriculum nor explored in students' thinking (Erduran & Duschl, 2004). In this paper, a study is described which illustrates the design and implementation of a curriculum unit which fosters epistemological reasoning in the context of acids and bases. The results of the study suggest that middle-school students are capable of engaging in epistemological reasoning in the context of modelling acids and bases. First, the literature on models and modelling will be reviewed. Second, the curriculum unit which incorporated epistemological aspects of models in its design will be described. Some examples of student talk from the implementation context of the curriculum will illustrate students' potential to engage in epistemological reasoning in acid-base chemistry. Implications for curriculum design, theory of learning and teacher education will be addressed.

## 2. Models and Modelling: An Overview

Models and modelling are a significant area of study in cognitive sciences. For instance, philosophers of science often situate models as intermediaries between the abstractions of theory and the concrete actions of experiment (Downes, 1993; Redhead, 1980). They examine explanatory power of models (Cartwright, 1983; Woody, 1995) and the relation of models to theories (Giere, 1991). Cognitive psychologists, on the other hand, study the role of models in cognitive development (White & Frederiksen, 1986) and individuals' model-based reasoning in specific domains such as physics and mathematics (Reif, 1983; Schauble et al., 1991). In general, a model is characterized as a representation between a source and a target (Boulter & Gilbert, 1996; Duit & Glynn, 1996), the target being an unknown object or phenomenon to be explained, and the source being a familiar object or phenomenon that helps to understand the target.

Woody (1995) identified four properties of models: approximate, projectability, compositionality and visual representation which are typically used as epistemological criteria in model construction, evaluation and revision in chemistry. A model's structure is *approximate*. In other words, the model is an approximation of a complete theoretical representation for a phenomenon. The model omits many details based on judgments and criteria driving its construction. Another characteristic of a model proposed by Woody is that a model is *productive or projectable*. In other words, a model does not come with well defined or fixed boundaries. While the domain of application of the model may be defined concretely in the sense that we know which entities and relationships can be

represented, the model does not similarly hold specifications of what might be explained as a result of its application.

Woody further argues that the structure of the model explicitly includes some aspects of *compositionality*. There is a recursive algorithm for the proper application of the model. Thus, while the open boundaries of the model allows its potential application to new, more complex cases, its compositional structure actually provides some instruction for how a more complex case can be treated as a function of simpler cases. Finally, in Woody's (1995) framework, a model provides some means of *visual representation*. This characteristic facilitates the recognition of various structural components of a given theory. Many qualitative relations of a theoretical structure can be efficiently communicated in this manner.

When we examine the use of chemical models in teaching, we witness several trends that suggest lack of support for students' understanding of models and modelling. First, chemical models have been presented to students as *final* versions of our knowledge of matter: copies of real molecules in contrast to approximate and tentative representations (Grosslight et al., 1991; Weck, 1995). Within the traditional framework of teaching, the motivations, strategies and arguments underlying the development, evaluation and revision of chemical models are overlooked. Classroom teaching typically advances the use of models for conceptual differentiation. For instance, models are used to distinguish weight from density (Smith, Snir & Grosslight, 1992), and temperature from heat (Wiser, 1987).

Second, textbooks often do not make clear distinctions between chemical models (Glynn, Britton, Semrud-Clikeman & Muth, 1989) but rather frequently present inaccurate 'hybrid models' (Justi & Gilbert, 1999). Carr (1984) provides the following example which illustrates a common model confusion in textbooks:

*"Since NaOH is a strong base, Na<sup>+</sup> is an extremely weak conjugate acid; therefore, it has no tendency to react with H<sub>2</sub>O to form NaOH and H<sup>+</sup> ion." (p. 101)*

The first statement is based on the Arrhenius model of acids and bases. The second statement can be interpreted in terms of the Bronsted-Lowry model although the emphasis on ionization is not consistent with this model. When and why a new model is being used,

and how this model differs from another model are not typically explicated in textbooks (Carr, 1984).

Third, chemical models have been synonymous with ball-and-stick models which are typically used as visual aids (Grosslight et al., 1991; Leisten, 1994). These 'physical models' have been intended to supplement conceptual information taught, and their use has been justified on Piagetian grounds: those students in concrete operational stages, in particular, need concrete models to understand the structure of molecules (Battino, 1983). The problem with this perspective is threefold (Erduran, 2001):

- The separation of conceptual information about atoms and molecules from physical models that represent them is inappropriate. Physical models *embody* conceptual information. In fact, their very existence is based on conceptual formulations about atoms and molecules.
- The focus on chemical models as physical models underestimates the diversity and complexity of models in chemistry. As illustrated earlier, for instance, models of acids and bases are abstract, and each model is accompanied by different sets of premises about what an acid or a base entails.
- The presumption that students in concrete operational stage *especially* need physical models is simply a weak argument. It is common practice for chemists themselves to use physical models to facilitate their communication and understanding of the structure and function of molecules. What this argument achieves in doing is to stress a deficiency on the part of children's potential to learn.

The fourth trend in the treatment of chemical models in the traditional classroom concerns the shift in emphasis from models to theories since the incorporation of quantum mechanical theories in chemistry. Chemistry and physical science textbooks show a growing tendency to begin with the establishment of theoretical concepts such as the 'atom' (Abraham, Williamson, & Westbrook, 1994). Textbooks often fail to stress the approximate nature of atomic orbitals and imply that the solution to all difficult chemical problems ultimately lies in quantum mechanics (Scerri, 1991).

Finally, traditionally chemical knowledge taught in lectures has been complemented by laboratory experimentation which is intended to provide students with the opportunity to experience chemistry as

inquiry. Chemical experimentation, however, has rarely been translated in the educational environment as an activity through which models are developed, evaluated and revised. Rather, experimentation is typically implemented as data collection and interpretation. Evidence suggests, however, that explanatory models may not be generated from data obtained in laboratory activities if explicit construction of such models is not encouraged (Schauble et al., 1991).

Given the trends in the way that models have conventionally been utilized in the classroom, it is not surprising those students' experience difficulties with models (Carr, 1984; Gentner & Gentner, 1983). Understanding of chemical models has been characterized in terms of three levels in students' thinking (Grosslight et al., 1991). At the first level, students think of models as toys or copies of reality which may be incomplete because they were intentionally designed as such. At the second level, models are considered to be consciously produced for a specific purpose, with some aspects of reality being omitted, suppressed or enhanced. Here, the emphasis is still on reality and the modelling rather than on the ideas represented, as it is the case with the first level understanding. At the third level, a model is seen as being constructed to develop ideas, rather than being a copy of reality. The modeler is active in the modelling process. Few students demonstrate an understanding of chemical models as characterized by the third level. Many students' conceptions of models as representations of reality persist even after explicit instruction on models (Glaser & Raghavan, 1995; Stewart et al., 1991).

### 3. Research Context

Some of the theoretical perspectives presented so far guided the design of a curriculum unit on acid-base chemistry as well as the analysis of data that were collected in the implementation context of the curriculum. *Acids & Bases Curriculum* (Erduran, 1999) is a performance-based activity unit where the main problem-solving tasks are the identification of unknown substances as acids and bases, and the generation of strategies for the proper disposal of these unknowns through neutralization. The problem-solving tasks necessitate the formulation, evaluation and revision of chemical models that can explain the physical and chemical properties of acids and bases. The curriculum is intended to last for about 5-6 weeks and consists of activities that encourage the generation, refinement and validation of several models such as symbolic, physical and pictorial models of acids and bases. Each designed activity in the unit is intended to generate

different models of acids and bases in the classroom. For instance, the task of testing everyday acids and bases with sensory experience asks pupils to draw representations to explain why some common substances are perceived the way they are.

One of the strengths of *Acids and Bases Curriculum* is that it allows pupils to express their ideas through a public sharing of ideas. There are opportunities for pupils to evaluate and revise their initial ideas towards more scientifically valid ones. Hence by design, the curriculum unit provides pupils with the opportunities to express their explanations about particular scientific phenomena and for the teacher to acknowledge and provide appropriate feedback.

The study that follows was conducted in a 7<sup>th</sup> grade science classroom of an urban middle-school in the eastern USA. The names of the participants have been replaced to protect their privacy. The school had a student population of 280, including 95 students in grade 8, 85 students in grade 7 and 100 students in grade 6. Students were 50% Caucasian, 48% Black and 2% other racial group. In grade 7, science was taught 3 periods per week and each period lasted for about 50 minutes. The teacher had taught middle school science for 11 years. He participated in the initial design of the curriculum which he has taught in numerous versions throughout his involvement in the project. The implementation of the curriculum was videotaped and transcribed. Verbal data from three consecutive were studied in detail. Furthermore, groups of 3 students were interviewed immediately after the lessons in a semi-structured interview format. The purpose of the interview was to gain an understanding of how students interpreted the main ideas introduced in the lesson in general and how they got engaged in epistemological reasoning about models in particular.

#### 4. Curriculum Design

The activities in *Acids & Bases Curriculum* have been designed to achieve domain-specific goals that emphasize the teaching and learning of chemical knowledge through models and modelling. In the following section, the focus is on three activities from the beginning of the curriculum: "Dilution Models", "Models of Acids and Bases" and "Indicators" as summarized in Table 1. An important epistemological goal of the curriculum is to promote growth of chemical knowledge (generation, evaluation, revision of chemical knowledge) and the learning of the criteria, standards and heuristics that enable growth of chemical knowledge. For instance, litmus paper can be an effective tool for distinguishing acids from bases but it is ineffective for monitoring

pH. Ranking of indicators for their effectiveness of use relative to different chemical goals is one activity promoted by the curriculum.

Toward this end, the curriculum extends the conventional emphasis on educational and definitional aspects of models as typified in the work of Boulter and Gilbert (1996) to include properties and kinds of models characterized by the work of such philosophers of science as Woody (1995) and Giere (1991), and cognitive psychologist Bruner (1966). In other words, the curriculum presents a unique contribution to the design of learning environments that support modelling because it is not only informed by educational and chemical definitions of models but also because it acknowledges and creates affordances that include epistemological as well as cognitive perspectives on models.

Each activity in *Acids & Bases Curriculum* provides an opportunity to manifest some of the theoretical ideas from literature reported more extensively elsewhere (Erduran & Duschl, 2004). The concept map shown in Figure 1, illustrate those aspects of models which informed curriculum design (e.g. iconic model) as well as those that are not built into the activities (e.g. analog model and enactive model) but do occur in data. Some codes (e.g. expressed model) are excluded in the analysis of data since they are redundant for the purposes of the present work. However, such codes are included in the concept map to provide a visual representation of the overall framework on models applied, and also to facilitate the recognition of those aspects of models that are justified in the following discussion to be irrelevant for the present work. Codes are defined in Table 2. In this study, the results from the investigation of verbal data manifesting codes related to 'properties of models' will be reported.

**Table 1.** Focusing on three activities from *Acids & Bases Curriculum*.

Activity	Domain-Specific Goal	Description of Activity
Dilution Models	Modelling of dilution as a physical process and a potential strategy for disposing of acids, bases	Adding water to everyday substances
Models of Acids and Bases	Modelling of the structure and function of acids, bases	Drawing representations to explain properties detected by senses
Indicators Indicator Models Ranking Indicators	Modelling chemical reactions of indicators with acids, bases Modelling chemical properties of acids, bases	Testing acids and bases with indicators Ranking indicators from best to worst relative to task of identifying acids and bases, and monitoring neutralization

**Table 2.** Definition of codes used to analyze verbal data.

<b>Aspect of Models</b>	<b>Code</b>	<b>Definition</b>
Definition of Models	Source/Target	A model is a representation between a source and a target.
	Model/Experiment	A model is constructed using evidence from experiments.
Properties of Models	Approximate	A model is an approximation of a complete theoretical phenomenon or object.
	Projectability	A model's flexible boundaries allow for its applicability to a new chemical context.
	Compositionality	A model has a compositional structure which provides guidelines for its application to new chemical contexts.
	Visual Representation	A model provides a visual representation of the phenomenon or object being represented
Kinds of Models	Analog Model	An analog model involves the development of a new model based on similarity with a known theoretical system.
	Scale Model	A scale model shares similarity of structure with real objects.
	Iconic Model	An iconic model is based on summarizing images.
	Conceptual Model	A conceptual model ranges from simply descriptive to analytical where symbolism may be varied.
	Enactive Model	An enactive model is based on representing experience in terms of action.
Educational Models	Consensus Model	A consensus model is an expressed model subjected to testing by a social group.

	Teaching Model	A teaching model is a specially constructed model used to aid the understanding of a consensus model.
Chemical Models	Arrhenius Model	An Arrhenius model describes acids and bases in terms of hydronium and hydroxyl ion concentrations.
	Lemery Model	A Lemery model describes acids and bases in terms of shapes of ingredients.

*Trends in the potential of codes in activities*

It was anticipated that certain codes will be emphasized in some activities more than in others. The 'source/target' category which defines models will be referred to especially at the beginning of the curriculum during "Dilution Models" activity where the class is discussing models for the first time. The 'model/experiment' category is expected in all activities since all activities involve experimentation and generation of models following experiments. This category emphasizes the significance of constructing a model based on empirical evidence from experiments. In "Ranking Indicators" activity reference to experimentation is indirect in that results from all previous experiments will be considered, not simply a direct reference to a single experiment carried out prior to this activity?

Codes such as 'productivity', 'compositionality', 'approximate' and 'visual representation' are expected to emerge in all activities where model making is explicit and requires consideration of model properties. 'Scale', 'conceptual' and 'iconic models' are expected in "Dilution Models", "Models of Acids and Bases" and "Indicators" activities since all of these activities present the task of providing an explanation through the model for why substances are perceived the way they are. In other words, some reference to scale involving microscopic components of substances, a conceptual explanation accounting for observed properties or an explanation based on imagery (e.g. use of color to represent acid or base) are anticipated by design of curriculum.

Some codes from the review of literature are not emphasized by design of the curriculum. For instance, 'analog model' (Giere, 1991) is not expected since this kind of model requires an understanding of another science content domain to formulate an analogy between

two theories. An assumption is not made about learners' knowledge of other science domains. Likewise, 'enactive model' (Bruner, 1967) is not built into these activities because all representations are encouraged in the written format, expressed subsequently in verbal information, and they don't require expression of models through action.

In the "Models of Acids and Bases" activity where the students are beginning to formulate their early conceptions of substances based on sensory experience, it is likely that representations will include those based on shapes of microscopic components of substances causing the sensory experiences. i.e. sharp taste of acids are like sharp broken glass pieces. Hence 'Lemery model', based on description of properties by shape, is expected to emerge in this activity. 'Arrhenius model', as a subsequently formulated model of acids and bases, is anticipated to be expressed during the "Indicators" activities where discussion is building up on pH scale and acidity. Since all activities are intended to provide a consensus from the diversity of ideas generated in the class, 'consensus models' are expected in all activities. Likewise, all activities require the guidance of the teacher toward consensus. Hence a relevant 'teaching model' that helps refine students' models will be present throughout the activities.

### *Dilution Models Activity*

This activity begins with a definition of models promoting the 'source/target' category. The task requires the drawing of a series of pictures to tell what happens when more and more water is added to an acid and a base. The picture is to explain any change that students taste, smell, feel or see from the experiments conducted ('model/experiment'). There are four pictures to be drawn. First with no water added and then with 10, 20, 30 drops of water added.

The task necessitates the generation of a model of dilution which includes an explanation that accounts for changing properties of acids and bases detected by senses. The model needs to provide some visual representation of the mechanism of dilution ('visual representation') and be inclusive of an explanation for why properties are detected in the way they are ('conceptual model'). At large, the activity needs to summarize and symbolize an event, dilution, in the form of imagery based on experiments ('iconic model').

In the "Dilution Models" activity, 'scale models' are promoted since the representations can be small replicas of spot plates containing the acids and bases being diluted or they could illustrate

microscopic components of acids and bases. The initial model before dilution is to be projected into a new context with water added ('projectability') and its composition will dictate the subsequent application to different steps in dilution ('compositionality'). Models will not be exact but will represent only some aspect of the dilution process ('approximate'). Through classroom discussions on different models of dilution, a consensus is encouraged from the diversity of opinions in the class ('consensus model') through a 'teaching model' used by the teacher.

### *Models of Acids and Bases Activity*

The task in the "Models of Acids and Bases" activity is to draw a series of pictures to show a model of an acid and a model of a base. These models are to explain why acids and bases are sensed in a certain way based on the experiments conducted in class ('model/experiment'). The second part of the activity asks the students to draw a model to show what would happen when an acid and a base are put together. Hence the acid and the base models need to be projected to a different chemical context and its compositional structure will determine how it is applied in this new context ('projectability' and 'compositionality'). The activity necessitates that only certain aspects of sensory properties can be represented in the drawing (i.e. sight, touch, feel) and not others (e.g. smell) ('approximate').

'Conceptual', 'iconic' and 'scale' models are expected to be expressed in this activity: (a) 'conceptual model' since the models are to explain properties detected by senses using some conceptual or symbolic scheme; (b) 'iconic model' since the models are to explain through summarizing an imagery of acids and bases; (c) 'scale model' since the models can either be microscopic components or small scale replicas of substances tested in the lab (e.g. lemons, bottles of baking soda).

Lemery model is anticipated to be expressed since this model explains properties by shape, and students are expected to relate properties to shapes (i.e. jagged edges are sharp and can represent sharp taste of acids). A consensus is encouraged from the diversity of opinions in the class ('consensus model') through a 'teaching model' guiding and informing the students' models.

## *Indicators Activities*

Activities on acid-base indicators are divided into two parts. The first activity involves the representation of indicators in acids and bases. The second part of the activity requires the ranking of indicators for optimal use in approaching the overall tasks of the curriculum: identification of unknown substances as acids, bases or neutral, and the disposal of these substances safely by neutralizing them.

Some indicators which can assist with the first task (e.g. phenolphthalein) may not work for the second task, while others (e.g. pH paper) can. Hence, the goal of the "Ranking Indicators" activity is to delineate between the two tasks and to choose the proper indicator by proposing a model indicator that can tackle both tasks. Each activity is described in more detail in the following paragraphs:

### *1. Indicator Models*

This activity requires the drawing of a series of pictures to tell what happens when an indicator is added to an acid and a base. The picture is to explain why there is a color change in the acid or base when an indicator is added in the experiments conducted in class ('model/experiment'). There are two pictures to be drawn in either of the acid or the base cases. First, with no indicator added and second, with indicator added.

The task necessitates the generation of a model of chemical reaction between an acid or a base and an indicator which includes an explanation that accounts for changing properties of acids and bases detected by senses, mainly sight of color change. The model needs to provide some visual representation of the mechanism of chemical reaction ('visual representation') and be inclusive of an explanation for why properties are detected in the way they are ('conceptual model').

The models will not be exact but will only represent some aspect of the chemical process between the indicator and acid or base ('approximate'). At large, the activity needs to summarize and symbolize an event, chemical reaction between indicator and acid or base ('iconic model'). In adding indicator to acid or base, the initial model is to be projected into a new context ('projectability') and its composition will dictate the subsequent application to two steps in a chemical reaction: before and after reaction with indicator ('compositionality').

Through discussions around different models of indicators in acids and bases, a consensus is encouraged from the diversity of opinions in the class ('consensus model') through a 'teaching model' informed by the Arrhenius model of acids and bases.

## *2. Ranking Indicators*

This activity asks students to rank indicators from best to worst. Students will project their models of indicators for identifying acids and bases to the context of identifying and monitoring neutralization ('projectability'). The model indicator from task of identifying acids and bases will be applied to the task of neutralizing. Hence the compositional structure of the model indicator (i.e. indicator rules to differentiate acid, base and neutral) will need to be essential in the new task ('compositionality').

In "Ranking Indicators" there will be an evaluation of indicators such that in the case of bromothymol blue and phenolphthalein, determination of neutral will be approximate, not exact, since these indicators do not come with a specific scale of acidity or alkalinity, while pH paper does ('approximate'). The model indicator will provide a visual representation for identifying acids, bases and neutral ('visual representation'). There will be a consensus to be made about which indicator is the best in the class discussion format ('consensus model').

Generating criteria to evaluate indicators is a central theme in this lesson. The best indicator needs to pass the criteria of identifying the strength of acids and bases and monitoring neutralization. Hence, there is a need to have a 'conceptual model' for what makes an indicator good relative to the overall goals of the curriculum: identification of unknown substances as acids and bases, *and* safe disposal of these substances. With issues of pH and strength emerging, there will be a discussion of 'Arrhenius model' and a 'teaching model' of pH scale is expected.

## **5. Curriculum Implementation**

Since the purpose of this chapter is to highlight the use of epistemological aspects of models in the design and implementation of the curriculum, in the following sections some results from the occurrence of codes about the definition and properties of models will be reported.

## Source/Target

The category 'source/target' refers to a broad definition of models. A model is typically characterized as a representation between a source and a target (Gilbert & Boulter, 1997). The target is an unknown object or phenomenon to be explained (e.g. process of dilution) and the source is a familiar object or phenomenon that helps to understand the target (e.g. progressive fading of colour).

Markers for 'source/target' category in data are utterances that signal the definition of a model in terms of representations between a source and a target. The category typically occurs when questions and statements such as, "*I think a model is...*" and "*I don't think that's a model because...*" are present in verbal data. There is some form of reference to representational aspect of models. The presences of words such as 'representation', 'replica', 'copy', 'miniature' signal the definition models in terms of source and target.

A segment in verbal data may include examples or define the source and target relationship in the context of an example. The category can be a sentence or a paragraph depending on when the definition is completed. In other words, the category may be contained in a sentence by one person or co-constructed among members of the classroom which might span multiple sentences before a definition of a model is completed. The definition is completed when there is a summarizing statement such as "*So, in short, a model is a small copy of an object*", and the conversation takes a turn to another theme.

As an example of 'source/target' category, consider an excerpt from the beginning of "Models of Acids and Bases" activity. In this excerpt, the teacher is posing some questions about models. Through questions and answers, the teacher is guiding the definition of a model in terms of a source and a target:

Teacher- What do you think of a model of?

Student- An airplane.

Teacher- An airplane. Anybody else think of a model? You made a model of your house.

Student- Trainway.

Teacher- Yeah, trainway you can make a model of.

Student- A Chinese tank.

Teacher- A what?

Student- A Chinese tank.

Teacher- A Chinese tank. You made a model of it. Think some more. Well what do you do when you make that model?

Students- (in unison, inaudible)

Student- Re-creation.

Teacher- Ah! She's said a re-creation of something.

Student- You're exhibiting something.

Teacher- You're exhibiting something. Very good. Abso...Both of you guys are excellent. A model is a representation of something. Okay.

In this excerpt, there is explicit reference to a target (e.g. a real life house) and an implicit reference to a source of this target (e.g. the small replica of a house). At the end of the excerpt, the teacher is explicitly defining a model as 'a representation of something.' This excerpt of the transcript is coded as evidence for one occurrence of 'source/target' category at the beginning of "Models of Acids and Bases" activity.

### *Model/Experiment*

The category 'model/experiment' emphasizes the relation of a model to experimentation. A model is generated by use of empirical data collected in experiments. Reference to experimentation in the context of model making is regarded as a signal for the presence of this category in data. The following utterance is an example of such a reference: "*I used the experiment to make my model*". Concurrent use of words such as '*experiment*', '*lab*' and '*model*', '*picture*', '*drawing*' signal the presence of 'model/experiment' category.

The following excerpt from student group interview following the "Dilution Models" activity provides an example for the 'model/experiment' category.

I- What evidence did you use from the experiments you have done?

Student- I used mostly the sight..

I - Uh - huh.

Student -..of the the experiment. I used the sight more than anything else. I used the color for touch and taste. It tastes a little bit like saying it's stronger here and less stronger and less sour but mostly I used how it looks when I drew the picture.

I - Uh-huh.

In his reference to experiment and how he drew his model based on his sight experience from the experiment, the student made a connection between an experiment and a model. Such reference to experiments in terms of experiment's role in model making was coded as an instance of the 'model/experiment' category.

Models in chemistry possess certain properties. Some of these properties have been described by Andrea Woody (1995). Model properties are significant in growth of chemical knowledge since they can serve as criteria for model evaluation and revision. For instance, a chemical model needs to provide visual representation of the phenomenon or object explained since communication in chemistry is heavily dependent on the use of visual information (Hoffmann & Laszlo, 1991). Other properties of models include 'approximate', 'projectability' and 'compositionality' which will be described in the following paragraphs.

### *Approximate*

This category emphasizes a model's structure as approximate. In other words, the model is an approximation of a complete representation for a phenomenon. The model omits many details based on judgments and criteria driving its construction. Questions such as "*Did you include all the information from your senses in your model?*" mark the beginning of 'approximate' category in data, and statements such as "*I didn't put everything from the lab in my picture*"

count as examples. Occurrence of words such as *'exact'* and *'not everything'* signal the occurrence of this category where there is implicit or explicit reference to the fact that a model is an incomplete representation.

As an example of the property of 'approximate', consider the following excerpt from the student group interview following the "Dilution Models" Activity. Students were asked to talk about their drawings:

I- Okay now! How do your drawings show what you *don't* know?

Student- Um, sometimes we don't put every single like sight, smell, touch and taste in it. We don't say everything, like what it smells like we can't do that in our drawings. So they won't know if they just look at the pictures. We have to put that in words.

The student's statement suggests evidence for the property 'approximate' since there is reference to certain qualities that are being omitted in the construction of the model. Certain judgments have been made (e.g. include sight but not smell) in the construction of the model.

### *Projectability*

The category of 'projectability' illustrates that a model does not come with well defined or fixed boundaries. While the application of the model may be defined concretely (entities and relationships can be expressed in the application), the model does not similarly hold specifications of what might be explained as a result of its application. 'Projectability' is particularly crucial in chemistry where the products of an unknown chemical reaction can often be predicted based on chemical composition of the reactants but the models of reactants do not necessarily provide guidelines for qualitative properties of the expected products.

Marker utterances of 'projectability' category include statements which signal the application of a model from one context to another in terms of a chemical reaction. Questions such as "*When you put the acid and the base together, what do you get?*" and "*What happens when you add more and more water to the acid?*" and statements such as "*If you put the vinegar and the baking soda together, you will probably make...*" call for the application of the

already constructed models to a new chemical context. Hence, they signal the presence of the 'projectability' category. As an example of 'projectability', an excerpt from the end of "Models of Acids and Bases" Activity will be used. The teacher had asked the students to make a presentation of their work to the class. One student explained her models of acids and bases:

Teacher- Okay go ahead.

Student- I did um a lemon, a full lemon. And it's it's made of acid, lemon juice I put on the acid side. And then I did Mylanta I think it's a base so I put it on the base side. And here I put lemon squeezes and then plus small tablets of Mylanta and then I added them together. And then I think they are an acid and a base.

Teacher- Okay, I asked you to choose the products right? (interruption/outsider) Even teachers interrupt the class along with the students! Alright, she used the products. This one is lemon and this one is Mylanta. Different way of showing it. I wanna ask a little bit more about when you put them together though. When you put the acid and the base together, what happened? I mean in your picture.

Student- They're um just put together. Um.

Teacher- Okay.

Student- I don't know what it really becomes though.

Teacher- Do you think anything happens?

Student- Well, it's not gonna stay both of them.

Teacher- Okay.

In the preceding excerpt, the student's models of acid and base were projected to the context of a model of the acid and base together. Before the activity of "Models of Acids and Bases", there was no task in the curriculum that asked that students apply their models to another context. Hence, by design, this activity is providing an opportunity to consider what aspects of a model can be carried onto a new context of application. The teacher's question about what happens when you put the acid and the base together begs for consideration of projectability of the original models onto a new

context. When the student states that she doesn't know what becomes of the substances when they're put together, she is demonstrating implicitly that the models she has provided already does not hold for specifications for how the new context can be explained.

### *Compositionality*

This category refers to the fact that while the open boundaries of a model allows its potential application to new, more complex cases, its compositional structure provides some instruction for how a more complex case can be treated as a function of simpler cases. Markers of this category include set of statements that make reference to the composition of a model in terms of, for instance, structure, and how this composition applies in a new, different chemical context. In other words, there needs to be an explanation for how the composition of the model constructed previously relates to the model in the more complex scenario.

In the Activity of "Models of Acids and Bases", one student had drawn representations where he illustrated an acid as a ball with spikes sticking out of it all around, and a base had small circles on its surface. During "Indicator Models" activity which came later in the instructional sequence, he referred back to these models to show what happens when an indicator is added to an acid or a base. For a model of indicator added to acid, he drew the same picture, the balls with spikes and circles, and then removed the spikes from the surface of the ball after the indicator was added to acid. I asked him to explain to me what he had done in his drawing:

Student- I did it wrong because here I thought we were just what it would look like before we put the indicator in it and after we put the indicator in it.

I- Uh-huh. Why did you think it's wrong?

Student- I don't know.

I- Why did you...I think this is very interesting. You have all these lines on top. And here after you added the indicator, you don't have it? What did you mean there? What were you thinking?

Student- Maybe like the indicator took away those little things.

I- Uh-huh. Same with the base?

Student- Uh-huh.

Even though the student thought what he did was wrong, the compositional structure of his earlier model provided some instruction for his approach in the new task. He used this earlier structure to deal with a new chemical context and reasoned that a change could be expected in the nature of the spikes. Overall, compositionality of this student's initial models enabled their application to the more complex case with indicators.

### *Visual Representation*

The 'visual representation' category indicates that a model facilitates the recognition of various structural components of a given event or object. Many qualitative relations can be efficiently communicated in this manner. Markers of this category in data include statements that emphasize judgments about quality of representations such as "*Your drawing doesn't show the colour well*" or "*I don't think this picture is a good thing to show what happens in dilution*". Furthermore, words such as '*show*' and '*display*' signal the potential occurrence of the category in data. In the following excerpt from the student group interview following "Dilution Models" Activity, two students are talking about a third student's drawing:

Student 1- Oh. Well, you drew the circles and then...The one I disagree on is that he didn't show actually how, it looks the same color, he didn't show, he just drew a picture of circle with ink on it. I mean he didn't show what happened.

Student 2- You don't have to use color, it just gets lighter.

Student 1- No I know but he didn't make it lighter. See this one is similar and this one is similar and they're all blank. I mean he could've used like a black pen and a little little touch of it and little ones..and waaaaaay little ones.

Student 2- You mean like this one?

Student 1- Yeah, like that one yeah..cause yours are all the same color.

In this excerpt, Student 1 is evaluating Student 3's model by stating that he didn't use fading colours to represent dilution. In other words, his models do not provide a visual representation of the dilution event. The category 'visual representation' is implied in this excerpt through the focus on the use of colour and shading in modelling dilution.

## **6. Impact of Curriculum Implementation on Students' Conceptual Understanding**

The examples provided so far about the definition and properties of models suggest that students are capable of engaging in epistemological reasoning in the context of modelling acids and bases. A further question that arises is to what extent does engagement in tasks that foster epistemological reasoning promote conceptual understanding? In the following sections, I will briefly address this question by highlighting an example from interviews conducted with a student prior to curriculum implementation and afterwards. The student initially gave examples of models in terms of small scale replicas of real objects- which was a typical characterization among the other students as well.

I- What comes to mind when you think about, when you hear the word 'model'?

Student- Like airplane models or car models.

I- Uh-huh. Good.

Student- And they usually build um, rocket models with like engines you put in them and launch them, I build those all the time.

I- Uh-huh.

Student- That's pretty much what comes to mind.

I- Okay. That's good.

Further probing of the student resulted in his reference to more examples of objects that can be considered as small copies of real objects, such as houses and bridges. I repeated the same question "What comes to mind when you hear the word model?" during my

interview with him following the completion of the *Acids & Bases Curriculum*:

I- I just wanna ask you again a few questions about models. Um, what comes to mind when you hear the word 'model'?

Student- Well now...um...Right now something that shows you something about another thing.

I- Uh-huh. Something that shows you something about another thing. Why did you say, right now?

Student- Because before...I don't know. (laughter) Before I didn't think like that. This project made my idea change about what a model is.

I- Uh-huh. Good! That's very good. That means that you've learned, right?

Student- Uh-huh.

I- How do you think it changed? What did you, what changed? What did you think before?

Student- That is was something that that was like, 3-D, it was something that was like, um, was going to be built or a scale model or something.

I- Uh-huh. And now?

Student- Just anything that shows you like, a replica or something like copying this paper is a model of this paper.

I-Uh-huh. Okay. Good! That's very good.

In the preceding episode, the student states that before the project his understanding of models was 'something that was 3-D', which is apparent in his emphasis on scale models in the individual interview prior to the implementation of the curriculum. (Students often referred to their tasks in the class as their 'project' - the project of junior HazMat Members identifying acids and bases and disposing of them safely.) Now his definition seems to include more abstract information. In terms of Grosslight et al.'s (1991) levels of understanding of models, the student seems to have moved from an understanding of models as

concrete objects to models as abstract representations as suggested by his statement, "Right now something that shows you something about another thing".

## 7. Conclusions and Implications

The preceding study highlights the design and implementation of a curriculum unit that nurtures epistemological reasoning in the context of modelling acids and bases. The data cited illustrate qualitatively that given the structuring of appropriate tasks; students are able to engage in applying epistemological criteria to model making and evaluation. Furthermore, students' participating in these tasks might promote deeper conceptual understanding of models. The broad scope of this work is to call for the prevention of a mutually exclusive development of chemical education and philosophy of chemistry (Erduran, in press). Research in chemical education should strive to learn from the mistakes that resulted when the early developments in science education were made mainly separate from advances in philosophy of science (e.g. Duschl, 1985). Shortcomings in the application of philosophy of science to science education were manifested in the "alphabet curriculums" supported by the National Science Foundation in the 1950s and 1960s. Curriculums such as Chemical Education Materials (CHEMS) and Chemical Bond Approach (CBA) while promoting discovery learning and inquiry methods of teaching, neglected themes such as "nature of chemistry" informed by historical and philosophical dimensions of chemistry.

At the current time, there is a relatively new branch of philosophy of science, philosophy of chemistry, which bears significant implications for chemical education (Erduran, Aduriz-Bravo & Mamlok-Naaman, in press; Erduran, 2005). The work of Andrea Woody covered in the adaptation in this study falls within this field. I want to particularly emphasize the potential contributions of philosophy of chemistry to theories of learning, curriculum design and teacher education. The reason for this emphasis is threefold. First, work presented here raises the question of what constitutes a learning trajectory when the focus of chemistry learning is shifted from conceptual to epistemological grounds. For instance, what would be the developmental patterns in students' thinking with respect to an understanding of criteria are used to evaluate chemical models? I argue that future theories of learning will need to be informed by the evidence presented from both philosophy of chemistry and its application in chemical education. Second, curriculum design and implementation have been, and continue to be, at the forefront of science education reform.

The merging of curriculum design with chemical epistemology creates a new forum where constraints to educational reform can be reviewed and resolved (Erduran & Scerri, 2002). Third, teaching involves the coordination of content knowledge of a domain and knowledge about the epistemology of that domain (e.g. Schwab, 1962). For chemistry teaching to be effective, prospective teachers will need to be educated about how knowledge is structured in the discipline that they are teaching. Practice and theory of future teacher education, then, will need to be informed by and about philosophy of chemistry.

### **Implications for theory of learning**

Learning of chemistry has conventionally been framed in terms of problem solving (e.g. Gable & Bunce, 1984; Lythcott, 1990), concept learning (e.g. Cros, Chastrette & Fayol, 1987; Nussbaum & Novak, 1979) and learning of science-process skills (e.g. Heeren, 1990; Yaroch, 1985). We seek to challenge the narrow definition of learning in this scheme. Learning of the nature of chemical knowledge defined in terms of conceptual understanding does not acknowledge the learning of criteria and standards that enable knowledge generation, evaluation and revision in a particular domain of science. For instance, we have little understanding of the patterns in students' use of criteria to refine chemical models. Hence, the trajectory for learning chemical models would need to be redefined to include specifications on how associated philosophical considerations on models develop in student thinking.

Concentrating on learning trajectories is particularly relevant when evidence from higher education is exemplified. Students in advanced chemistry classes demonstrate having difficulties with many aspects of chemistry. For instance, in a study conducted by Cros and his colleagues (1987), 95% of a large sample of university students had difficulty interpreting the Bohr model of the atom. University students also experience much difficulty with acid-base chemistry especially with Lewis model which combines acidity and basicity concepts with electrophilicity and nucleophilicity (Zoller, 1990). Both examples call for a further examination of how chemical explanations are introduced in the classroom. Deeper philosophical reflections on the nature of chemical models and how they are generated and evaluated are likely to improve students' understanding of key concepts in chemistry.

## Implications for curriculum design

Promoting the inclusion of philosophical perspectives in the chemistry curriculum suggests a departure from common approaches, and hence offers a new perspective for future curriculum development efforts (Erduran, 2000). Conventional approaches in curriculum design have typically included emphases on content knowledge (e.g. problem-solving in the context of substances, atomic structure and chemical reactions) or societal aspects of chemistry (e.g. effects of chemical pollution on the environment) in the writing of instructional activities. Numerous curriculum reform efforts have been based on these approaches. For instance, the Interdisciplinary Approach to Chemistry (IAC), a 1970s curriculum in the US for students of 15 or 16, is an example of the 'substances approach' and Nuffield 'O' Level Chemistry, developed in the early 1960's in England for students aged 13 to 16, exemplifies the 'chemical reactions' approach.

The Acids & Bases Curriculum described in this paper represents a contrast to the mentioned approaches to curriculum design for several reasons. First, the curriculum uses acid-base chemistry as a context for developing learners' understanding of the role of models in chemistry. Hence, the content of acids and bases, or content knowledge, serves as a context, not as an end, as in the case of IAC and Nuffield 'O' Level Chemistry. The main emphasis of the unit is to engage students in the process of model generation, evaluation and revision. Second, the Acids & Bases Curriculum acknowledges students' initial conceptions of acids and bases by encouraging the expression of student models. These models are shared and negotiated in the whole-class as well as small group discussion formats relative to emerging criteria. For instance, a model generated after an activity where tests with acids are conducted using the senses will not have the explanatory power to account for observations based on the reaction of acids with metals. The sensory experiences with taste tests might lead students to formulate a model that would account for the pricking sensation on the tongue. A model of an acid derived from an experiment of metal reacting with an acid would need to take into consideration the generation of the hydrogen gas. In other words, a new model will need to be generated in light of new evidence. The old model's uses and limitations will need to be specified and evaluated.

Engaging students in this sort of model evaluation, revision and development is, then, intended to enable "science talk" (Lemke, 1990) in the classroom. Finally, the emphasis on epistemological reasoning (ie. reasoning about the status of chemical knowledge) is a unique

contribution to chemistry curriculum design by Acids & Bases Curriculum. In particular, the goal of nurturing students' use of criteria and standards, such as model properties in the growth of chemical knowledge, is one that has been neglected by earlier curriculum reform efforts (Erduran, in press; Erduran & Scerri, 2002).

### **Implications for teacher education**

There is considerable evidence (e.g. Cros et al., 1987; McRobbie & Tobin, 1994; Nakhleh, 1993; Ross & Munby, 1991; Zoller, 1990) that even after innovations in curriculum design, numerous factors constrain change in teaching. Of particular relevance to the central thesis of the present work is obstacles to reform that concern teachers' chemistry knowledge. Schwab (1962) argued that expertise in teaching requires both knowledge of a content of a domain and knowledge about the epistemology of that domain. Teachers develop the necessary capability of transforming subject into teachable content only when they know how the disciplinary knowledge is structured.

Numerous studies (e.g. Lampert, 1990; Shulman, 1987) have illustrated the centrality of disciplinary knowledge in good teaching. The challenge facing teacher education is that teachers in general have had little exposure to issues of chemical knowledge beyond content knowledge. Future teacher education, then, should acknowledge the contributions of philosophy of chemistry in chemistry education in an effort to instill in teachers an understanding of the knowledge of chemical epistemology. Examination of themes such as models in chemistry would contribute to the strengthening of teacher's 'subject matter knowledge' as well as 'pedagogical content knowledge' (Shulman, 1987) for several reasons. First, with respect to teachers' subject matter knowledge, these themes would reinforce topics such as composition, bonding and structure/function relationships in chemistry. Second, teachers' pedagogical content knowledge would be deepened when their own understanding of the reasoning underlying the subject-matter is improved (e.g. reasoning about a model's compositionality). In other words, only when teachers are familiar with how knowledge growth occurs in chemistry will they be able to translate chemical knowledge into teachable scenarios where learners' acquisition of this knowledge is scaffolded.

## References

- ABRAHAM, M. R., WILLIAMSON, V. M., y WESTBROOK, S. L. (1994). A cross-age study of the understanding of five chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(2), 147-165.
- ERDURAN, S. (1999). Merging curriculum design with chemical epistemology: A case of teaching and learning chemistry through modelling. Unpublished PhD dissertation, Vanderbilt University, Nashville.
- ERDURAN, S. (2000). A missing component of the curriculum?, *Education in Chemistry*, November Issue, 168-168.
- ERDURAN, S. (2001). Philosophy of chemistry: An emerging field with implications for chemistry education. *Science & Education*, 10(6), 581-593.
- ERDURAN, S. (in press). Breaking the law: promoting domain-specificity in science education in the context of arguing about the Periodic Law in chemistry. *Foundations of Chemistry*.
- ERDURAN, S., ADURIZ-BRAVO, A., y MAMLOK-NAAMAN, R. (in press). Developing epistemologically empowered teachers: examining the role of philosophy of chemistry in teacher education. *Science & Education*.
- ERDURAN, S., y SCERRI, E. (2002). The nature of chemical knowledge and chemical education. In, J. Gilbert, O. de Jong. R. Justi, D. Treagust & J.van Driel (Eds.), *Chemical Education: Towards Research-Based Practice*, pp.7-27. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- ERDURAN, S., y DUSCHL, R. (2004). Interdisciplinary characterizations of models and the nature of chemical knowledge in the classroom. *Studies in Science Education*, 40, 111-144.
- ERDURAN, S. (2005). Applying the philosophical concept of reduction to the chemistry of water: Implications for chemical education. *Science & Education*, 14(2), pp.161-171.
- BATTINO, R. (1983). Giant atomic and molecular models and other lecture demonstration devices designed for concrete operational students. *Journal of Chemical Education*, 60(6), 485-488.
- BRUNER, J. (1966). *Toward a theory of instruction*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- CARR, M. (1984). Model confusion in chemistry. *Research in Science Education*, 14, 97-103.
- CARTWRIGHT, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford: Oxford University Press.

- CLEMENT, J. J. (1983). A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. In D. Gentner & A. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 325-339). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- CROS, D., CHASTRETTE, M., y FAYOL, M. (1987). Conceptions of second year university students of some fundamental notions of chemistry. *International Journal of Science Education*, 10, 331-336.
- DOWNES, S. M. (1993). The importance of models in theorizing: A deflationary semantic view. *Philosophy of Science Association*, 1, 142-153.
- DUIT, R., y GLYNN, S. (1996). Mental modelling. In G. Welford, J. Osborne, & P. Scott (Eds.), *Research in science education in Europe: Current issues and themes* (pp. 166-176). Bristol, PA: Falmer Press.
- DUSCHL, R. A. (1985). Science education and philosophy of science: Twenty-five years of mutually exclusive development. *School Science and Mathematics*, 87(7), 541-555.
- GABLE, D., y BUNCE, D. (1984). Research on problem solving in chemistry. In D. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 301-326). New York: Macmillan Publishing Company.
- GENTNER, D., y GENTNER, D. R. (1983). Flowing waters or teeming crowds: Mental models of electricity. In D. Gentner & A. L. Stevens (Eds.), *Mental models* (pp. 99-129). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- GIERE, R. (1991). *Understanding scientific reasoning*, (3rd ed.), Fort Worth, TX: Holt, Rinehart, and Winston.
- GLYNN, S., BRITTON, B. K., SEMRUD-CLIKEMAN, M., y MUTH, K. D. (1989). Analogical reasoning and problem solving in science textbooks. In J. A. Glover, R. R. Ronning & C. R. Reynolds (Eds.), *Handbook of creativity* (pp. 383-398). New York: Plenum Press.
- GROSSLIGHT, K., UNGER, C., JAY, E., y SMITH, C. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 799-822.
- HEEREN, J. K. (1990). Teaching chemistry by the Socratic Method. *Journal of Chemical Education*, 67(4), 330-331.
- JUSTI, R., y GILBERT, J. (1999). A cause of ahistorical science teaching: Use of hybrid models. *Science Education*, 83(2), 163- 177.
- LAMPERT, M. (1990). When the problem is not the question and the solution is not the answer: Mathematical knowing and

- teaching. *American Educational Research Journal*, 27(1), 29-63.
- LEISTEN, J. (1994). Teaching alchemy? *Chemistry in Britain*, 30(7), 552-552.
- LEMKE, J. (1990). *Talking science: Language, learning and values*. Norwood, NJ: Ablex.
- LYTHCOTT, J. (1990). Problem solving and requisite knowledge of chemistry. *Journal of Chemical Education*, 67(3), 248-252.
- MCROBBIE, C. AND TOBIN, K. (1994). Restraints to reform: The congruence of teacher and student actions in a chemistry classroom. Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, New Orleans.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (1996). *National Science Education Standards*. Washington DC: National Academy Press.
- NUSSBAUM, J., y NOVAK, J. D. (1979). Assessment of children's concepts of the earth utilizing structured interviews. *Science Education*, 60, 535-550.
- REDHEAD, M. L. G. (1980). Models in physics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 31, p.145.
- REIF, F. (1983). How can chemists teach problem solving? *Journal of Chemical Education*, 60(11), 948-953.
- ROSS, B., y MUNBY, H. (1991). Concept mapping and misconceptions: A study of high-school students' understanding of acids and bases. *International Journal of Science Education*, 13(1), 11-23.
- SCERRI, E. R. (1991). Chemistry, spectroscopy and the question of reduction. *Journal of Chemical Education*, 68(2), 122-126.
- SCHAUBLE, L., KLOPFER, L. E., & RAGHAVAN, K. (1991). Students' transition from an engineering model to a science model of experimentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 18, 859-882.
- SCHWAB, J. (1962). The teaching of science as enquiry. In, J. Schwab, & P. Brandwein, (Eds.), *The reaching of science* (pp. 3-103). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- SCOTT, P., DRIVER, R., LEACH, J., y MILLAR, R. (1993). *Students' understanding of the nature of science* (Working papers 1-11). Children's Learning in Science Research Group, Leeds: University of Leeds.
- SHULMAN, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-22.

- SMITH, C., SNIR, J., y GROSSLIGHT, L. (1992). Using conceptual models to facilitate conceptual change: The case of weight/density differentiation. *Cognition and Instruction*, 9, 221-283.
- SUCKLING, C. J., SUCKLING, K. E., y SUCKLING, C. W. (1978). *Chemistry through models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- WECK, M. A. (1995). Are today's models tomorrow's misconceptions? *Proceedings of the Third International History, Philosophy and Science Teaching Conference* (Vol. 2, pp. 1286-1294). University of Minnesota, Minneapolis.
- WHITE, B. Y., y FREDERIKSEN, J. R. (1986). Qualitative models and intelligent learning environments. In R. Lawler & M. Yazdani (Eds.), *Artificial intelligence and education: Learning environments and intelligent tutoring systems* (pp. 281-306). Norwood, NJ: Ablex.
- WISER, M. (1987). The differentiation of heat and temperature: History of science and novice-expert shift. In D. Strauss (Ed.), *Ontogeny, phylogeny and historical development* (pp. 28-48). Norwood, NJ: Ablex.
- WOODY, A. (1995). The explanatory power of our models: A philosophical analysis with some implications for science education. In F. Finley, D. Allchin, D. Rhees, & S. Fifield (Eds.), *Proceedings of the Third International History, Philosophy, and Science Teaching Conference* (Vol. 2, pp. 1295-1304). Minneapolis: University of Minnesota.
- YARROCH, W. L. (1985). Student understanding of chemical equation balancing. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(5), 449-559.
- ZOLLER, U. (1990). Students' misunderstandings and misconceptions in college freshman chemistry (general and organic). *Journal of Research in Science Teaching*, 27(10), 1053-1065.

## Capítulo 3

---

### *Growth of prospective chemistry teachers pedagogical content knowledge of models and modeling*

---

**Onno De Jong**

Utrecht University, The Netherlands  
o.dejong@phys.uu.nl

**Jan Van Driel**

Leiden University, The Netherlands  
driel@iclon.leidenuniv.nl

**SUMMARY.** *In this paper, we describe the results of a study of the development of pedagogical content knowledge (PCK) among a group of 12 prospective chemistry teachers (all M. Sc.) during a post-graduate teacher education program. The prospective teachers took part in a four-stage course module about models and modeling in science. The module consisted of institutional workshops connected with authentic teaching experiences. Research data were obtained from answers to written tasks, transcripts of workshop discussions, and reflective lesson reports. The results revealed that the prospective teachers developed PCK mainly about instructional strategies addressing the relationship between particle models and phenomena. Also, they demonstrated a growth in knowledge of student learning difficulties in this particular area. Although about half of the prospective teachers initially also demonstrated knowledge of teaching models as man-made inventions, and of instructional strategies focusing on particle modeling, they did not show any development of knowledge in these areas. These results are related to a possible preference for familiar and 'safe' teaching strategies. Implications for science teacher education are identified on the basis of our findings.*

**RESUMEN.** *En este capítulo describimos los resultados de un estudio sobre el desarrollo del conocimiento pedagógico del contenido (Pedagogical Content Knowledge, PCK) en un grupo de 12 profesores de química en formación inicial (todos ellos M.Sc.) durante un programa de postgraduación de formación de profesores. Estos futuros profesores participaron en un curso de cuatro etapas sobre modelos y modelización en ciencias. El módulo consistió en talleres institucionales conectados con experiencias de enseñanza. Los datos de la investigación se obtuvieron a partir de las respuestas a tareas escritas, de las transcripciones de las discusiones orales y de los informes de las clases de prácticas. Los resultados revelaron que los futuros profesores desarrollaban el PCK priorizando estrategias didácticas para mostrar la*

*relación entre las partículas y los fenómenos. También se demostró que había aumentado su conocimiento de las dificultades de aprendizaje de los alumnos en este tema específico. A pesar de que la mitad de los estudiantes habían demostrado inicialmente que sabían que los modelos eran invenciones humanas apropiadas para enseñar y que conocían estrategias didácticas para enseñar a modelizar en términos de partículas, no mostraron un mayor desarrollo en estos conocimientos. Estos resultados se relacionaron con una preferencia por estrategias de enseñanza ya conocidas y 'seguras'. Se identificaron las aportaciones de esta investigación para la formación de profesores.*

## **Introduction**

In his influential articles, Shulman (1986, 1987) described the knowledge base of teaching, which he saw as consisting of seven categories. Two of these categories are strongly related to the nature of the specific topic or subject taught, that is, subject matter knowledge (SMK) and pedagogical content knowledge (PCK). Shulman (1987) described PCK as "...that special amalgam of content and pedagogy that is uniquely the province of teachers, their own special form of professional understanding (p.8)".

Various scholars, elaborating on Shulman's work, have proposed different conceptualizations of PCK, in terms of the features they include or integrate (Grossman, 1990; Marks, 1990). Some scholars (Cochran, DeRuiter, & King, 1993) have broadened the concept of PCK in such a way that it encompasses all knowledge elements, including SMK, relevant to classroom practice. Others, on the contrary, have included PCK as one of the constituting elements of a new integrated concept of teacher knowledge, called pedagogical context knowledge (Barnett & Hodson, 2001). Magnusson, Krajcik, and Borko (1999) have presented a strong case for the existence of PCK as a separate and unique domain of knowledge. Compared with Shulman's original definition, quoted above, these authors have adopted a somewhat broader conceptualization of PCK. They acknowledge that the various components of teacher's knowledge may interact in very complex ways.

In the present study, PCK was conceptualized as consisting of the following two components: (a) knowledge of specific instructional strategies, comprising knowledge of representations (e.g., models, metaphors) and activities (e.g., explications, experiments) for teaching a specific topic, and (b) knowledge of student learning of a specific topic, comprising knowledge of students' learning difficulties. Obviously, these components, which are also considered essential by

many scholars (see Gess-Newsome & Lederman, 1999), are intertwined and should be used in a flexible manner: the more representations and activities teachers have at their disposal within a certain domain, and the better they understand their students' learning processes in the same domain, the more effectively they can teach in this domain. PCK, referring as it does to particular topics, is distinct from a general knowledge of pedagogy, educational purposes, and learner characteristics. Moreover, because PCK is concerned with the teaching of particular topics, it may differ considerably from the 'related' SMK.

In a previous study (Van Driel, De Jong, & Verloop, 2002), we investigated the development of prospective science teachers' pedagogical content knowledge of the relationship between phenomena and their interpretation in terms of corpuscular characteristics ('Macro-Micro'). In the present study, we investigated the development of prospective science teachers' pedagogical content knowledge of models and modeling. The purpose of the study was twofold. From a theoretical point of view, we aimed to gain a better understanding of the development of SMK and PCK of models and modeling in science. Our study also aimed to contribute to the research-based design of science teacher education courses.

### **Models, modeling, and science education**

The present study focused on a central issue in science teaching, that is, scientific models and modeling. A scientific model may be defined as a simplified representation of a target, focusing on specific aspects of it, whereas other aspects of the target are deliberately excluded (Ingham & Gilbert, 1991). The term 'target' refers to a system, an object, a phenomenon, or a process. Van Driel and Verloop (1999) have summarized the common characteristics of scientific models and modeling as follows: (a) a model is always related to a target, (b) the target is not accessible in a direct way, (c) there is no interaction between the model and the target, (d) there are certain discrepancies between the model and the target, (e) there are certain similarities between the model and the target, (f) modeling is aimed at a compromise between the discrepancies and the similarities, and (g) modeling is an interactive process. Scientific models can be categorized in various ways, for instance, by focusing on their modes of representation. External representations can be described in terms of appearance, for instance, scale models (such as stick-and-ball models), and symbolic models (such as chemical formulas). Internal representations can be described in terms of personal cognitive entities

and structures and are also called mental models. Scientific models can also be categorized by looking at their functions: descriptive, explanatory, or predictive.

Scientific modeling can be considered as a process of acquiring knowledge by building representations in an iterative way. Model formation includes using existing knowledge, using new information, and meeting the requirements of the task; model revision involves modifying parts of an existing model; while model elaboration involves adding to or combining existing models (Buckley, 2000). In sum, a scientific model can be considered as the outcome of a process of communication between scientists, which is focused on the construction of consensus by discussing and testing personal mental models of reality.

In science education, scientific models are usually simplified for teaching purposes, for instance, by taking students' prior knowledge into account, and, for that reason, can be called teaching models (Gilbert & Boulter, 2000). Science textbooks for secondary education contain many examples of scientific models, however, these models are often presented as static facts or as final versions of our knowledge, and textbooks rarely include assignments inviting the students to actively construct, test, or revise models (Erduran, 2001). Grosslight, Unger, Jay, and Smyth (1991) investigated students' and experts' conceptions of models and their use in science. They distinguished three levels of understanding and found that many lower secondary students considered models as either toys or small, incomplete copies of reality (Level 1). Some higher secondary students reasoned at the same level of understanding, but many others included the idea that models are designed for communication purposes rather than for exploring ideas (Level 2). Many experts reasoned at "level 3, that is, they believed that models are constructed to develop and test ideas and explain phenomena, and can be manipulated by the modeler.

Studies focusing on the development of prospective teachers' knowledge of models and modeling and the use of models in teaching are rare. Recently, Crawford and Cullin (2002) conducted a study in this field by investigating a group of 14 prospective secondary science teachers engaged in workshops, including modeling activities, as a part of their methods course. The participants in this study did not teach topics including models in secondary schools. They found that, initially, the prospective teachers perceived models mainly as a pedagogical tool to explain abstract concepts. After the modeling workshops, however, they had extended their view, emphasizing the

relevance of modeling to support students in constructing explanations about natural phenomena and they formulated specific intentions to use models and modeling in their classrooms.

### **Research question**

So far, little is known about the development of prospective science teachers' PCK of models and modeling in science and science education. The present study aimed to improve our understanding of this development. In particular, this development was investigated in the context of a prospective teacher education program aimed at connecting institutional course activities with the teaching activities of prospective teachers at their practice schools. The present study was guided by the following research question: *What aspects of growth in the prospective teachers' PCK of models and modeling can be identified?*

### **Research context**

The present study was situated in the context of a one-year post-graduate teacher education program; qualifying participants for the teaching of chemistry at pre-university level (cf. Grades 10-12 of secondary education). Before entering this program, the participants had obtained a Master's degree in chemistry. During the entire program, the prospective teachers worked at practice schools (teaching about five to ten lessons per week). They also took part in institutional meetings and workshops (two afternoons per week, on average), and reported and reflected on their teaching experiences and discussed their findings with each other. They also read excerpts from the research literature (e.g., on science education, pedagogy, educational psychology) and related this literature to their experiences, resulting in the formulation of teaching intentions (cf. De Jong et al., 1999). An experimental course module was developed, focusing on teaching about scientific models and modeling. This module was scheduled to take place about halfway through the teacher education program over a period of about ten weeks.

As the module took place about halfway through the teacher education program, the prospective teachers already had some experience in teaching topics that include models and modeling, either explicitly or implicitly. Therefore, we expected that they had developed some initial PCK of models and modeling before the start of the module. The module aimed to promote the further development of PCK by stimulating the prospective teachers to study and discuss the

three levels of understanding of models (Grosslight et al., 1991) and by inviting them to teach and to reflect on their teaching experiences, that is, by writing and discussing lesson reports.

The experimental module consisted of four subsequent elements (stages), in which the ideas about developing PCK mentioned in the previous sections were incorporated as follows (Figure 1).

**Figure 1. Overview of the 4-stage course module and the sources of research data**

Course module stages			
1: Orientation	2: Elaboration	3: Application	4: Reflection
Listing and discussing existing PCK of models and modeling	Reading and discussing the literature and text books on teaching models and modeling	Teaching of topics including models and modeling	Writing and discussing reflective lesson reports
Sources of research data			
Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
* Question about (App. 3) difficulties in learning about models and modeling (App. 1)	* Assignment about instructional strategies for learning (App. 2) * Recording of workshops	* Recording of a series of lessons	* Reflective lesson reports (App.3)  * Recording of workshop

## Research method

### *Participants*

The subjects in the study were a group of twelve (three female, nine male) prospective teachers of chemistry (referred to below as PT 1-12). In the spring of 2000, eight prospective teachers followed the institutional program at Author-1's University, while the other four participated in the program at Author-2's University. The module outlined above was taught by two different teacher educators, one in Author-1's University and one in Author-2's University, the first author of this paper being the instructor at his university. The instructor at Author-2's University met regularly with the second author, to discuss the progress of the module. A written scenario was developed in advance

in order to ensure that the module would be taught in an identical way at both universities.

### ***Data collection and analysis***

In order to monitor the development of PCK, a multi-method approach (Baxter & Lederman, 1999) was chosen. Data were collected at specific moments that were closely associated with the design of the course module (see Figure 1). The data collected consisted of (a) the written answers to the question and assignments, given in Appendix 1 and 2, and the audio tape recordings of workshop discussions about the answers, (b) the audio tape recordings of the lessons about a self-chosen topic focusing on models and modeling, made by the prospective teachers themselves, (c) the reflective lesson reports written by the prospective teachers, according to the assignment given in Appendix 3, and the audio tape recordings of workshop discussions about these reports.

The growth in the prospective teachers' PCK of models and modeling was identified in a similar way. First, the responses to the tasks (Appendices 1 and 2) and the transcriptions of the related workshop discussion were analyzed by the authors individually. Second, the reflective lesson reports (Appendix 3) and the transcriptions of the related workshop discussion were also analyzed by the authors individually. Next, by triangulation of the results, a set of categories was established to characterize the prospective teachers' PCK. Finally, by comparing the responses of individual prospective teachers at the beginning and at the end of the module, individual growth was assigned to these categories. During this phase, the audio recordings of the lessons taught by the prospective teachers were used as additional data, which mainly served to improve understanding of the contexts in which they had written their reflective reports.

## **Findings**

### ***Growth in prospective teachers' PCK (instructional strategies)***

In the second stage of the module, the prospective teachers gave examples of instructional strategies that they might use (Appendix 2). Their statements were classified in four categories of instructional strategies, referring to (a) addressing the relationship between particle models and phenomena, (b) discussing the functions of particle models, (c) discussing particle models as man-made inventions, and (d) addressing particle modeling. In the final stage of

the module, each prospective teacher wrote a lesson report (Appendix 3). Statements about instructional strategies were classified in the same four categories as mentioned above. The prospective teachers gave accounts of occurrences in their classrooms, addressing both their own actions and the responses of the students. They described their successes, but also the problems they encountered. For each of the four categories, growth in each prospective teacher's knowledge of instructional strategies was identified when new aspects or new details of such strategies were reported at the end of the module which were not reported at the beginning of the module.

The growth in PCK is illustrated below with specific examples for each category. These examples were chosen as being representative of the prospective teachers' responses to the category under consideration. Each prospective teacher's account at the end of the module was related to the topic he or she had selected for teaching practice.

- *Addressing the relationship between particle models and phenomena.*

In the second stage of the module, five prospective teachers made statements which fitted in this category. For example, PT-11 reported "discussing differences between substances with the same formula, like butanol and ether, by showing molecular models of these isomers". At the end of the module, nine prospective teachers made statements that reflected growth. Among them was PT-11, who reported that he had used molecular models not only to address differences between isomers, but also to discuss the decomposition of substances. Six out of these nine prospective teachers wrote relevant statements at the end only. Among them was PT-10, who reported about a strategy to discuss the differences between the boiling points of alkanes, such as methane, ethane, and butane. PT-10 had related these differences to the different formats of the molecules of these substances.

- *Discussing the functions of particle models.*

In the second stage of the module, two prospective teachers made statements that belong to this category. At the end, two prospective teachers made statements that reflected growth. Of these prospective teachers, PT-4 was the only one who made relevant statements on both occasions. Initially, she had only mentioned the descriptive function of models, but at the end of the module, she also

referred to their explanatory function. She wrote that, when teaching electrochemical cells (Grade 11), she had indicated to her students that the models of atoms, ions, and electrons are “useful for description as well as for explanation” with respect to electrochemical reactions in galvanic cells and electrolytic cells.

- *Discussing particle models as man-made inventions.*

At the second stage of the module, eight prospective teachers referred to this category. For example, PT-7 wrote “building up a model step by step, and in this way showing that it is all made up”, and PT-4 mentioned “showing them different models that represent the same molecule, but focusing on different purposes, for example, space-filling models, ball-and-stick models, models including electrons”. At the end of the module, none of these eight prospective teachers demonstrated growth, mainly because of the absence of any relevant statement. The only prospective teacher who made statements fitting in this category at the end of the module was PT-1. He reported that he had taught Rutherford's model of the atom, and that he had also introduced Aristotle's model of the nature of matter, and various intermediate models (Grade 9). In this way, he had shown “how models are designed, and that models are frequently revised, or even rejected”. As PT-1 had not referred to these notions at the second stage of the module, this account may be interpreted as indicative of growth in PCK in this category.

- *Addressing particle modeling.*

During the second stage of the module, half of the prospective teachers made statements referring to this category. For example, PT-5 said “let students build a molecule by themselves; to construct it [ . . . ], let them build sugar by putting the model in the chair form and in the boat form”. At the end, three prospective teachers made relevant statements that reflected growth. Among them, PT-5 was the only one who referred to this category both before and after teaching. PT-5 reported that he had taught the molecular structures of organic compounds, using 3D stick-and-ball models (Grade 10). He had attempted to intrigue his students by posing problems, such as “Find out if it is possible to construct a cyclic molecule including a triple bond using all the carbon atoms you have”. He demonstrated growth in PCK by reporting about the specific support he had offered his students, who initially had difficulties in solving this type of problem, but later became very enthusiastic and succeeded. He concluded that the use

of these models can be very rewarding, but it requires “hard work” on the part of the teacher.

In their reflective lesson reports, the prospective teachers also included new teaching intentions with respect to topics involving models and modeling. These teaching intentions, in particular, can be interpreted as indications of what has been learnt, that is, as growth in the prospective teachers' PCK. Nearly all of the new intentions referred to the usefulness of models and modeling for teaching and understanding. Most of these intentions were described in rather general terms. For example, PT-4 reported “the next time, I will use models again. Their application shortens the explanations and, moreover, provides support. Models are very useful to answer the questions of students”, whereas PT-8 wrote “often it is not easy to find good tools to clarify processes at a molecular or atomic level. But I intend to visualize as many concepts as possible using models and audio visual aids”. Other new teaching intentions were expressed in more specific terms, related to the topic that had been taught. For example, PT-1, who had addressed models as man-made inventions when teaching Rutherford's model of the atom, reported “After discussing my model of Rutherford, I went back to Aristotle's theory. I did this to show that nothing comes out of the blue, but there is a history behind it. The next time, I would start with it instead of finish with it”.

### ***Growth in prospective teachers' PCK (students' learning difficulties)***

In the first stage of the module, the prospective teachers answered a question about difficulties in learning about models and modeling (Appendix 1). Nearly all of these difficulties concerned particle models. Their answers were classified in four categories of learning difficulties, referring to (a) the relationship between particle models and phenomena, (b) the differences between particle models and phenomena, (c) the abstract nature of particle models, and (d) the process of particle modeling. In the final stage of the module, each prospective teacher wrote a lesson report (Appendix 3). Statements about students' learning difficulties were classified in the same four categories as before. In general, they used more specific examples to illustrate students' learning difficulties. The growth in each prospective teacher's knowledge of students' learning difficulties was identified in an analogical way as in the case of determining their growth in knowledge of instructional strategies.

The growth in the prospective teachers' PCK is illustrated below with specific examples for each category. These examples were chosen as being representative of the prospective teachers' responses to the category under consideration. Each prospective teacher's account at the end of the module was related to the topic he or she had selected for teaching practice.

- *Relationship between particle models and phenomena.*

In the first stage of the module, seven prospective teachers made statements which referred to this category. At the end of the module, ten prospective teachers' accounts contained statements that reflected growth. For example, PT-3 demonstrated his growth by specifying students' difficulties in understanding the relationship between particle models and phenomena in more detail than at the beginning of the module. For example, he wrote that, when teaching about reaction rate and the collision model, he had observed that some students (Grade 10) reasoned that "because of the increase of the concentration of hydrogen chloride in a solution, the molecules will move somewhat faster, so, more effective collisions, so, the reaction will be faster." Thus he found that these students, although coming to the correct conclusion, erroneously related concentration to the speed of the particles.

- *Differences between particle models and phenomena.*

In the first stage of the module, four prospective teachers referred to this category. For example, PT-1 wrote "they think that molecules are the smallest particles of a substance that have all the properties of a substance". At the end, four prospective teachers made statements that reflected growth within this category. PT-1 and PT-8 were the only two who made relevant statements on both occasions. PT-8 demonstrated his growth by giving more detailed descriptions of students' learning difficulties in understanding differences between particle models and phenomena. For example, he gave a detailed account of a discussion between students (Grade 9) about molecular explanations for phase transformations, and for the dissolving of sugar in water. He had noticed specific alternative conceptions among his students, for instance, the ideas that "water molecules are liquid, ice consists of hard and solid molecules that are solid and hard", and "sugar molecules disappear when sugar dissolves in water".

- *Abstract nature of particle models.*

Eight prospective teachers demonstrated growth in this category. For example, initially, PT-1 reported in general terms that students experience difficulties in understanding the abstract nature of particle models. At the end of the module, however, he reported in detail several difficulties of students. For example, when teaching the atomic model, he had observed that it was difficult for his students (Grade 9) "to accept that the space between the nucleus and the electrons in an atom is an 'empty space', not filled with air". He made several efforts to address this misconception, but these had not been successful.

- *Process of particle modeling.*

In the first stage of the module, only one prospective teacher, PT-8, reported difficulties belonging to this category. He referred to difficulties regarding the use of different models for the same target, for instance, "atoms as balls, later on as a nucleus and electrons that are spinning around, and later on again as they become orbitals". However, PT-8 did not report difficulties in this category at the end of the module. On the other hand, three prospective teachers made comments fitting in this category only at the end. For example, PT-2 gave a detailed account of the difficulties of students (Grade 9) in understanding the use of particle modeling to represent the process of breaking and forming bonds in order to arrive at a balanced reaction equation such as  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ .

## **Conclusions and discussion**

The findings of this study show a number of interesting aspects of the growth in the participating prospective teachers' PCK of models and modeling. Summarizing the above results, all twelve prospective teachers demonstrated growth in their PCK with respect to particular instructional strategies. Finally, eleven prospective teachers showed growth in their PCK with respect to students' learning difficulties in specific areas. The nature of this development may be specified as follows.

### ***Growth in pedagogical content knowledge***

The growth in the prospective teachers' PCK was demonstrated with respect to all four categories of instructional strategies. The highest

number of prospective teachers demonstrating growth was nine, in the category 'addressing the relationship between particle models and phenomena'. The lowest growth was observed in the category 'discussing particle models as man-made inventions', by only one prospective teacher. It was also found that a substantial number of prospective teachers made statements belonging to a particular category at either the beginning of the module only, or at the end only. Six of the prospective teachers made statements in the category 'addressing the relationship between particle models and phenomena' only at the end of the module, whereas seven and five of the prospective teachers made statements in the categories 'discussing particle models as man-made inventions', and 'addressing particle modeling', respectively, only at the beginning of the module. The former outcome can be considered indicative of a growth in PCK, but the latter not. This implies, for instance, that about half of the prospective teachers initially expressed knowledge of teaching the feature of models as constructs invented by scientists, but, after teaching, they failed to mention this feature explicitly. They demonstrated their initial knowledge by responding to the assignment requiring them to give some examples of teaching activities that they might use to promote students' understanding of models and modeling (cf. Appendix 2). The topics the prospective teachers chose to teach in their classrooms obviously limited their possibilities to apply the wide range of examples they mentioned during the pre-teaching assignment. Nevertheless, in our opinion, the topics selected for teaching provided sufficient possibilities to pay attention to models as man-made constructs.

The observed absence of growth in PCK with respect to particular categories of instructional strategies can possibly be explained by the influence of the pressure of managing classes and teaching in complex classroom situations. It is well known that prospective teachers tend to focus on classroom control, and prefer to apply instructional strategies mainly aimed at preventing disruption (Kagan, 1992). This preference may have directed the prospective teachers towards 'safe' strategies, that is, those strategies that were most familiar to them. For example, some strategies may have been inspired by their own experiences as science learners at school, or by the text books they used. Text books for chemistry usually pay more attention to the relationship between particle models and phenomena than to the concept of models as man-made constructs. This may explain why the prospective teachers did not show a growth in knowledge in this area after teaching.

Finally, the growth in the prospective teachers' PCK was demonstrated with respect to all four categories of students' learning difficulties. The highest number of prospective teachers demonstrating growth was ten, in the category 'relationship between particle models and phenomena'. Also, a majority of the prospective teachers (eight) displayed a growth in knowledge in the category 'abstract nature of particle models'. The lowest growth was noticed in the category 'process of particle modeling', which was demonstrated by three prospective teachers. Apparently, the prospective teachers had learned mostly in areas which seem to be connected to the use of the more conventional, or 'safe' instructional strategies. That only some of them demonstrated a growth in knowledge of students' difficulties with respect to particle modeling suggests that modeling activities for students were not applied by many of the prospective teachers. As such activities are less common in practice and in chemistry text books; this is consistent with their apparent preference for 'safe' instructional strategies.

In conclusion, the results of the present study show that, in general, the prospective teachers developed PCK mainly about addressing the relationship between particle models and phenomena. Although about half of them initially also demonstrated knowledge of teaching the concepts of models as man-made inventions and particle modeling, they did not show a development of knowledge in these areas, probably because they did not apply these concepts in their classroom practice.

### ***Implications for science teacher education***

To conclude this article, we suggest some implications for science teacher education derived from our findings. Firstly, we recommend the use of course modules which connect institutional course activities with teaching in practice schools. This provides prospective teachers with opportunities to develop their PCK in a constructivist way, that is, by reading and discussing the literature and text books on teaching about models and modeling, and connecting these activities with authentic teaching experiences with models and modeling in the classroom, followed by reflection on these experiences.

Secondly, we recommend paying special attention to the systematic planning of the use of models and modeling by the prospective teachers, as suggested by Harrison and Treagust (2000). This planning should be learnt in stages. In the first stage, the planning

should focus on lessons that require the use of PCK at a familiar level, for instance, knowledge of teaching about the relationship between models and targets. In subsequent stages, after having built up their initial PCK, the prospective teachers' planning should focus on lessons that require PCK at a less familiar level, for instance, knowledge of teaching about models as man-made inventions, or of the predictive function of models. In this stage, the ideas of Justi and Gilbert (2002), which focus on learning about modeling, may be useful.

Finally, reflective discussions about classroom experiences of teaching about models and modeling should be given a prominent position in teacher training workshops. In particular, discussions about 'strategies that work' can be an important stimulus for teachers to develop meaningful PCK (Appleton, 2002). Such discussions may also contribute to an increased awareness of not only the 'how' and the 'what', but also of the 'why' of teaching about models and modeling in science education.

## References

- APPLETON, K. (2002). Activities that work: How primary school teachers communicate aspects of their science PCK. Paper presented at the Annual Meeting of the Australasian Science Education Research Association, Townsville, QLD.
- BARNETT, J., & HODSON, D. (2001). Pedagogical context knowledge: Toward a fuller understanding of what good science teachers know. *Science Education*, 85, 426-453.
- BAXTER, J.A., & LEDERMAN, N.G. (1999). Assessment and measurement of pedagogical content knowledge. In Gess-Newsome, J., & Lederman, N.G. (Eds.), *Examining pedagogical content knowledge* (pp. 147-161). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BUCKLEY, B. C. (2000). Interactive multimedia and model-based learning in biology. *International Journal of Science Education*, 22, 895-937.
- COCHRAN, K.F., DERUITER, J.A., & KING, R.A. (1993). Pedagogical content knowledge: An integrative model for teacher preparation. *Journal of Teacher Education*, 44, 263-272.
- CRAWFORD, B.A., & CULLIN, M.J. (2002). Engaging prospective science teachers in building, testing, and teaching about models. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association of Research in Science Teaching, New Orleans, LA.

- DE JONG, O. ET AL. (1999). An international study of prospective teachers' initial teaching conceptions and concerns: the case of teaching 'combustion'. *European Journal of Teacher Education*, 22, 45-59.
- ERDURAN, S. (2001). Philosophy of chemistry: An emerging field with implications for chemistry education. *Science & Education*, 10, 581-593.
- GESS-NEWSOME, J., & LEDERMAN, N.G. (Eds.) (1999). *Examining pedagogical content knowledge*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- GILBERT, J. K. & BOULTER, C. J. (2000). *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- GROSSLIGHT, L., UNGER, C., JAY, E., & SMYTH, C.L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 799-822.
- GROSSMAN, P.L. (1990). *The making of a teacher: Teacher knowledge and teacher education*. New York/London: Teachers College Press.
- HARRISON, A.J., & TREAGUST, D.F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22, 1011-1027.
- INGHAM, A. M., & GILBERT, J. K. (1991). The use of analogue models by students of chemistry at higher education level. *International Journal of Science Education*, 13, 193-202.
- JUSTI, R.S., & GILBERT, J.K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24, 369-387.
- KAGAN, D. M. (1992). Professional growth among prospective and beginning teachers. *Review of Educational Research*, 62, 129-169.
- MAGNUSSON, S., KRAJCIK, J., & BORKO, H. (1999). Nature, sources, and development of pedagogical content knowledge. In Gess-Newsome, J., & Lederman, N.G. (Eds.), *Examining pedagogical content knowledge* (pp. 95-132). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- MARKS, R. (1990). Pedagogical content knowledge: From a mathematical case to a modified conception. *Journal of Teacher Education*, 41, 3-11.
- PIEREN, L., SCHEFFERS-SAP, M., SCHOLTE, H., VROEMEN, E. & DAVIDS, W. (1995). *Chemie 3HAVO/VWO [Chemistry]*, Groningen: Wolters-Noordhoff.

- SHULMAN, L.S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15 (2), 4-14.
- SHULMAN, L.S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57, 1-22.
- VAN DRIEL, J. H., & VERLOOP, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modeling in science. *International Journal of Science Education*, 21, 1141-1153.
- VAN DRIEL, J. H., DE JONG, O , & VERLOOP, N. (2002). The development of preservice chemistry teachers' PCK. *Science Education*, 86, 572-590.

## **APPENDICES**

### **Appendix 1. Question about learning difficulties**

What difficulties in learning the relationship between corpuscular entities and substances or processes do you remember from your earlier experiences as schoolboy/girl and university student, or from your previous teaching practice?

### **Appendix 2. Assignment about instructional strategies**

[Given are a fragment of an article by Grosslight et al. (1991, pp. 817-819) and three sections from a current chemistry textbook (Pieren et al., 1995, p. 188-198), dealing with molecular models as well as Dalton's model of the atom.]

Discuss the textbook sections from the perspective of the three levels of understanding described by Grosslight et al., and give some examples of instructional strategies that you may use to promote students' understanding.

### **Appendix 3. Assignment about writing a reflective lesson report**

Write a concise report about the most remarkable episodes and events during the lessons, including the analysis of the students' mistakes in a test at the end of the lessons. Address the following issues: What difficulties of students did you identify? What difficulties did you experience in your teaching? What changes would you make in these lessons next time?



## Capítulo 4

---

### *Conceptual profiles: a research program on teaching and learning scientific concepts<sup>2</sup>*

---

#### **Eduardo Mortimer**

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil  
mortimer@netuno.lcc.ufmg.br

#### **Luiz Otávio F. Amaral**

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil  
amaral@qui.ufmg.br

**SUMMARY.** *The notion of conceptual profile is an attempt to address the problem, of how individual meanings are developed in science classrooms, through the interplay between different modes of thinking and ways of speaking. The basic assumption is that in any culture, and in any individual, there exists not one, homogeneous form of thinking, but different types of verbal thinking (Tulviste, 1991), and that these different modes of thinking are interwoven with different ways of speaking. This heterogeneity of verbal thinking has been characterised in terms of a conceptual profile (Mortimer 1995, 1998), which acknowledges the coexistence, for the individual, of two or more meanings for the same word or concept, which can be appropriately accessed according to different contexts.*

*In this paper I draw on some aspects of sociocultural theory, as outlined in the work of Bakhtin and Vygotsky, to support the basic assumption of the notion of conceptual profile: that any concept or word meaning is always polysemous - in the sense of having more than one meaning - and polyphonic - in the sense of potentially expressing different world' views. In the first part I present the concepts of Bakhtin and Vygotsky which support the ideas that language is not unitary and that polysemy and polyphony is a basic characteristic of any word - including scientific concepts. In the second part, drawing on historical sources and the literature on alternative conceptions, I present the different zones that might constitute the profile of a basic concept in chemistry: molecule.*

---

<sup>2</sup> This paper compiles previous work (Mortimer and Amaral (2000) and Amaral e Mortimer (2006) and adds new dimensions to the notion of conceptual profile.

**RESUMEN.** *Con la noción de 'perfil conceptual' se intenta abordar el problema de cómo se desarrollan los significados de los individuos en la clase de ciencias, a través de la interacción entre diferentes modos de pensar y de maneras de hablar. La suposición básica es que en las diferentes culturas y personas no existe una sola manera, de pensar, homogénea, sino que coexisten diferentes tipos de pensamiento verbal (Tulviste, 1991) y que estos diferentes modos de pensar están entrelazados con diferentes maneras de hablar. Esta heterogeneidad del pensamiento verbal ha sido caracterizado en términos de un 'perfil conceptual' (Mortimer, 1995, 1998) que reconoce la existencia, para cada individuo, de dos o más significados para una misma palabra o concepto, a los cuales se puede acceder adecuadamente según sean los diferentes contextos.*

*En este capítulo se aportan algunos aspectos de la teoría sociocultural, tal como se presenta en los trabajos de Bakhtin y Vygotsky, para fundamentar la idea básica del perfil conceptual: que cada significado de un concepto o palabra es siempre polisémico -porque tiene más de un significado- y polifónico - porque expresa diferentes visiones del mundo. En la primera parte se presentan los conceptos de Bakhtin y Vygotsky que muestran que el lenguaje no es unitario y que la polisemia y la polifonía es la característica básica de cada palabra - incluso de los conceptos científicos. En la segunda parte, a partir de fuentes históricas y de bibliografía sobre concepciones alternativas, se presentan las diferentes zonas que pueden constituir el perfil de un concepto básico en química: la molécula.*

## **Introduction**

In this paper we present the basic assumptions of a research program in conceptual profiles and discuss briefly the methodology involved in dealing with the basic three tasks of this research program: 1) Determining the zones that constitute the conceptual profile for a number of central concepts in school science; 2) Characterizing individual conceptual profiles by investigating how these zones are used in different context by individuals belong to certain groups; 3) Investigating the interplay between different ways of thinking and modes of speaking in the meaning making process in science classrooms.

To illustrate the first of these tasks we draw on historical sources and on the literature on alternative conceptions to suggest the different zones that might constitute the profile of a basic concept in chemistry: molecule. That the concept of molecule has a profile calls into question the universality and context independence of a central idea in chemistry and makes a strong argument for the profiled nature of the basic concepts and ontodefinitions in science. Furthermore, the need of complementary views to account for molecular structure in

different contexts brings important issues for the understanding and teaching of chemistry, which are briefly discussed.

### **The research program on conceptual profiles**

The idea of a conceptual profile – that people can exhibit different ways of seeing and representing the world, which are used in different contexts – was proposed in the 1990s (Mortimer, 1995), inspired by Bachelard's (1940) epistemological profile, and its central argument that a single philosophical doctrine is insufficient to describe all the different forms of thinking that emerge when we try to expose and explain a single concept. The idea of a conceptual profile was first proposed as an alternative to conceptual change (Posner et al., 1982) and is aligned with its criticisms we find in other tendencies, such as Cobern's contextual constructivism, for instance (Cobern, 1996; El-Hani & Bizzo, 2002). It is an attempt to frame the problem of generating new meanings in science teaching considering the interplay between modes of thinking and ways of speaking. The basic assumption is that different modes of thinking that characterize the heterogeneity of thinking are interwoven with different ways of speaking, which allows for the study of the different zones that constitute a profile through the study of the different discourses and practices that characterize each of these ways.

Heterogeneity of thinking assumes that "in any culture and in any individual there exists not one, homogeneous form of thinking, but different types of verbal thinking" (Tulviste, 1991). This general idea can also be found in other formulations, for example the "tool kit" analogy used by Wittgenstein (1953/1979) for characterizing his language games. It expresses, also, an acknowledgement that word meanings are essentially polysemous. The notion of heterogeneity despite genetic hierarchy, discussed by Wertsch (1991), assumes that different forms of thinking can be ranked genetically (in the sense of development or generation) but the latter forms are not assumed to be more powerful. According to Wertsch "this position (...) can be summarised by saying that although some forms of functioning emerge later than others, they are not inherently better" (Wertsch, 1991, p. 97).

Assuming the existence of conceptual profiles as a manifestation of heterogeneity of thinking implies recognizing the coexistence, in the individual, of two or more meanings for the same word or concept, which are accessed and used in the appropriate contexts. Science itself is not a homogeneous form of knowing and speaking and can provide multiple ways of seeing the world, which

can exist together, in the same individual, and be drawn upon in different contexts. For example, the concept of *the atom* is not restricted to one unique point of view. Chemists deal with the atom as a rigid and indivisible sphere, like the Daltonian atom, in explaining several properties of substances. The structural formulae used by chemists, also represent the atoms arranged in molecules in this way. This model is not, however, suitable for explaining several phenomena including, for example, chemical reactivity, where more sophisticated models, including those derived from quantum mechanics, are used.

According to the notion of conceptual profile, learning a concept involves two interwoven processes: expanding the zones that constitute its profile and becoming aware of this multiplicity of meanings and contexts. For example, a student may develop an awareness that the scientific concept of 'heat', as a process of energy transfer between systems at different temperatures, is complementary to his/her everyday concept of heat, which relates heat to temperature: some likes it hot. If the notions are complementary, there are contexts in which one of the concepts is more appropriately used than the other. For example, to ask in a shop for a 'warm woollen coat' is far more appropriate than asking for 'a coat made from a good thermal insulator, which prevents the body from exchanging heat with the environment'. Furthermore, if we know that this 'warmth' of the wool is in fact the warmth of our body as the wool only isolates it from the environment, we are demonstrating our conscious awareness of this profile, drawing on everyday and scientific ideas of heat in a complementary way.

Although each individual has his/her own conceptual profile for each concept - with a different number of zones and different weights of each zone in the profile - sociocultural theory makes it possible to assume that the concepts and categories available in all the spheres of the world are held in an essentially similar form by a number of individuals inside the same culture, in a way that allows effective communication. These "collective representations" (Durkheim, 1972) have a supra-individual characteristic and are imposed upon individual cognition. Vygotsky, drawing from this position (Kozulin, 1990), pointed to the social dimension of the human mental process. According to his famous 'general genetic law of cultural development', "any function in the child's cultural development appears twice, or on two planes. First it appears on the social plane, and then on the psychological plane. First it appears between people as an interpsychological category, and then within the child as an intrapsychological category" (Vygotsky, 1931/1981, p. 163).

The Bakhtinian notions of speech genres and social languages can help us to find ways to relate different zones of a conceptual profile with different ways of speaking. Talking about what he called the languages of heteroglossia, Bakhtin claims that a national language is not unique, but composed of several different social languages, which "are specific points of view on the world, forms for conceptualizing the world in words, specific world views, each characterized by its own objects, meanings and values. As such they all may be juxtaposed to one another, mutually supplement one another and co-exist in the consciousness of real people" (Bakhtin, 1981, p. 292).

In addition, we should consider that become aware of a multiplicity of meanings and contexts involves the dialogue between new and old zones. Any true understanding, or meaning making, is dialogic in nature because we lay down a set of our own answering words for each word of an utterance we are in the process of understanding (Voloshinov, 1929/1973, p. 102).

Assuming the heterogeneity of language, meaning and verbal thinking and the dialogic nature of understanding and learning, as theoretical principles that support conceptual profiles, we are in a position to define the basic tasks that should be carried out if we wish to understand how people learn scientific concepts and how these concepts can be taught in terms of conceptual profiles: 1) Determining the zones that constitute the conceptual profile for a number of central concepts; 2) Characterizing individual conceptual profiles by investigating how these zones are used in different context by individuals belong to certain groups; 3) Investigating the interplay between different ways of thinking and modes of speaking in the meaning making process in science classrooms.

We have been working on this research program investigating the first of these three tasks for three basic ontodefinitions – matter (Mortimer, 2000), energy (Amaral, 2002), and life (Coutinho, 2005). We also worked on the second task for the concept of life and on the third task for the concepts of matter and energy.

Our decision was to begin with these three basic ontodefinitions (Emmeche 1997) which define the domain of natural science. Each of these ontodefinitions was unfolded into other concepts that would contribute to make their study feasible. In the case of matter, we studied the concepts of particulate models of

matter, atom and molecule (Mortimer, 1998, 2000; Mortimer and Amaral, 2000); for energy, we studied the concepts of heat, entropy and spontaneity of physical and chemical processes (Amaral and Mortimer, 2004, 2006); and for life, the concepts of life and living beings (Coutinho, El-Hani and Mortimer, *in press*).

Each of these tasks poses particular methodological problems. The diversity of ideas and contexts that should be taken into account for determining the zones of a conceptual profile constitutes a dynamic way of dealing with concepts. The aim is to present a particular concept as part of the human process of constructing knowledge which varies alongside the history. The dynamics used to determine the different zones that would constitute a conceptual profile has its inspirations in the approach proposed by Vygotsky to study the genesis of mental functions – including conceptual thinking – in different domains. According to Wertsch (1985, P. 14-15), “the three themes that form the core of Vygotsky’s theoretical framework are: 1) A reliance on a genetic or developmental method; 2) the claim that higher mental processes in the individual have their origin in social processes; and 3) the claim that mental processes can be understood only if we understand the tools and signs that mediate them.”

The methodology and the different instruments to study conceptual profiles, elaborated over more than 10 years, contemplate these three aspects. The analytical tools for characterizing classroom discourse (Mortimer and Scott, 2003), which were used to analyze a sequence of teaching for the particulate model of matter and the concepts of entropy and spontaneity, allows for the study of the social interactions and of speech genres and social language in the science classroom. These tools relates to the two last aspects of Vygostkyan methodology. For determining the zones of a conceptual profile, our methodology is inspired by the first aspect, i.e., the proposition of a genetic or developmental method for analyzing the human mental processes. Through emphasizing the process and not the product of development, Vygotsky considered where and when these processes occur, trying to account for the development of the higher mental functions in all their phases and in the different genetic domains – phylogenesis, sociocultural history, ontogenesis and microgenesis. The characterization of the zones of a profile, accordingly, is based on classroom data, on data available in the literature on students’ informal and alternative ideas and, finally, on rational reconstruction of the history of the concept (Lakatos, 1970). Each one of these sources is linked to a different genetic domain – microgenetic, ontogenetic, and sociocultural, respectively. Vygotsky warns that no single factor can be

found to explain the development of higher mental functions in all these domains. Accordingly, the study of these different domains aims at giving a broad comprehension of the dynamics of conceptual development and not to show parallelism between the different lines of development.

Given that nowadays there is almost a consensus around the idea that concepts are heterogeneous and that concept use is bound to contexts, what a research program on conceptual profiles can offer to science education community? First, we do not have a theory of conceptual development or a theory of teaching scientific concepts that accounts for this heterogeneity. Theories of conceptual development tend to assume this process as an endeavor towards a rational, non-contradictory and uniquely powerful scientific way of conceptualizing, which can allegedly subsume all the other forms, considered as "inferior". By proposing a theory that holds multiplicity of meanings and dialogue as basic principles we try to position the learner of science in a place much more coherent with his/her pluralist condition of belonging to different communities and dealing with different points of view, which constitutes the rule and not the exception in the life of most of the students in the Western world.

Second, the research program tries to build on at least three traditions in the field of science education: the "alternative conceptions movement"; the scientific literacy movement and its multiculturalism; and the "discursive turn" in science education, which emphasizes the role of language in the teaching and learning of science. In building this research program we try to re-estate the centrality of conceptual learning for the endeavor of teaching science, at the same time that we recognize the importance of culture, language and context for this process. Even if science curriculum development nowadays tends to be built around thematic and contextual issues, learning scientific concepts is to be found amongst the aims of any curricular proposal in science education and is still at the core of the problematic nature of teaching and learning science.

In summary, the conceptual profile research program attempts to be responsive to all the main developments in the field of science education. In this sense, it also offers a model of research in science education to be discussed, criticized and developed.

In what follows we offer an example of the task of determining the zones that constitute a conceptual profile. Drawing on historical

sources and on literature on alternative conceptions, we present the different zones that might constitute the profile of a basic concept in chemistry: molecule. According to the strategy of relating the central concepts to one of the three basic ontodefinitions of science – matter, energy and life – the concept of molecule is studied in the context of the definition of matter.

### **The zones that might constitute a conceptual profile of molecule**

According to the Oxford Dictionary the word molecule appeared in the English language in 1678, from French *molécule*. The word can be found in Lavoisier's *Traité Elemetare de Chimie* (1789) to designate the smallest units in which a substance can be divided without a change in its chemical nature. In classical chemistry, the idea of molecule evolves in the 19<sup>th</sup> century to "the smallest group of like or different atoms held together by chemical forces" (*The American Heritage Dictionary*, compact disc edition). According to such a classical concept, the properties of any material depend on the quantity and type of atoms, the way they are ordered - their topology - and the way they are arranged in space - their geometry.

This view of molecules as real objects - the building-blocks of matter constituted of atoms held together by chemical forces - continues to be central to research programs such as nanotechnology and nanoscience, in which scientists try to build molecular materials and machines, "remaking the world - molecule by molecule" (REGIS, 1995). The idea of a molecule as a machine has several applications in chemistry. It is used, for example, to describe the mechanism by which oxygen molecules reversibly bound to and release from molecules of hemoglobin (Perutz, 1978).

Nevertheless, because of the phenomena of stereochemical non-rigidity and fluxionality, for several molecules, it is not possible to draw a unique structure, with a fixed geometry. Molecules of PF<sub>5</sub>, for example, show a constant change between the equatorial and axial atoms of fluorine around the central atom of phosphorus. Moreover, the application of quantum mechanics in chemistry resulted in a new concept of molecule brought by the molecular orbital theory. Instead of a molecule as the framework produced by the union of atoms, the MO theory suggests that a molecule can be seen as a unity, a kind of polynuclear electronic cloud. In addition, the relational nature of many chemical properties obligates us to think properties as resulting of the interaction of molecules and not only of the characteristic composition

and geometry of one single molecule. In other words, we cannot substantialize these chemical properties.

To understand modern chemistry we can not resort only to the classical molecules or to its modern counterparts: dynamic, polynuclear or supramolecular frameworks. All of them are complementary views of the chemical world. They are not applicable to the same problems, but we can not resort to only one of them to explain all the chemical phenomena. If we look out of chemistry, into everyday culture, this scientific complementarity should be expanded to incorporate other meanings in a complete *conceptual profile* of molecule. These parts of the profile, which do not show themselves in the culture of chemistry anymore, can also be traced in the history of science. The idea of principles, as in Aristotle, Paracelsus and Libavius, are still alive in homeopathy. The substantialism of attributing macroscopic properties - as melting, boiling and dilation - to atoms and molecules, a very common find of research on children's ideas, can be traced from the *minima naturalia* of Aristotle, retaken and developed as a theory of the smallest particles in the Middle age by several of the Aristotle's commentators (Van Melsen, 1952). In a broader cultural profile, these ideas should be ranked together with the scientific views of molecule.

In what follows, we shall present a more detailed account for each of these zones, drawing from studies in the history of science. We have no intention of giving a detailed historical account of the ideas, but of using the history of science as a source for rational reconstruction of this socio-historic domain of the concept of molecule.

### **The first zone of a conceptual profile of molecule: the 'principles'**

The first zone of the profile could be identified with the idea of 'first principles'. Aristotle (384-322 B.C.), discussing the systems of the pre-Socratic philosophers, claims that there is something in common to all of them: "for all thinkers posit their elements or 'principles', as they call them; and, though they give no reasoned account of these 'principles', nevertheless we find (...) that they are really talking about contrasted couples" (Physics, I. v.). Aristotle maintains that these antithetical principles need something to work on, a passive principle as the nonantithetical subject on which the antithetical principles act (Physics, I. vi.). The four elemental substances (water, fire, air and earth) account for the constitution of all the sublunary bodies but they "cannot themselves be accepted as the ultimate material, for they

have antithetical characteristics and can be transmuted into each other by antithetical changes" (Physics, I. vii.). According to Aristotle every material being was composed of *primary matter* and *form of being*. In distinguishing between 'matter' and 'form', although never existing in isolation, and in assuming that matter "represents the incidental non-existence of attributes" (Physics, I. ix.), Aristotle made clear that his antithetical principles are not material.

The Aristotle system exerted a strong influence in several systems of natural philosophy for almost two thousand years. The idea of non material principles and transmutation had a particular importance to alchemy. Perhaps influenced by Aristotle's idea of the two exhalations - dry and wet, perhaps by the considerable accumulation of knowledge on metallurgy, sulphur and mercury became important principles in all versions of alchemy - Hellenic, Arabian, Chinese and European. For alchemy, sulphur is the principle of combustibility. All the inflammable things have some form of sulphur. Mercury is the principle of fusibility, which was considered the most important property of metals, the possibility of becoming liquid and being moulded.

Paracelsus (1493-1541) added Salt to Mercury and Sulphur to form the *tria prima*. Salt was considered to be the principle of solubility in water, of the crystalinity, and of the health maintenance, as food could be conserved when salted. It is curious noting that the trinity of Mercury, Sulphur and Salt is the exact analogous of the 20<sup>th</sup> century Ketelaar's triangle for the possibilities of representing chemical bonds, as mercury is a metal, sulphur a molecular substance and salt an ionic compound.

The idea of immaterial principles went beyond Paracelsus and can be found even in Libavius (1540-1616). His **Alchemia**, published in 1597, was a remarkable bibliographic event in chemistry (Hannaway, 1975). Instead of the enigmatic and allegoric discourse of the alchemical books, very common in that time, Libavius wrote in clear language and explained the operations of chemistry in a very systematic way. According to him, chemistry (alchemia) could be divided in two parts: *Encheria*, which dealt with chemical operations, and *chymia*, the study of chemical combinations, i.e., a descriptive approach for chemical reactions. Christie and Golinski (1982) called attention for an interesting point of **Alchemia**. *Encheria* has two classes of operations: the *elaborations* and the *exaltations*. The operations classified under the first label are those that bring closer or get apart

material particles of different bodies. The *exaltations*, however, are operations able to modify the bodies' qualities without affecting matter. Bodies' qualities apart from matter are nothing else but immaterial principles. Christie and Golinski compared the scheme of operations from Libavius with another, from an anonymous author of the middle of 17<sup>th</sup> century, and note that the schemes are very similar, using the same general idea for classify the operations. Nevertheless, there are no operations such as *exaltations* anymore. Mechanism had, at that time, made its room in science leaving no space for immaterial qualities or principles which, since then, disappeared from scientific thought.

It is worth to note that Lavoisier still used the idea of oxygen as a principle of acidity. Lavoisier, however, was not thinking of oxygen as an immaterial quality. The idea of immaterial principles, however, can still be found outside scientific culture, for instance, in alternative medical practices as homeopathy and herbal medicine. The homeopathic idea of therapeutic intensification through centesimal dynamization means that a medicine becomes more and more efficacious throughout a sequential dilution. Each dynamization includes the dilution of the medicine to the centesimal part of the original concentration and its agitation according specific prescription. If we take the thirtieth centesimal dynamization, we are dealing with something that was diluted to the  $(1/100)^{30}$  or  $1/10^{60}$  part of the original concentration. If the initial concentration was 1 mol/L, than we have something that is  $1 \times 10^{-60}$  mol/L. This number is infinitely small. To have one molecule of the active principle we would need  $10^{36}$  litres of the solution, i.e.,  $10^{33}$  cubic meters. Supposing a cubic container, this molecule of the medicine is diluted in a cube with  $10^{11}$  meters of edge, which is roughly the distance between the Sun and the Earth. One cube with this dimension with only one molecule of the active principle! The activity of the homeopathic medicine can not be accounted by a material principle.

We have no intention of criticising homeopathy but only to show that, in some way, the idea of immaterial principles and qualities survives there. Homeopathy and herbal medicine have become more and more popular, even among chemists. Their efficacy claims lie on grounds that are out of the scope of scientific concepts, but they are supposed to be effective for thousands of people around the world. Our conceptual profile leads us to understand that, although their principles appeared early, they are not inherently worse than scientific

thought, at least in a broader cultural view, as the former may work better in certain specific context than the latter.

### **The second zone of a conceptual profile of molecule: substantialism**

Although modern chemistry does not attribute properties of substances like dilation or fusibility to individual molecules, substantialism still remains part of our daily chemical language, mainly in dealing with energy of chemical processes and with relational properties. 'Latent heat of fusion' and 'heat capacity' are examples of substantiation of energy in the language of chemistry. We refer to foods or fuels as something with energy stored in chemical bonds. Text-books of biochemistry explain that (substantiated) energy is released when a bond P-O in a molecule of ATP is broken. The very definition of molecule quoted in most handbooks and dictionaries, as "the smallest unit quantity of matter which can exist by itself and retain all the properties of the original substance" (*CRC Handbook of Chemistry and Physics*), is substantialistic as molecules do not "retain all the properties of the original substance". A molecule does not melt itself, do not dilate itself. An atom of copper is not reddish-brown or malleable. Substantialism, thus, is a very important zone of the profile for science itself, as this unconscious use of it can produce confusion, leading chemists and students of chemistry alike to mistakes.

We can trace substantialism in Greek philosophy as well. Anaxagoras (500?-428 B.C.) used the idea of 'seeds' for the smallest units of matter. Although Aristotle did not agree with Anaxagoras' statement that every substance contains all possible kinds of seeds, and is named after the kind of seed that predominate in it, he admitted that there is a limit to the increase and decrease of a thing. (*Physics*, I.vi.) According to Aristotle the smallest particles of any given kind of matter are similar, for they are determined by the specific nature of the substance in question (Van Melsen, 1952).

Aristotle did not develop a physical theory of small particles beyond offering a logical argument against the indefinite divisibility of matter, but some of his commentators in the Middle Age attempted to. Averroes (1126-1198), for example, explains that "when we remove a part of fire and repeat this action again and again we finally reach a quantity which is such that by a further division the fire would perish, because there is a certain minimal quantity of fire" (AVERROES, *Phys. viii*, comm. 44, apud Van Melsen, 1952). Scaliger (1484-1558) is explicitly substantialist in his interpretation of Aristotle, and following Averroes, stated that fineness and coarseness, for example, are properties of the

minima themselves. Nevertheless, he distinguished between properties of matter that depend on the minima, as coarseness, and others that depend on the manner in which they are joined, as density. "Hail is as coarse as rain, but of greater density. Snow is as coarse as rain, but of a lesser density. Yet the matter of all three is the same" (Scaliger, apud Van Melsen, 1952, p. 75.)

It is possible to find substantialism also in the mechanist tradition. Lemery (1645-1715), whose "Cours de chymie" is one of the most popular chemical works published at the end of the 17<sup>th</sup> century, used the corpuscular theory of Descartes, which states that the properties of substances depend principally on the shapes of their particles. Lemery, accordingly, ascribes the properties of acids to a sharp, spiky form of their particles (Leicester & Klickstein, 1952).

The importance of substantialism lies in that although it is thought to be out of the doctrine of modern and contemporary chemistry, it remains alive in the subtle texture of daily language and practices of chemistry itself. Differently from the first zone, whose 'principles' are still alive but outside of scientific culture, substantialism remains alive in the shadows of chemical language, and can confuse students of chemistry. Moreover, research on children's and adolescents' ideas has shown that students from different countries use substantialistic atomism, dilating, melting or boiling the particles themselves to represent these phenomena (see, for example, Piaget & Inhelder, 1941; Doran, 1972; Nussbaum & Novick, 1978; Nussbaum, 1985; Driver, 1985; Ben-Zvi, Eylon, & Silberstein, 1986). By becoming aware of this zone in our own profile, we could avoid the traps of habitual language.

### **The third zone of the profile of molecule: geometrically arranged atoms**

The classical view sees a molecule as the smallest unit in which a substance can be divided without a change in its chemical nature. According to such a classical concept the properties of any material depend on the quantity and type of atoms, the way they are ordered - their topology - and the way they are arranged in space - their geometry. We are going to give a little account of the genesis of these three features of the concept.

This classical view can be traced in the atomism of Democritus (460?-370? B.C.), which is essentially mechanist and non-substantialistic. The differences in size, shape, and in position of the atoms account for

all the differences we perceive in things. "By convention are sweet and bitter; hot and cold. By convention is colour; in truth are atoms and the void" (Democritus *quot.* 589, apud Kirk & Raven, 1957, p. 422).

In 1803 Dalton (1766-1844) presented what is generally accepted as the first atomic theory applied to Chemistry. Atomism, at that time, was already well diffused through the work of Pierre Gassendi (1592-1655) and had been used by several important scientists as Galileo (1564-1642) Boyle (1627-1691) and Newton (1642-1727). Assuming weight as the fundamental property that could distinguish atoms of different chemical elements, Dalton opened a fruitful research program in chemistry. Nevertheless, alongside the entire 19<sup>th</sup> century, atomism was immersed in controversy and confusion. Not all scientists adopted the Daltonian program, as Berzelius (1779-1848) did in his search for atomic weights. The equivalent weights of Leopold Gmelin (1788-1853) were much more utilised by chemists in the 1840s than the atomic weights of Berzelius. Dumas (1800-1884), in 1836, wrote that "If I had such power I would erase the word atom from science, persuaded as I am that it goes beyond experience and that in chemistry we should never go beyond experience" (apud Rheinboldt, 1988).

Even those who had adopted the atomistic program were not in agreement in several points. Avogadro hypotheses (1811), which explained Gay-Lussac volumetric law of combining gases, made a clear distinction between atoms and molecules but could not be accepted by Dalton or Berzelius. Both had difficulty in admitting that a molecule of an element could be diatomic in the context of their theories. The electrochemical dualism of Berzelius, accounting for affinity in terms of difference in the electrical charges of the atoms, forbade atoms of the same element to attract each other, as they had the same electric charge. Dalton imagined that the repulsive caloric atmosphere of like atoms restrained them to form a diatomic molecule. Only in the 1860s, after the Karlsruhe Congress, the confusion on atoms, molecules and atomic weights began to dissipate. The means for determining molecular weights and, thereby, accurate formulas, based on Avogadro Hypotheses, was shown by Cannizzaro, ending with half century of dispute and mistakes.

Another fundamental contribution to the classical concept of molecule was the phenomenon of isomerism, enunciated by Berzelius in 1830. According to Berzelius, "the same elements, in the same number, but arranged in a different way (perhaps a different position of the atoms), lead to compounds with different properties and forms"

(apud Rheinboldt, 1988). Since then, the properties are shown to depend not only on the types and number of atoms but also on the way they are arranged in the molecule.

The third fundamental piece of this puzzle - that the properties of substances depend also on the geometry of the molecule - emerged in the context of an intensive work on several concepts that would originate structural chemistry. Organic chemistry developed several theories of substitutional types, which was the base for the latter development of the concept of valence by Kekulé (1829-1896) and Couper (1831-1892). The work of Le Bel (1847-1930) and Van't Hoff (1852-1911) on optically active compounds led to the conclusion that when a carbon atom is attached to four different atoms or atomic groups, the four substituents can be arranged in two different ways, and the resulting molecules will be different, each one the mirror image of the other. The tetrahedral representation of carbon opened the possibility of representing molecules as real objects, with the atoms disposed in a geometric arrangement that could be expressed by the polygonal line connecting them.

This idea of molecule was, basically, preserved in the first attempts to draw molecules taking into account the electronic structure of the atom. The Lewis formulas deal with chemical bonds as electronic pairs oriented in space, suggesting a way to treat bonding that would be preserved at most in the early attempts to apply quantum mechanics to molecular structure, in the context of the Valence Bond Method. The multiplicity of resonance structures, characteristic of VB method, is due to the impossibility of a literal translation of Lewis' Hypothesis in terms of a wave function, as all the electrons belong to the same molecular framework and can not be assembled on pairs in a unique and predetermined way. This obligates the VB method to take into account all the possible ways of pairing (Paoloni, 1980).

This classical view of the molecular structure, as a framework of atoms geometrically assembled, gave to chemistry a powerful explanatory model applicable to molecular problems not only in chemistry but also in physical and biological sciences. A beautiful example is Perutz's explanation of the mechanism by which hemoglobin takes up and releases molecules of oxygen, as we already mentioned. Perutz resorts to a triggering mechanism in which the transition between the so called *T* and *R* structures of hemoglobin, consisting mainly in a rotation of one pair of alpha- and beta- subunits with respect to the other pair, causes the movement of the heme iron

into the plane of the porphyrin ring. "Once the heme iron has descended into the plane it can bind an oxygen molecule. In the reverse transition (from  $R$  to  $T$ ) the iron is pulled out of the plane and the oxygen cannot follow because it bumps against the porphyrin nitrogen atoms" (Perutz, 1978). This very mechanistic approach to molecular biology is possible only by considering the molecular structure as a framework of atoms.

### Modern Chemistry: bringing new zones to the profile of molecule

The very characteristic of classical molecular structure is its fixed geometry, describable as a polygonal uniting fixed vibrating atoms. Many molecules, however, cannot be described as having this unique geometry.

We have already mentioned  $\text{PF}_5$  as an example of fluxional behaviour. Among many more recent examples we want to refer to some trisubstituted gold (I) clusters such as  $\text{Au}_{11}\text{L}'_{7-x}\text{L}_x(\text{SCN})_3$ , with  $\text{L} = \text{P}(\text{C}_6\text{H}_5)_3$  and  $\text{L}' = \text{P}(p\text{-ClC}_6\text{H}_4)_3$ . NMR spectra of these clusters show the reduction to a single signal as the temperature rises, characteristic of the equivalence of the nuclei (Steggerda, Bour & van der Velden, 1982). What interests us in this kind of behaviour comes from the evidence it provides of the non-necessity of correspondence between the properties of a material and a fixed molecular structure. Of course, chemists have for long considered dynamic properties of molecular structures as necessary to interpreting spectra. Nonetheless, stereochemical non-rigidity appears to go beyond the admission of rotations and slight oscillations. Another evidence of the dynamic nature of molecular structures comes from isotopic exchange studies. Mixing equal quantities of vapour of  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{D}_2\text{O}$  will give in a very short time a system with approximately 50% of HDO molecules.

Contemporary chemistry goes beyond the classical one also by admitting that a molecule can be described without referring to its constituent atoms. In MO theory, the use of LCAO functions is merely a question of commodity, not a mandatory feature of the scheme. Contrasting with the VB scheme, delocalization appears naturally in the MO's. This means, of course, that we have not to resort to anything like resonance to allow for the delocalization of (at least) some of the electrons. We may, however, be obligated to impose opposite corrections in describing some of the electrons as localised. Woolley (1978), moreover, called into question that molecular structure could be deduced from quantum mechanics. The quantum chemistry methods applied to molecular structure rely on the Born-Oppenheimer

approximation, which separate electronic and nuclear motions and treat nuclei as fixed. The Woolley approach to molecular structure without the fixed nucleus approximation brought a new and disconcerting view of the molecular structure as a collection of delocalized nuclei and electrons in which all identical particles are indistinguishable (Weininger, 1984).

Moreover, several chemical properties cannot be reduced to substantial properties. Acidity and basicity, redox behaviour, solvent effects on reactions, are just some examples of relational chemical properties depending on the interaction between molecules and not only on the structure of an isolated species. Even strong mineral acids as sulphuric or hydrochloric acids may behave as bases when facing stronger proton donors, super-acids, for example. In the latter, weak acids as HF and SbF<sub>5</sub> can be changed in a stronger one by being mixed together, and also in a very strong one in the presence of SO<sub>3</sub>. The energy of chemical processes only can be accounted for in relational terms, as changes in energy depend on the breaking and formation of bonds. The molecular structure is something dynamic that cannot be only seen as a group of atoms whose number, type and geometrical arrangement determine all its chemical properties.

Admitting the relational nature of chemical processes leads us to subscribing the reserves of many scientists of our time regarding the reductionistic program. Reductionism tries to persuade us in believing that every aspect of nature ought to be reduced to some fundamental laws, normally taken from physics. As Philip Anderson has aptly remarked, "the ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe." (Anderson, 1972, p. 393). Anderson also stresses two undesirable and very common corollaries of reductionism: first, it tends to consider most scientific fields as of relatively minor importance and their specific questions as mere instances of somewhat trivial applications of the really important work performed by elite. Second, this arrogance, already insufferable in the case of some physicists, becomes very dangerous when it comes from "molecular biologists, who seem determined to try to reduce everything about the human organism to 'only' chemistry, from the common cold and all mental disease to the religious instinct." (Anderson, 1972, p. 396)

## Conclusions

The application of the first task of the conceptual profile research program to the concept of molecule called into question the universality and context independence of a central idea in chemistry. The need of complementary views to account for the molecular structure in different contexts brings important issues for understanding and teaching chemistry.

Treating molecule as a concept that can be dispersed in several zones of a profile gives us the advantage of seeing how the way we approach the world is strongly influenced by the context we are dealing with. In the specific profile of molecule, realistic interpretation seems to be a recurrent obstacle. From the old days of Lemery, when particles were miniatures of the substance, we came to considering realistic molecular buildings. After the discovery of the electron and the impact of quantum chemistry, we tried to resort to realistic interpretations of the chemical bond and the atomic and molecular orbitals themselves. A fine example that this can indeed be so, even for quantum chemistry practitioners, is this quotation from C. A. Coulson:

"I described a bond, a normal simple chemical bond; and I gave many details of its character (and could have given many more). Sometimes it seems to me that a bond between two atoms has become so real, so tangible, so friendly that I can almost see it. And then I awake with a little shock: for a chemical bond is not a real thing: it does not exist: no one has ever seen it, no one ever can. It is a figment of my own imagination" (Coulson, 1955).

This recurrence to realistic interpretations is easy to understand if we remind that when facing new problems we have a strong tendency to resort on familiar views that would translate the new in an old scheme. Moreover, the conceptual profile of molecule give us evidence that realistic approaches to molecular problems can exist alongside other more complex and dynamic interpretations. In a broader cultural dimension, even non-scientific approaches, as dynamization in homeopathy, can be acceptable by some scientists when facing health problems. We are not full-time chemists all over our existence, and apparently contradictory views can exist side by side in our individual profile, as we do not use them in the same context.

Realism seems to be a two-dimensional obstacle, both epistemological and ontological. The realistic consideration of carbon valence atomic orbitals hinders formidably understanding and accepting contemporary findings as the possibility of synthesising penta- and hexa-coordinated carbon compounds as gold (I) clusters as  $\{[R_3PAu]_4CR\}^+$ ,  $\{[(C_6H_5)_3PAu]_5C\}^+$ , and  $\{[(C_6H_5)_3PAu]_6C\}^{2+}$ , prepared by Schmidbaur and co-workers (Grohman, Riede, & Schmidbaur, 1990). These same researchers have also announced the synthesis of gold (I) clusters including a penta-coordinated nitrogen atom. It seems to us that the notion of the four valence electrons of carbon as limiting the possibilities of bonding of this atom, both stoichiometrically and geometrically, is a huge ontological obstacle.

In the other hand, substantialisation of chemical properties seems to be a more epistemological than ontological obstacle, as thoroughly discussed in Bachelard's *La formation de l'esprit scientifique* (1938).

The consciousness of his/her conceptual profile can help a chemist to have a better understanding of the different ways science use when faced with different problems. This is particularly important when we think about teaching chemistry, as a student hardly sees this multiplicity of meaning as a natural characteristic of science. On the contrary, students tend to admit that scientific concepts are unique and well defined, and this can lead them to interpret all the chemical entities as realistic objects. Text-books normally present chemistry as populated by real orbitals, bonds, rings, etc. By showing that realism alone cannot explain all the chemical properties we may help students think open-mindedly in other fruitful ways.

In this paper we dealt with the first task we set up as part of the research program on conceptual profiles, i.e., determining the zones that constitute the conceptual profile for the central concepts in school science. In discussing the zones that might constitute the conceptual profile of molecule we already had some important insights related to difficulties and possibilities of teaching the concept. We believe that through characterizing individual conceptual profiles of molecule and investigating the interplay between different ways of thinking and modes of speaking about molecules in the meaning making process in science classrooms – the two other tasks set up in the research program – we will be able to offer stronger messages as how to teach this concept that is so central to chemistry.

## Acknowledgements

This work was supported by grants from CNPq.

## References

- AMARAL, E. M. R. (2004). Perfil conceitual para a segunda lei da termodinâmica aplicada às transformações químicas: a dinâmica discursiva em uma sala de aula de química do ensino médio. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais.
- AMARAL, E. M. R. y MORTIMER, E. F. (2004). Un perfil conceptual para entropía y espontaneidad: una caracterización de las formas de pensar y hablar en el aula de Química. *Educación química*. Cidade do México, v.15, n.3, p.218 - 233.
- AMARAL, E. M. R. y MORTIMER, E. F. (2006). Uma metodologia para análise da dinâmica entre zonas de um perfil conceitual no discurso da sala de aula In: Santos, F.M.T. e Greca, E. *A pesquisa em ensino de ciências no Brasil e suas metodologias*. Unijuí : Editora Unijuí, p. 239-296.
- ANDERSON, P. W. (1972). More is different. *Science*, 177 (4047): 393-396.
- ARISTOTLE. (1980) *Physics: books I-IV*. Cambridge, Ma, Havard University Press; London, Heinemann, . Translated by P.H. Wicksteed and F.M. Cornford.
- BACHELARD, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique: contribution a une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris, Vrin.
- BACHELARD, G. (1968). *The philosophy of No*, New York, The Orion Press. Translated from *La philosophie du non*, 1940, by G.C. Waterston.
- BAKHTIN, M.M. (1934/1981). Discourse in the Novel. In Bakhtin, M.M. (1981) *The dialogic imagination*, ed. by Michael Holquist, trans. by Caryl Emerson and Michael Holquist. Austin: University of Texas Press.
- BAKHTIN, M.M. (1986). *Speech genres and other late essays*. Austin: University of Texas Press. (edited by C. Emerson and M. Holquist, translated by V.W. McGee)
- BEN-ZVI, R. EYLON, B. y SILBERSTEIN, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64-66.
- CHRISTIE, J. y GOLINSKI, J.V. (1982). The spreading of the Word: New Directions in the Historiography of Chemistry 1600-1800. *History of Science*, 20: 235-266.

- COBERN, W. W. (1996). Worldview theory and conceptual change in science education. *Science Education*, 80(5), 579-610.
- COBERN, W. W. Y LOVING, C. C. (2001). Defining "science" in a multicultural world: Implications for science education. *Science Education*, 85, 50-67.
- COULSON, C. A. (1955). The contributions of wave mechanics to chemistry. Tilden Lecture to the Chemical Society (London). J. Chem. Soc., p. 2084.
- COUTINHO, F.A. (2005). Construção de um perfil conceitual de vida. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais.
- COUTINHO, F.A., EL-HANI, C. N. y MORTIMER, E.F. (*in press*). Construcción de un perfil conceptual de vida. In Pozo, J.I. (ed.) *Transformaciones representacionales y conceptuales*. Madrid: Antonio Machado Libros.
- DORAN, R. (1972). Misconceptions of selected science concepts held by elementary school children. *Journal of Research in Science Education*, 9 (2), 127-137.
- DRIVER, R. (1985). Beyond appearance: The Conservation of Matter under Physical and Chemical Transformations. In Driver, R., Guesne, E. & Tiberghien, A. (Eds.) *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press.
- DURKHEIM, E. (1972). *Selected Writings*, Cambridge University Press, Cambridge (original work published in 1895).
- EL-HANI, C. N. y BIZZO, N. (2002). Formas de construtivismo: Mudança conceitual e Construtivismo Contextual. *Ensaio: Pesquisa em Educação Científica*, 4(1).
- EMMECHE, C. (1997). Autopoietic systems, replicators, and the search for a meaningful biologic definition of life. *Ultimate Reality and Meaning*, 20(4), 244-264
- GROHMANN, A., RIEDE, J. y SCHMIDBAUR, H. (1990). Electron-deficient bonding at pentacoordinate nitrogen. *Nature*, 345: 140-142.
- HANNAWAY, O. (1975). *The chemists and the World: The Didactic Origins of Chemistry*. Baltimore/London, Johns Hopkins University Press.
- KIRK, G.S & RAVEN, J.E. (1957). *The Presocratic Philosophers: A Critical History with a Selection of Texts*. Cambridge, Cambridge University Press.
- KOZULIN, A. (1990). *Vygotsky's Psychology: A biography of ideas*, Harvester Wheatsheaf, New York.
- LAKATOS, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos. I. & A. Musgrave (Eds.)

- Criticism and the growth of Knowledge*. Cambridge: Cambridge University Press.
- LEICESTER, H.M. y KLICKSTEIN, H.S. (1952). *A Source Book in Chemistry: 1400 - 1900*. New York: McGraw-hill.
- MORTIMER, E.F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4 (3):267-285.
- MORTIMER, E.F. (1998). Multivoicedness and univocality in the classroom discourse: an example from theory of matter. *International Journal of Science Education*, 20(1), 67-82.
- MORTIMER, E.F. (2000). *Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências*. Belo Horizonte: Editora UFMG.
- MORTIMER, E.F. y AMARAL, L.O.F. (2000). Conceptual profile of molecule and molecule structure. In Pssaros, N. (Ed.) *Arts Mutantis*. Marburgo University Press.
- MORTIMER, E.F. y SCOTT, P.H. (2003). *Meaning making in secondary science classrooms*. Maidenhead: Open University Press.
- NUSSBAUM, J. y NOVICK, S. (1978). Junior High School Pupils' Understanding of the Particulate Nature of Matter: An Interview Study. *Science Education*, 62 (3), 273-281.
- NUSSBAUM, J. (1985). The Particulate Nature of Matter in the Gaseous Phase. In Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A. (Ed.) *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press.
- PAOLONI, L. (1980). Química e mecânica quântica: relação entre a estrutura lógica da Química e a realidade molecular. *Química Nova* 3: 164-171.
- PERUTZ, M.F. (1978). Hemoglobin Structure and Respiratory Transport. *Scientific American*, 239 (6): 68-86.
- PIAGET, J. y INHELDER, B. (1941). *Le développement des quantités chez l'enfant. Conservation et atomisme*. Neuchâtel et Paris: Delachaux & Niestlé.
- POSNER, G.J., STRIKE, K.A., HEWSON, P.W. y GERTZOG, W.A (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66\_(2): 211-227.
- REGIS, E. (1995). *Nano - the emerging science of nanotechnology: remaking the world - molecule by molecule*. Boston: Little, Brown and Company.
- RHEINBOLDT, H. (1988). *História da Balança. A vida de J. J. Berzelius*. São Paulo, Nova Stella/EDUSP.
- STEGGERDA, J.J., BOUR, J.J y VAN DER VELDEN, J.W.A. (1982). Preparation and properties of gold cluster compounds. *Recl. Trav. Chim. Pays-Bas* 101: 164-170.

- TULVISTE, P. (1991). *The Cultural-Historical Development of Verbal Thinking*. Trans. by Hall, M.J. Commack, NY: Nova Science.
- VAN MELSEN, A.G. (1952). *From atomos to atom: The History of the Concept Atom*. Pittsburg, Duquesne University Press.
- VOLOSHINOV, V.N. (1929/1973). *Marxism and the Philosophy of Language*. Cambridge, M.A.: Harvard University Press.
- VYGOTSKY, L.S. (1934/1987). Thinking and Speech. In *The Collected Works of L.S. Vygotsky*; Rieber, R.W.; Carton, A.S. (Eds.). Trans. by Minich, N. New York: Plenum Press. pp 39-285.
- WEININGER, S. J. (1984). The molecular structure conundrum: can classical chemistry be reduced to quantum chemistry? *Journal of Chemical Education*, 61(11): 939-944.
- WERTSCH, J.V. (1985). *Vygotsky and the social formation of mind*. Cambridge, M.A.: Havard University Press.
- WERTSCH, J.V. (1991). *Voices of the mind: a sociocultural approach to mediated action*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- WITTGENSTEIN, L. (1953). *Investigações Filosóficas*. São Paulo: Abril Cultural (Col. Os Pensadores).
- WOOLEY, R.G. (1978). Must a molecule have a shape? *Journal of American Chemical Society*, 100: 1073.



## Capítulo 5

---

### *Trabajo práctico y concepciones de los alumnos: la combustión<sup>3</sup>*

---

**Teresa Prieto Ruz.**

Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad de Málaga.  
ruz@uma.es

Rod Watson

King's College, London  
rod.watson@kcl.ac.uk

**ABSTRACT.** *This paper describes a study which investigated 14 and 15 year old students' understanding of combustión in both England and Spain, and explores the effect of practical laboratory experience on students' understanding. The teaching and learning styles used with the students in the study were explored using questionnaires and interviews. The students' understanding of combustión was explored using a questionnaire. The quality of the responses was explored in terms of the awareness of students of the involvement of gases in combustión. It appears that the more extensive use of practical work in English school has had only a marginal effect on their understanding of combustión.*

**RESUMEN.** *En este capítulo se describe un estudio en el que se ha investigado la comprensión que alumnos de 14 y 15 años, en España y en el Reino Unido, tienen sobre la combustión y el efecto, sobre la misma, de la experiencia de los alumnos en trabajo práctico de laboratorio. La metodología docente utilizada con los alumnos fue estudiada mediante cuestionarios y entrevistas. La comprensión de los alumnos de la combustión fue estudiada mediante un cuestionario. La calidad de las respuestas fue establecida en relación a su grado de conciencia sobre la implicación de gases en la combustión. Los resultados indican que la mayor exposición a trabajos prácticos en las escuelas inglesas influye en escasa medida en la comprensión de los alumnos.*

### **Introducción**

El trabajo práctico en la educación científica es algo que siempre ha sido considerado importante y por ello ha recibido

---

<sup>3</sup> Este documento reproduce, en buena medida, el contenido del artículo: Watson, R., Prieto, T y Dillon, J. (1995): The effect of practical work on students' understanding of combustion. *Journal of Research in Science Teaching*, 12(5), 487-502.

atención. Por ejemplo, Hodson (1992) se cuestiona la forma en que se utilizan las actividades prácticas en las clases de ciencias, mientras que Woolnogh y Allsop (1985) demandan mayor clarificación entre diferentes tipos de trabajos prácticos en la consecución de diferentes objetivos.

Por otra parte, las concepciones de los alumnos sobre la combustión también es un tema bastante estudiado con anterioridad. Esto se comprende fácilmente si tenemos en cuenta que se trata de un fenómeno muy cotidiano, familiar a todos, que representa para el profesor al menos potencialmente, una buena manera de entrar en los primeros tratamientos de las reacciones químicas, conectando con lo que a los alumnos les resulta familiar.

Por esta misma razón, numerosos textos recurren a la combustión a la hora de abordar e ilustrar diferentes aspectos de las reacciones químicas. Que algo haya sido bastante estudiado con antelación no significa en modo alguno que deje de ser objeto susceptible de estudio posterior. En el caso de las diversas investigaciones sobre las concepciones de los alumnos sobre combustión nos encontramos que se manejan datos bastante similares y se realizan dos tipos de interpretaciones bastante contradictorias. En efecto, entre la bibliografía existente se pueden encontrar dos posturas o planteamientos distintos a la hora de conceptualizar a las concepciones:

- como *constructos* dotados de cierta complejidad y coherencia, la cual es preciso descubrir
- como *ideas sueltas* sin relación aparente, en parte atribuidas a explicaciones ad hoc elaboradas por los alumnos ante preguntas sobre temas que jamás anteriormente se han planteado.

Nosotros nos ubicamos en la primera perspectiva. Y hemos tenido en cuenta, en mayor medida, lo formulado por aquellos autores que han ido buscando establecer modelos para tratar de explicar la forma en que los alumnos comprenden la combustión. También nos interesa especialmente indagar en la progresión de la comprensión que, con nuestros datos, se pueda mostrar que los alumnos tienen sobre el concepto de combustión. En esta postura se encuentran autores como Andersson y Meheut. Andersson (1986 y 1990), describe un sistema de categorías que pueden ser aplicadas a las respuestas de los alumnos a gran variedad de cuestiones sobre cambio físico y cambio químico. Estas categorías son:

- **Desaparición.** Cuando se pregunta sobre el peso de los gases del motor de un coche, muchos alumnos dicen que la gasolina se ha consumido y ha desaparecido.
- **Desplazamiento.** Cuando se trata de explicar qué ha pasado con el agua derramada en el suelo, algunos alumnos opinan que ha penetrado en el suelo, se ha desplazado a otro lugar.
- **Modificación.** Cuando arde alcohol, muchos alumnos dicen que el alcohol se está evaporando.
- **Transmutación.** Algunos cambios son explicados en términos de transmutación de una sustancia en energía, o de energía en sustancia, o de una sustancia en otra; ej. una cinta de hierro es transmutada a carbón por la combustión.
- **Interacción química.** La idea de reacción química puede ser utilizada correctamente a cambios químicos como la combustión de la gasolina, o incorrectamente a cambios físicos tales como la ebullición del agua, de la que algunos alumnos responden que produce burbujas de oxígeno e hidrógeno.

Esta categorización está realizada sobre respuestas individuales de los sujetos.

Por su parte, Meheut (1982) y Meheut et al. (1985), proponen una categorización específica para el proceso de combustión, en base a las ideas de conservación mostradas por los alumnos y a la sustancia combustible. En función de la naturaleza del combustible señalan dos grupos de ideas:

- a) metales, cera, agua, alcohol; de ellos se dice que *funden o se evaporan* (modificación, en la terminología de Andersson) y la sustancia se conserva.
- b) madera, carbón, papel, aire, que *se transforman en otra sustancia o en nada* (desaparición o transmutación en la terminología de Andersson) sin conservación de la sustancia.

Meheut además resalta que los alumnos fallan al considerar la materia interaccionando, cada sustancia se transmuta separadamente.

## ***El estudio***

Se diseñó un cuestionario (Anexo) de 9 preguntas, todas abiertas excepto una de opción múltiple. Las cuestiones se centraban fundamentalmente en:

- la naturaleza del proceso de combustión
- los reactivos y productos en la combustión
- la participación del oxígeno en la combustión
- aspectos de conservación
- ejemplos aportados por los alumnos sobre sustancias combustibles y no combustibles.

El cuestionario fue desarrollado mediante una serie de cuatro pruebas piloto que implicaron a unos 150 alumnos entre los dos países.

## ***La muestra***

La muestra la conformaron 299 estudiantes: 150 alumnos españoles y 149 alumnos ingleses de entre 14 y 15 años (1º del antiguo BUP en España). Esta edad fue elegida porque todos los estudiantes han estudiado unas ciencias básicas que incluyen la combustión. Los alumnos eran de habilidad mezclada, y centros públicos y mixtos.

El cuestionario fue aplicado durante el curso 1990-91.

## ***Análisis de los datos acumulados***

Hemos partido del sistema de categorías propuesto por Andersson como base para nuestro análisis, si bien modificando algunos aspectos como:

### **Reflexiones finales**

- Desaparición (categoría para Andersson) ha sido considerada por nosotros como una transmutación de algo en nada (aunque el lenguaje de los alumnos demanda investigaciones posteriores).
- Desplazamiento es una categoría inexistente en nuestros datos.

Por tanto, el análisis ha estado basado en tres grandes categorías: Reacción Química, Transmutación y Modificación, las cuales hemos redefinido de manera operacional teniendo en cuenta tres dimensiones: el fuego/llama, el papel del oxígeno/aire, y los reactivos y productos de la reacción. Al abordar el análisis nos damos cuenta de

que no es posible realizar la identificación una respuesta-una categoría. Porque:

- Los aspectos descriptivos no se pueden incluir en ninguna categoría explicativa. Por tanto, queda un cierto volumen de respuestas que conforman una categoría que hemos denominado descripción D que, como su nombre indica, alude a ausencia de carácter explicativo en las mismas, limitándose a describir observaciones.
- Las respuestas a una pregunta contienen "unidades de información" diferentes que pueden ir a parar a diferentes categorías.

Un problema que permanece abierto es el hecho de que los alumnos usan, con frecuencia, las palabras con significados distintos al que atribuyen sus profesores. Para otorgar los significados más ajustados posibles al pensamiento de los alumnos se realizaron entrevistas a un grupo de alumnos. El esquema de análisis fue el siguiente:

- Red sistémica para las respuestas correspondientes a cada una de las preguntas. De esta manera se organizan los significados en categorías.
- De las redes sistémicas se extraen indicadores de pensamiento de diferentes categorías.
- Redefinición de los modelos de Andersson, utilizados según los componentes de las respuestas de nuestros alumnos, y descripción detallada de los mismos.
- Análisis jerárquico de estos modelos de pensamiento y tanteo de posibilidades de progresión a través de ellos.
- Categorización de cada respuesta de los alumnos según los modelos definidos.
- Categorización de los alumnos según el conjunto de sus respuestas a las 6 cuestiones consideradas, encuadrándolos en alguno de los modelos.
- Investigación de la posible incidencia de la experimentalidad en la metodología a la que ha estado sometido cada grupo de alumnos en la comprensión de la combustión.

- Análisis de la consistencia/inconsistencia de los alumnos cuando usan estos modelos en sus respuestas a las diferentes cuestiones.

### **Definiciones operativas de los modelos explicativos utilizados por los alumnos**

**(Prieto, Watson y Dillon, 1992)**

#### **1.- Interacción y papel del oxígeno**

**R Q:**

- Los alumnos reconocen que la sustancia combustible y el oxígeno del aire interactúan y forman parte de los productos de la combustión.
- El proceso es irreversible.

**T:**

- No existe interacción entre el combustible y el oxígeno del aire.
- El oxígeno puede ser considerado necesario para que la combustión tenga lugar o puede no serlo.
- Se trata de un proceso destructivo que puede liberar sustancias procedentes del combustible.
- El proceso es irreversible.

**M:**

- El oxígeno o el aire no están implicados en el cambio.
- El proceso es reversible.

#### **2.- Fuego/llama**

**R Q:**

- Se describen observaciones sobre cambios de energía/calor; pero no se trata de explicarlos.
- El fuego o la llama son descritos como evidencias de la reacción química.
- La llama contiene al combustible y al oxígeno interactuando entre sí /reaccionando.

**T:**

- La llama/fuego es el agente activo del cambio.
- El oxígeno/aire puede ser necesario para alimentar el fuego/ "mantenerlo vivo". El oxígeno/aire es transmutado por el fuego/llama o consumido por él.
- La materia puede transmutarse en calor.
- Las llamas contienen combustible, aire o los dos; pero no se consideran interacciones.

**M:**

- La llama/fuego es la fuente de calor que produce la modificación.

### **3.- Reactivos y productos**

**R Q:**

- Los productos contienen a los reactivos en combinaciones químicas diferentes.
- La masa se conserva si los alumnos atribuyen peso a los gases.
- Los productos tienen diferentes propiedades que los reactivos.

**T:**

- Durante la combustión, el combustible se transforma en otra sustancia o en nada.
- El oxígeno/aire, por separado puede transformarse en otro gas o consumirse. Puede ser necesario, pero no interacciona en sentido químico.
- La masa puede aumentar, disminuir o no modificarse (porque en el modelo transmutación cualquier cambio es posible).
- Las propiedades no se conservan. La energía puede ser sustancializada.

**M:**

- Una sustancia cambia a una forma diferente pero continúa siendo la misma.
- La masa se conserva, aunque depende de que los alumnos piensen que diferentes formas (p.e. estados sólido y líquido) pesan lo mismo.
- Muchas de las propiedades se conservan también.

### ***Ordenación jerárquica de los modelos explicativos de los alumnos***

Una comparación entre estos modelos pone de manifiesto diferentes grados de sofisticación y de proximidad a la teoría científica. Si los ordenamos de menor a mayor, tenemos que:

**D**, aquí los alumnos no explican, simplemente aceptan lo que ven y así lo describen.

**M**, aquí los alumnos fallan al distinguir un cambio físico de uno químico. Puesto que este modelo nunca es aplicado a todas las sustancias, se muestra que los alumnos que lo usan no han adquirido una visión generalizada a todos los ejemplos, es decir, interpretan unos ejemplos de una forma y otros de otra.

**T**, aquí tenemos una teoría explicativa para todos los casos, que incluso asigna un papel al oxígeno/aire. El fallo radica en la ausencia

de interacción entre oxígeno y combustible y la arbitrariedad en las consideraciones sobre la conservación de la masa.

**RQ**, es la explicación científica, a un nivel adecuado a la edad de los alumnos, del fenómeno de la combustión.

**X**, a la hora de codificar respuestas hemos tenido que recurrir a una categoría de transición entre T y RQ para aquellas respuestas que no son claramente T y contienen atisbos que van más allá, pero tampoco llegan a ser RQ, es decir, están en algún punto entre T y RQ.

Con estos criterios, en una primera fase, han sido categorizadas las respuestas de los alumnos a las preguntas 1, 5, 6, 7 y 9.

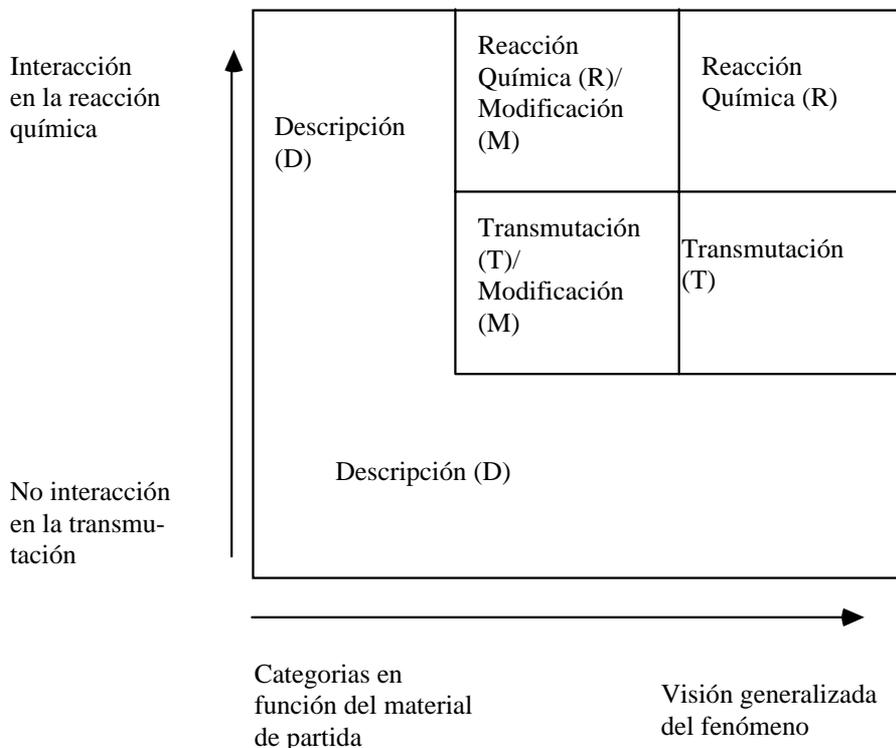
#### **Tabla 1.- Distribución de respuestas en categorías**

- Cualitativamente, las respuestas de los alumnos españoles e ingleses son similares, aunque existen diferencias en cuanto al número de respuestas en categorías.
- La categoría dominante es la Transmutación, con bastantes alumnos despegándose de ella y acercándose en alguna medida hasta la categoría RQ (X).
- Son muy pocos los alumnos que usan RQ de forma consistente en todas las respuestas.
- El uso de la categoría Modificación es muy frecuente en el ejemplo de la vela, pero sólo algunos alumnos la usan en las respuestas a otras preguntas.
- Donde aparecen más alumnos categorizados como RQ es en la pregunta 9, lo cual puede ser debido a que se trata de una pregunta cerrada donde se dan las pistas a los alumnos para identificar la opción correcta.

#### ***Propuesta de modelo de progresión***

Una vía posible en la cual se pueden combinar estas categorías para ofrecer una imagen de progresión es la que se representa en la figura 1. Es preciso resaltar que tanto la ordenación

jerárquica como el modelo de progresión son construcciones del investigador.



**Figura 1.-** Posible modelo de progresión en la comprensión de la combustión.

1. Avanzar a lo largo del eje horizontal significa que el alumno va siendo cada vez más capaz de reconocer ejemplos distintos de combustión y diferenciar ese cambio de lo que es un cambio de estado.
2. Avanzar a lo largo del eje vertical significa abandonar el modelo "Transmutación" e ir ganando en conocimiento sobre los diferentes aspectos de las reacciones químicas (interacción entre los reactivos, conservación de la masa, papel de los gases...). A veces los alumnos reconocen estos aspectos ocasionalmente en alguna de las respuestas que dan mientras que en otras utilizan el modelo transmutativo. ¿Es

esto una incoherencia o es el proceso natural y lento de sustitución de un modelo por otro?

### Categorización de los alumnos

Distribución de los alumnos en función del uso de las categorías RQ y T.

Las respuestas a las preguntas 1, 5, 6, 7 y 9 fueron combinadas en cada alumno individualmente considerado, con el fin de ubicarle en el modelo más próximo a su pensamiento.

### Criterios utilizados en la clasificación de los alumnos respecto a RQ y T.

<b>1.-Reacción Química</b>	(i) 3 o más respuestas RQ + otras (ii) 2 o más respuestas RQ + otras que son sólo X
<b>2.- Intermedios</b>	(i) 2RQ + algún T (ii) algún RQ + algún X+ algún T (iii) 3 o más X
<b>3.-Transmutación</b>	(i) Todos T (3T o 4T o 5T) (ii) mezcla de T y X (3T+1X, 4T+1X, 2T+2X)
<b>4.- Otros</b>	(i) 2 explicaciones o menos (ii) respuestas fundamentalmente descriptivas.

Los siguientes ejemplos ilustran cómo funciona esta categorización

#### (A) Ejemplo de las respuestas de un *estudiante RQ*

**P1(a):** Cuando una sustancia que es inflamable es sometida a alta temperatura con algún oxígeno presente, la sustancia entra en llamas y arde. Tres cosas son necesarias para producir llama: oxígeno, combustible y calor (RQ).

**P1 (b):** Reacciona con el oxígeno in el aire para dar llamas y mucho calor (RQ)

**P5:** El oxígeno se mezcla con la madera para formar un óxido.

**P6(a):** la cera de la vela se hace más pequeña o se ha ido como liquido arriba del recipiente. Ha ardido (X)

**P6 (b+c)** Todo el oxígeno ha sido consumido y esto produce un ligero vacío. Se ha formado algo pero no se qué es (X)

**P7:** calor y oxígeno (T)

**P (9):** la opción C con la siguiente explicación: el oxígeno ha reaccionado con el magnesio para formar un compuesto llamado óxido de magnesio; porque ambos pesos se han sumado, ha aumentado el peso.

(B) Ejemplo de las respuestas de un *estudiante X*

**P (1a):** la palabra arder significa para mí que cuando una sustancia material es encendida mediante fuego. La sustancia se consume quedando cenizas (T)

**P1 (b):** cuando una sustancia arde reduce su tamaño, a veces libera gases. Los restos son cenizas blancas o negras (T)

**P (5):** Cuando arde madera se produce humos (T)

**P6(a):** la cera de la vela se ha fundido (M)

**P6 (b+c):** el aire o el oxígeno del recipiente ha sido consumido por la llama y creo, no estoy seguro, que se ha producido un gas, puede ser dióxido de carbono (X)

**P (7):** la llama está hecha de fuego, el cual está hecho de calor, oxígeno y combustible (X)

**P (9):** se elige la opción c) y explica: porque creo que es así (RQ)

(C) Ejemplo de las respuestas de un *estudiante T*

**P (1a):** por arder entiendo que algo queda destrozado por un calor intenso.

**P (1b):** se ennegrece, se destroza y funde (T)

**P (5):** Si, humos y calor. Si quemas madera puedes cocinar sobre ella. (T)

**P6 (a):** algo de la cera funde y otro poco es expulsado como humo (T)

**P6 (b+c):** La llama lo ha usado para mantenerse viva. No se, si no lo puedo ver (T)

**P7:** fuego (incodificable)

**P9:** Opción b con la siguiente explicación: lo sospecho (M)

Aplicando estos criterios se han formado cuatro *grupos de alumnos*:

1. los que usan RQ habitualmente
2. los que están entre RQ y T
3. los que usan T habitualmente
4. otros

La distribución de alumnos en estos cuatro grupos se puede ver en la tabla 2.

**Tabla 2.-** Distribución de alumnos del total de la muestra en categorías

Tipología de alumno	UK (%) (n = 149)	España (%) (n = 150)
Reacción química (RQ)	4,7	0,7
Transición (X)	30,9	32,0
Transmutación (T)	38,9	56,7
Otros (fundamentalmente descripciones)	25,5	10,7
Total	100,0	100,0

En esta tabla se puede apreciar que:

1. La mayor parte de los alumnos son transmutadores,
2. muy pocos son RQ y una proporción considerable se encuentran en un camino de transición entre T y RQ.
3. Una proporción considerable no llegan a articular ninguna explicación en sus respuestas o las dejan en blanco.

Se puede ver de la tabla 2 que hay más estudiantes españoles en la categoría T y en la X, mientras que hay más estudiantes ingleses en la RQ y en la categoría 'otros'. Estas diferencias son significativas estadísticamente al nivel 0,001 (chi cuadrado = 19,298 para tres grados de libertad).

### *¿Progresan los alumnos como se muestra en la figura 1?*

En la figura 1 (Prieto, Watson y Dillon, 1992) se representa la hipótesis de que la comprensión de los estudiantes pudiera progresar en dos dimensiones: la primera, aprendiendo a diferenciar qué procesos implican cambios temporales (M) y cambios permanentes (RQ, T, X) y la segunda profundizando en la naturaleza del cambio permanente.

Se han comparado los alumnos en función del uso que hacen de las categorías RQ, T Y M. Los datos están recogidos en la tabla 3.

**Tabla 3.-** Relación entre RQ, T y M

Tipología	Modificad. altos	Modificad. bajos	Total
RQ o X	8 (13,8)	75 (69,2)	83
T	33 (27,2)	130 (135,8)	163
Total	41	205	246

En esta tabla de contingencia, RQ y X se han sumado para formar un grupo de alumnos con alguna comprensión de lo que es una reacción química frente a los alumnos 'transmutadores'. De la misma manera, los alumnos 'modificadores' se han dividido en dos grupos:

1. Modificadores bajos: que han codificado como modificación una vez o ninguna.
2. Modificadores altos: que han codificado como modificación dos o más veces.
3. Los alumnos cuyas respuestas eran puramente descriptivas o incodificables no se han incluido en esta tabla.

Aunque las diferencias no son altamente significativas a nivel estadístico, si permiten apreciar que los alumnos con mayor conocimiento científico utilizan menos la explicación modificación que los alumnos transmutadores. No obstante, 8 alumnos con una aceptable idea de lo que es la combustión fallan en reconocer ciertos casos del mismo fenómeno.

Por otra parte, muchos de los alumnos que son capaces de reconocer esos fenómenos como cambios de naturaleza permanente, fallan en entender la naturaleza de ese cambio.

### ***¿Influye el trabajo práctico en las concepciones de los alumnos sobre la combustión?***

Una vez alcanzado este nivel en el análisis, nos resultó interesante indagar sobre el impacto que la experiencia con un amplio rango de fenómenos relativos a la combustión puede tener en la comprensión de los alumnos.

En la bibliografía encontramos diferentes informes en los que se reporta que los estilos de enseñanza y aprendizaje en las clases de ciencias son significativamente diferentes en UK y España (por ejemplo, el de Martín-Díaz y Cañas-Cortazar (1992) y el nuestro Watson y Prieto (1994).

En aquel estudio, los profesores ingleses reconocían dedicar el 59% de su tiempo a trabajo práctico (entre 40 y 80 según lo publicado por Beatty y Woolnough, 1982), frente al 31% que dedicaban sus

colegas españoles (25% según lo publicado por Martín-Díaz et al. 1982). Asimismo, se recogían los datos siguientes:

Estilos de enseñanza aprendizaje	% de profesores que reconocen usarlos con frecuencia	
	UK	ESPAÑA
Explicaciones magistrales del profesor	13	33
Dialogo entre el profesor y toda la clase (preguntas y respuestas)	59	87
Demostraciones prácticas del profesor	23	41
Trabajo práctico de los alumnos siguiendo un guión	70	39
Trabajo práctico de los alumnos siguiendo explicaciones del profesor	72	41
Trabajo práctico en los que los alumnos diseñan sus propios experimentos	49	17
Trabajo práctico de los alumnos en forma de pequeñas investigaciones para resolver problemas	62	33
Trabajo práctico de los alumnos en el contexto de largas investigaciones para resolver problemas	28	4
Trabajo teórico de los alumnos siguiendo un guión	31	30
Los alumnos resuelven problemas teóricos	34	65
Los alumnos discuten en pequeños grupos	43	63
Los alumnos hacen posters para informar de experimentos, proyectos...	34	15
Los alumnos exponen oralmente informando al resto de la clase	33	46

Asumimos, por tanto, que los estudiantes de ambos países han sido expuestos a diferentes estilos de enseñanza-aprendizaje, y nos parece interesante comparar la categorización de los alumnos con la mayor o menor experiencia práctica que tienen, para ver si ésta tiene efectos perceptibles y significativos en su comprensión conceptual.

Se añadió al estudio un nuevo componente: una descripción de los trabajos prácticos relacionados con la combustión que los estudiantes han realizado. A los profesores de los estudiantes que respondieron el cuestionario se les realizaron entrevistas con el fin de obtener una descripción más detallada del tipo de actividades realizadas por los alumnos en el estudio de la combustión.

Las entrevistas se centraron en:

a) La experiencia práctica que los estudiantes han tenido sobre:

- ejemplos específicos de combustión utilizados en el cuestionario.
- 1. calentamiento de diferentes sustancias incluidos metales; y si han experimentado los cambios en peso y los gases producidos.
- 2. preparación de gases y en la identificación de gases diferentes.
- 3. medida de los cambios de volumen en gases en reacciones químicas.
- 4. electrólisis de diferentes sustancias.

b) La extensión en la cual los profesores utilizan prácticas implicando a todos los alumnos, demostraciones del profesor y clases no prácticas. La tabla 4 recoge los principales resultados sobre la enseñanza de la combustión en ambos países según las entrevistas.

**Tabla 4.** Trabajo práctico en la enseñanza de la combustión

Actividades Prácticas	UK	España
Porcentaje de trabajo práctico	Sobre 70%, incluyendo demostraciones ocasionales del profesor	Sobre el 25%, con un cuarto de demostraciones del profesor
Efecto del calor en las sustancias	Estudiado de manera práctica	Estudiado de manera práctica y teórica al 50%
Identificación de gases	Los alumnos han identificado una serie de gases incluidos el dióxido de carbono y el oxígeno en una variedad de situaciones diferentes, tales como <ul style="list-style-type: none"><li>- descomposición de sólidos por el calor, y</li><li>- preparación y propiedades de los gases.</li></ul>	Es altamente inusual que los alumnos lleven a cabo actividades implicando gases.

Cambios de volumen en reacciones químicas	Los estudiantes han observado demostraciones del cambio en el volumen de aire durante la combustión de cobre y otras diferentes sustancias.	Los alumnos no han estudiado de manera práctica estos cambios de volumen. Un tercio los ha estudiado de manera teórica y han realizado cálculos cuantitativos con ecuaciones químicas.
Cambios en el peso en reacciones químicas	Tres cuartos de los alumnos han investigado los cambios en el peso debidos a lo que ocurre cuando se calientan una serie de sustancias y reaccionan con gases	Los alumnos no han estudiado los cambios de peso debidos a calentamientos en presencia de gases.
Efecto del calor en los metales	Los estudiantes han calentado un rango de metales en aire o en oxígeno y han visto demostraciones de metales más reactivos y metales menos reactivos.	No ha sido estudiado por la mayoría, un tercio ha quemado hierro en aire.
Ejemplos utilizados en el cuestionario	Los estudiantes han realizado prácticas en la escuela de todos ellos.	Ninguno tiene experiencia práctica de la combustión de magnesio, y un tercio la tienen de la combustión de madera y de vela en el laboratorio.

A la vista de la Tabla anterior queda claro que la aproximación en UK es mucho más práctica que la de España, y aporta a los alumnos experiencias en aspectos de las reacciones químicas que no son perceptibles en la vida diaria, tales como la implicación de los gases en los cambios de peso y volumen en las reacciones y un rango más amplio de sustancias en combustión.

Respecto a los datos del cuestionario, nos hemos centrado en aquellos aspectos del conocimiento de los estudiantes que, presumiblemente, son susceptibles de ser influidos por la cantidad de actividad práctica realizada. Estos son:

- 1.- Tipos de sustancias que los estudiantes consideran que arden o que no arden.
- 2.- Percepciones sobre el papel del oxígeno o del aire en la combustión.
- 3.- Percepciones sobre la naturaleza de los productos de la combustión.

Para ello se han analizado las diferencias de las repuestas de los estudiantes con respecto a:

- a) Los ejemplos dados sobre sustancias que pueden y que no pueden arder (preguntas 2 y 3)
- b) La comprensión del papel del oxígeno/aire en el proceso (preguntas 1, 6b, 7, 8 y 9)
- c) Las menciones a productos invisibles en la combustión (preguntas 1, 5 y 6c).

### ***a) Ejemplos de sustancias que pueden y no pueden arder***

Los ejemplos aportados por los alumnos de sustancias que pueden arder son mayoritariamente de sólidos (99,5% en España y 96,7% en UK), y los ejemplos más comunes: madera y papel, que constituyen prototipos, según Driver (1985), de la combustión basada en observaciones cotidianas, donde:

- 1.- Las cosas se ponen rojas y aparece una llama
- 2.- El oxígeno o el aire son necesarios y se consumen en el proceso pero su función no queda clara.
- 3.- Las cosas se quedan más ligeras cuando arden.
- 4.- En el proceso se desprende humo o partes del material que arde van con el humo.
- 5.- Residuos sólidos o cenizas son la parte incombustible, y quedan como restos de color gris o negro y en forma de polvo o amorfa.

### ***Metales***

Los metales no se ajustan al prototipo T de la madera, y ganan peso en la combustión. Los metales fueron mencionados con diferente extensión: 3,3% de ejemplos en UK y sólo 0,4% en España.

El esquema contrario aparece en los ejemplos de sustancias que no pueden arder. 18,9% de los ingleses citan a metales frente a 34,4% de los españoles.

### ***Gases***

También existe diferente protagonismo de sustancias en estado gaseoso. En UK, 12% de los ejemplos de sustancias combustibles y 4,4 de no combustibles son gases frente a 2,7 % y 2,6% respectivamente en España.

### *b) El papel del oxígeno/ aire en la combustión*

En estas comparaciones se han utilizado las respuestas a las preguntas 1, 6b, 7, 8 y 9 respectivamente. Las diferencias entre los grupos de cada país en sus respuestas a la pregunta 9 son grandes. En la tabla 5 se recogen y se comparan los resultados.

**Tabla 5.** Respuestas para metal + aire

Respuesta a la pregunta 9	España (n = 150) %	UK (n = 149) %
A	9	9
B	18	14
C	15	26
D	9	2
E	41	21
No responde	7	27
Total	100	100

Más estudiantes ingleses que españoles escogen la respuesta correcta. Por otra parte, más estudiantes ingleses que españoles no responden. Es interesante el contenido de las explicaciones a la opción e) dada por unos y otros, tabla 6.

**Tabla 6.-** Explicaciones para la opción (e)

Explicaciones	UK (n = 30)	España (n = 64)
Cuando las cosas arden pierden peso o se quedan igual	43%	64%
Se pierden gases durante la combustión, por tanto las cosas se vuelven más ligeras	33%	3%
Los productos pesan menos porque aunque es la misma sustancia, está en forma diferente	10%	13%
El aire o el oxígeno no pesan, o tienen peso negativo	7%	9%
No explican	7%	2%
Otros	0%	9%
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>

Aunque todos los alumnos que escogen la opción e) elijan una respuesta incorrecta (codificada como T), las explicaciones difieren también entre los alumnos ingleses y españoles. Entre los alumnos españoles es más frecuente la idea de que la combustión implica una pérdida de peso o como mucho una conservación

(coherente con la poca alusión a los gases) mientras que en los estudiantes ingleses predomina la idea de que con la combustión la sustancia pierde gases (de ahí los productos gaseosos), con lo cual pierde peso o se queda como estaba según el peso que asignen a los gases.

En suma, las respuestas españolas se asimilan al prototipo de la concepción alternativa T debida a observaciones cotidianas, mientras las respuestas inglesas pueden derivarse de una errónea comprensión de la idea recibida en la enseñanza.

Esta primera comparación fue seguida del examen de las respuestas a las preguntas 1, 7 y 8, para ver si los alumnos mencionan el oxígeno del aire cuando describen la combustión (pregunta 1), como sustancia presente en la llama (pregunta 7) o como sustancia que es preciso extraer si se desea apagar el fuego (pregunta 8). Los resultados se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7.- Oxígeno o aire como requerimiento de la combustión**

Categorías	UK (%)	España (%)
P1. Total de aire u oxígeno necesarios	13,4	5,3
P7. Total de menciones al oxígeno o al aire	27,5	17,3
P8. Total de menciones al oxígeno o al aire	67,8	44,0

Se puede ver que los estudiantes ingleses mencionan más el oxígeno que los estudiantes españoles en todos los casos. Para explorar si existe asociación entre la comprensión de la combustión y la mención al oxígeno/aire, se han construido tablas de contingencia en las cuales, los estudiantes, clasificados como RQ, X o T, (tabla 2) fueron comparados con sus menciones al oxígeno o al aire en las anteriores preguntas.

Los valores de chi cuadrado no son significativos al nivel 0,05. Así que la relación, si existe, es una relación débil. En el análisis de las respuestas a la pregunta 6(b) se aprecia que las respuestas son similares en los alumnos de ambos países excepto en un aspecto: el referirse al aire o al oxígeno del aire interaccionando con algo.

La mayor parte de los estudiantes (77,9% en UK y 72,7% en España) describen al oxígeno o al aire como algo que es utilizado en el proceso y se consume, resultando en una desaparición, agotamiento, evaporado o quemado. Sólo 8,1% de ingleses y 10,7%

de españoles aluden a la presencia de ese aire u oxígeno en los productos, por lo tanto, no se puede saber si los alumnos piensan que deja de existir o que se transforma en otra cosa. El 29,5% de los alumnos ingleses mencionaron la interacción del oxígeno con algo, frente a sólo el 5,4% de españoles. El 16,8% de los ingleses mencionaron la interacción del oxígeno con la vela, frente a un solo alumno español.

Estas diferencias son significativas desde el punto de vista estadístico. Así, la tabla que representa la nacionalidad frente a estas menciones de los alumnos da un chi cuadrado de 48,98, significativo al nivel de 0,001. Se puede concluir, por tanto, que la mayoría de los estudiantes reconoce que el oxígeno del aire está implicado en el proceso, pero que los ingleses saben en mayor medida cual es su verdadero papel.

En orden a saber si los alumnos que reconocen la interacción del oxígeno/aire tienen una mayor comprensión del proceso de combustión, se ha calculado la chi cuadrado de la tabla que representa la alusión a la interacción con la clasificación del alumno en RQ, X o T. (de los datos de la tabla 2). Los resultados no poseen significatividad estadística, pero la tendencia muestra que hay más estudiantes con buenas explicaciones del proceso entre los que reconocen la interacción que entre los que no la reconocen.

### ***c) Menciones a productos invisibles***

En este apartado se examinan las respuestas a las preguntas 1, 5 y 6(c) con el fin de buscar diferencias entre los alumnos ingleses y españoles respecto a la conciencia que tienen sobre productos de reacción en estado gaseoso. En 6(c) se preguntaba si en la combustión de una vela se forma algo que no puedas ver.

Las respuestas han sido divididas en cinco categorías:

1. Sí
2. No sé
3. No
4. Otros
5. No responde

Una respuesta ha sido categorizada como "sí" si el estudiante dice "sí" o aporta un ejemplo de un producto, incluso si el producto puede ser percibido, tal como humo, llama o calor. Es decir, se han aceptado los criterios de los alumnos sobre lo que se puede y lo que

no se puede ver. Los códigos "no", "no sé" o en blanco reflejan exactamente lo que los alumnos dicen o no dicen.

La categoría "otros" solo afecta a los alumnos españoles, que ante la pregunta ¿se ha producido algo que no puedas ver" han aludido al proceso en lugar de a los productos, y dan respuestas del tipo: "el oxígeno se ha consumido y la llama se ha apagado" similares a las del apartado 6(b). Los resultados se reflejan en la tabla 8

**Tabla 8:** ¿se forma algo que no puedas ver?

Respuestas a la pregunta 6c)	UK (%) (n = 149)	España (%) (n = 150)
Si	70,5	38,7
No se	4,0	13,3
No	9,4	23,3
Otros	0,0	20,7
No responde	16,0	6,0
Total	100,0	100

La 8 es una tabla con las variables país, por un lado, y las categorías: "sí", "no", "no se" y "otros", da un valor de chi cuadrado de 27,29 con tres grados de libertad, lo cual es significativo al nivel de 0,001. Es decir, las respuestas de ambos grupos son claramente diferentes. Existen diferencias significativas entre las respuestas de los alumnos de uno y otro país, y se muestra claramente que los alumnos ingleses reconocen en mayor medida la existencia de productos gaseosos en la reacción.

Las respuestas a las preguntas 1, 5 y 6(c) han sido examinadas conjuntamente para ver todas las menciones a productos realmente invisibles (aquí no se han tenido en cuenta alusiones a humos, olores... fácilmente perceptibles). Los resultados se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9.** Productos invisibles gaseosos mencionados

Pregunta	Producto gaseoso	UK (%) (n = 149)	España (%) (n = 150)
1	Gas/gases	12,1	1,3
1	Dióxido de carbono	3,4	0,7
5	Gas/gases	9,4	1,3
5	Dióxido de carbono	22,1	0,0
5	agua	0,7	0,0
6(c)	Gas/gases	17,4	6,7
6(c)	Dióxido de carbono	64,4	10,0
6(c)	Agua	3,4	0,0
6(c)	Otros	4,0	2,7

Otra vez, los alumnos ingleses mencionan mucho más a los productos gaseosos que los alumnos españoles, especialmente el dióxido de carbono. Esto significa una mayor asimilación de este importante aspecto por parte de los alumnos ingleses.

Sin embargo, la comparación de la comprensión de los alumnos RQ, X y T con la mención de gas o gases aporta un chi cuadrado que no tiene significatividad estadística al nivel 0,05, necesario para afirmar que existen diferencias significativas. Esto nos dice que la mayor conciencia de los alumnos ingleses sobre la producción de gases no va acompañada de un aumento significativo de la comprensión sobre la naturaleza del proceso de la combustión como reacción química.

### *Consideraciones finales*

Todos estos datos ponen de manifiesto la gran influencia de los ejemplos de combustión que los alumnos experimentan en su vida diaria ejerce presión en muchos sentidos.

El trabajo de laboratorio tiene impacto en la comprensión conceptual de los estudiantes ingleses, pero no en la medida que se espera.

El enfoque inglés aporta experiencia de primera mano en aspectos de la combustión que son clave para la comprensión y que no aparecen en el prototipo de las observaciones cotidianas: reconocer gases, recogerlos, probar que son diferentes, pesarlos, pesar sólidos que ganan peso al reaccionar con gases...

Estos elementos son extremadamente importantes como experiencia, y los alumnos ingleses la tienen. Sin embargo, no parecen tener el impacto esperado en la comprensión de la combustión que tienen estos alumnos. Es decir, en la enseñanza se pone énfasis en aspectos importantes que los alumnos realmente aprenden, pero que luego no ponen en juego a la hora de elaborar su comprensión conceptual sobre el fenómeno. Así, los alumnos pueden saber ajustar reacciones y resolver problemas cuantitativos, pero siguen sin comprender o sin saber explicar el proceso.

Nuestros datos muestran claramente la utilidad del trabajo práctico para extender la descripción de la combustión por parte de

los alumnos, pero gran cantidad de estos alumnos no atraviesan la barrera del cambio de modelo explicativo.

Quizás una de las causas de estos resultados es la falta de actividad mental necesaria para juntar y relacionar de manera significativa toda la información recogida sobre la combustión. En este sentido, autores como Howe y Tompsen (1989) sugieren la importancia de la meta-cognición en el aprendizaje de las ciencias y, específicamente sobre el trabajo práctico, Gunstone (1991) afirma:

*...para que el trabajo práctico tenga un efecto relevante en la construcción de significados a base de establecer relaciones entre conceptos es preciso que los estudiantes inviertan más tiempo en interaccionar con sus ideas y menos en interaccionar con aparatos.*

## Referencias

- ANDERSSON, B. R. (1986). Pupils' explanations of some aspects of chemical reactions. *Science Education* 70, (5) 549 - 563.
- ANDERSSON, B. R. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16) *Studies in Science Education* 18, 53 - 85.
- BOUJAOUDE, S. B. (1991). A study of the nature of students' understandings about the concept of burning *Journal of Research in Science Teaching*, 28, (8) 689 - 704.
- DRIVER, R. (1985). Beyond Appearance: The conservation of matter under chemical and physical transformations. In: Driver, R., Guesne, E., Tiberghien, A. (Ed.): *Children's ideas in science*. 145 - 169.
- DRIVER, R., CHILD, D., GOTT, R., HEAD, J., JOHNSON, S., WORSLEY, C. y WILEY, F. (1984). *Science in schools: age 15*, Research report nº. 2, APU, Dept. of Education & Science, London.
- GUNSTONE, R. F. (1991). Reconstructing theory from practical experience. En B. Woolnough (Ed.). *Practical science* (pp. 67-77). Milton Keynes: Open University Press.
- HODSON, D. (1992). Redefining and reorienting practical work in school science. *School Science Review*, 73, 65-78.
- HOWE, A. C. y TOMPSEN, P. (1989). Overview of the seminar. En P. Adey (Ed.). *Adolescent development and school science* (pp. 5-10). London. The Falmer Press.
- MARTÍN DÍAZ, M. J. y CAÑAS CORTAZAR, A. (1992). Chemistry teaching in Spain. *Education in Chemistry*, 29(3), 73-76.

- MEHEUT, M. (1982). Combustion et reaction chimique dans enseignement destine a des eleves de sixieme, These doctorat de troisieme cycle, Universite de Paris.
- MEHEUT, M, SALTIEL, E. y TIBERGHIE, A. (1985). Pupils' (11 - 12 year olds) conceptions of combustion. *European Journal of Science Education*, 7, 83 - 93.
- PRIETO, T. y WATSON, R. (1994). Estilos de enseñanza de las ciencias más utilizados en la enseñanza secundaria en España y en Inglaterra. *Revista de Educación. MEC.* 305, 281-296.
- PRIETO, T., WATSON, R. y DILLON, J. (1992). Students' understanding of combustion. *Research in Science Education*, 22, 331-340.
- WATSON, R. Y PRIETO, T. (1994). Secondary Science in England and Spain. *Education in Chemistry*, 40-41.
- WATSON, R., PRIETO, T. y DILLON, J. (1995). The effect of practical work on students' understanding of combustion. *Journal of Research in Science Teaching*. 12(5), 487-502.
- WATSON, R., PRIETO, T. y DILLON, J. (1997). Consistency of students' explanations about combustion. *Science Education*. 81, 425-444.
- WHITE, R. Y GUNSTONE, R. (1992). *Probing understanding*. London. The Falmer Press.
- WOOLNOUGH, B. Y ALLSOP, T. (1985). *Practical work in science*. Cambridge. Cambridge University Press.

## APÉNDICE

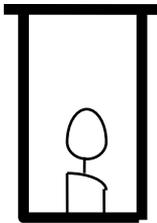
### CUESTIONARIO

1. a) Por favor explica, con tus propias palabras, qué entiendes por "arder".  
b) ¿Qué le pasa a una sustancia cuando arde?
- 2.- Por favor, escribe cinco o más ejemplos de sustancias que pueden arder.
- 3.- Por favor, escribe cinco o más ejemplos de sustancias que no pueden arder.
- 4.- ¿Por qué crees que unas sustancias pueden arder y otras no pueden?
- 5.- Cuando se quema madera, ¿se obtiene algo?

Si  
No  
No se


Por favor, explica tu respuesta

- 6.- La vela encendida en este recipiente se apaga pocos segundos después de taparlo



- a) ¿Qué crees que le ha ocurrido a la cera de la vela?
- b) ¿Qué le ha ocurrido al aire del recipiente?
- c) ¿Se ha producido algo que no puedas ver?

Por favor, explica tu respuesta

- 7.- Cuando arde una cerilla puedes ver una llama. ¿De qué crees que está formada?
- 8.- Por favor, aporta dos maneras en las que apagarías un trozo de papel que está ardiendo y explica como funcionan.

Primera  
Explicación  
Segunda  
Explicación

9. Un estudiante calentó 6 g de cinta de magnesio en un crisol y lo quemó hasta que se formó un polvo blanco. Al final del experimento, el estudiante pesó el magnesio quemado y encontró que pesaba 10 g.

¿Por qué aumentó el peso?

- a) El oxígeno del aire se mezcló con el magnesio y por eso aumentó el peso
- b) El magnesio se expansionó al calentarse y por eso aumentó el peso
- c) El magnesio reaccionó con el oxígeno del aire y por eso aumentó el peso
- d) El magnesio ganó calor de la llama por eso aumentó el peso
- e) El resultado es imposible. El peso no pudo aumentar


Por favor, explica tu opción

## Capítulo 6

---

### *Actividad química escolar: modelización metacognitiva del cambio químico*

---

#### **Mercè Izquierdo**

Departament de didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals  
Universitat Autònoma de Barcelona  
merce.izquierdo@uab.cat

#### **Neus Sanmartí**

Departament de didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals  
Universitat Autònoma de Barcelona  
neus.sanmarti@uab.cat

#### **Josep Lluís Estaña**

Departament de didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals  
Universitat Autònoma de Barcelona  
jestana@xtec.cat

**SUMMARY.** *This chapter presents a new way to teach chemistry that takes distance both from a presentation of disconnected experiments and from showing chemistry as an collection of formulae that are supported in the atomic theory. We call this approach 'modelling of chemical change', because it intends that some changes, those that are more representative of school science, are reconstructed according to a 'disciplinary matrix' that establishes similarities between the different 'models' that are offered in class to understand chemical phenomena.*

*The history of chemistry offers episodes that illuminate what this process of modelling can be, thanks to which disconnected 'facts' constitute a network of meaningful relations. From this network, 'rules' are identified that guide the actions, ideas and languages with which we can intervene in a coherent way on phenomena. Due to this network of relations, chemical concepts have a practical and axiological meaning that should be kept in mind to carry out a genuine chemical activity at school.*

*In this proposal, we call 'Model of Chemical Change' a set of statements or rules of behaviour connected to chemical phenomena in which the students*

*can intervene and that permit them to represent particular 'chemical entities' with which to account for the changes that are being studied. A concrete didactical proposal is analysed, according to which chemical change is introduced basing on the carbonisation of wood.*

**RESUMEN.** *Se presenta una nueva manera de enseñar química, que se distancia tanto de una presentación de experimentos desconectados entre sí como de mostrarla como un conjunto de fórmulas que se fundamentan en la teoría atómica. Llamamos a este enfoque 'modelización de los cambios químicos' porque pretende que algunos de ellos, aquéllos que son más representativos de la ciencia escolar, sean reconstruidos según una 'matriz disciplinar' que va estableciendo similitudes entre los diferentes fenómenos químico en los cuales se interviene experimentalmente.*

*La historia de la química ofrece episodios que iluminan lo que puede llegar a ser este proceso de modelización, gracias al cual 'hechos' desconectados llegan a constituirse en una trama de relaciones con sentido, a partir de la cual se identifican 'reglas' que guían las acciones, las ideas y los lenguajes con los cuales se interviene de manera coherente en los fenómenos. Debido a esta trama de relaciones, los conceptos químicos tienen un significado práctico y axiológico que ha de ser tenido en cuenta para llevar a cabo una actividad química genuina en la escuela.*

*En esta propuesta se llama 'Modelo de Cambio Químico' a un conjunto de afirmaciones o reglas de comportamiento conectadas a fenómenos químicos en los que los alumnos pueden intervenir y que les permiten representarse determinadas 'entidades químicas' con las cuales dar razón de los cambios que se están estudiando. Se analiza una propuesta didáctica concreta según la cual se introduce el cambio químico a partir de la carbonización de la madera.*

## **1. Introducción**

La Química es al mismo tiempo una ciencia muy concreta y muy abstracta. Los fenómenos que estudia pueden ser espectaculares y motivadores, pero nunca son fáciles de caracterizar, ya que la relación entre lo que se observa y lo que hoy se sabe que sucede no es en ningún caso evidente. Además se habla de los cambios químicos con un lenguaje simbólico muy distinto del que conoce y utiliza el alumnado. Todo ello hace que sea bastante difícil enseñar química de manera significativa para los alumnos. (Solsona et al., 2003).

Habitualmente hay dos formas enfocar la enseñanza de la Química. Una de ellas consiste en presentar unos experimentos o una química cotidiana, que fácilmente se transforma en 'lecciones de cosas' que no van más allá de la anécdota y que, al no pretenderse

su fundamentación teórica, no permiten continuar avanzando. Cada 'lección' describe un nuevo fenómeno que no conecta con el anterior, lo que no posibilita que se vaya construyendo un modelo explicativo. Otra de las formas de enseñar química consiste en presentar la teoría atómica y las fórmulas, y 'organizar' con ellas un universo químico que los alumnos no consiguen relacionar con aquello que observan cotidianamente, con sus preguntas sobre el mundo que les rodea (Caamaño, 2001, 2003).

Concebir el aprendizaje de la Química como un proceso de modelización de los fenómenos implica un cambio substancial en la forma de enseñarla (Bennet et al., 2002). La Historia de la Química nos proporciona ideas que nos permiten plantear hipótesis sobre las condiciones que pueden favorecer que los jóvenes construyan el modelo 'Cambio Químico', que corresponde a lo que Kuhn llamó la 'matriz disciplinar' (Erduran, S., y Mortimer, E., en este mismo volumen). También se están abriendo nuevos caminos con las últimas innovaciones curriculares en la enseñanza de la química y, en especial, gracias a las aportaciones sobre los trabajos prácticos escolares y las simulaciones por ordenador que van siendo concebidas como modelización. Al mismo tiempo el análisis de las teorías de aprendizaje que destacan el papel de las interacciones sociales en dicho proceso de construcción del conocimiento y, muy especialmente, del lenguaje y de la autorregulación metacognitiva, posibilitan conceptualizar y aplicar nuevas formas de enseñanza (Jorba y Sanmartí, 1995).

En función de estos marcos teóricos de referencia, la modelización se concibe como un proceso que tiene lugar cuando los alumnos aprenden a 'dar sentido' a los hechos que observan, construyendo relaciones y explicaciones cada vez más complejas (Justi et al., 2002). Desde este punto de vista, llevar a cabo una *actividad científica escolar* es llevar adelante una actividad en la cual la experimentación, la modelización y la discusión 'reguladora' se entrecruzan para promover una reconstrucción racional de los fenómenos. A través de esta red de acciones y a partir de lo que dicen y hacen los alumnos, se ponen en juego distintos aspectos de los modelos que van generando –que, en conjunto, constituyen el Modelo de Cambio Químico<sup>4</sup> o, mejor, el Cambio Químico Modelo.

---

<sup>4</sup> El Modelo Cambio Químico funciona como una matriz abstracta en la cual van encajando los diferentes 'casos' que se estudian, formados por hechos, lenguajes e ideas

En este artículo justificaremos brevemente este enfoque de la enseñanza de la Química y analizaremos algunos ejemplos.

## 2. Componente práctico y axiológico de los conceptos químicos

La Historia de la Química nos puede ayudar a entender las características de la modelización del cambio químico, así como su importancia en la construcción de la Química como disciplina (Izquierdo, 2001). Con esta finalidad, vamos a analizar a continuación un pequeño extracto del libro *Tyrocinum Chemicum*, escrito por el farmacéutico instalado en París J. Béguin y traducido al francés con el nombre de "Elemens de Chimie" (1610).

El texto corresponde al apartado *Otra calcinación del antimonio, llamado 'polvos eméticos' o 'mercurio de vida'*. En este fragmento, que muestra la precisión del trabajo de Béguin, aparece la primera ecuación química de la historia: un proceso de laboratorio pasa a ser 'texto escrito' en el cual aparecen entidades que sólo sirven para razonar que *'no hay mercurio en los polvos eméticos y por lo tanto, no puede llamarse 'mercurio de vida'..... (Fig. 1)*

El proceso es el siguiente, en palabras de J. Béguin:

*" Toma cuatro onzas de antimonio en polvo & ocho onzas de mercurio sublimado, mézclalo todo & destíllalo en una retorta sobre un fuego de cenizas, adaptándole un recipiente medio lleno de agua, después aumenta gradualmente el fuego de cenizas, adaptándole un recipiente medio lleno de agua, después aumenta gradualmente el fuego y si el licor (que es como una goma o una manteca) queda pegado al cuello de la retorta, haz que resbale con una brasa; & cuando se encuentre con el agua, precipitará en forma de polvo blanco....Después de esto, ve dando poco a poco fuego de supresión (que se hace con brasas colocadas sobre arena o cenizas que cubren la retorta) hasta que el cinabrio sublimará en el cuello de la retorta...Después se hará digerir durante toda la noche el polvo precipitado hasta que quede sin acrimonia, lávalo con agua cordial y sécalo a fuego muy lento.....*

*...No puedo dejar de sorprenderme cuando muchos sabios, que demuestran no ser expertos, opinan que este polvo emético procede del mercurio sublimado y no del régulo de antimonio. Porque yo he demostrado a todo aquél que ha visitado mi pequeño laboratorio, fundamentándome en la experiencia (porque no admito ninguna otra razón, en nuestro arte) que el polvo emético no es más que el régulo de antimonio disuelto y calcinado por el espíritu vitriólico*

del sublimado...Yo digo que el espíritu vitriólico tiene una gran simpatía por los metales...Y como que el régulo de antimonio tiene más naturaleza metálica que el mercurio, al destilar el mercurio sublimado con el antimonio, el espíritu sublimado deja al mercurio y se une al régulo de antimonio. Y, sintiéndose presionado y desplazado por el calor del fuego, disuelve y calcina al régulo y pasa en forma de licor gomoso por el cuello de la retorta...En la retorta no queda más que el mercurio del sublimado y el azufre del antimonio: como que tienen una gran simpatía el uno por el otro, al calentarlos subliman conjuntamente en el cuello de la retorta formando cinabrio. Mi conclusión, a partir de estas experiencias infalibles, es que el polvo emético no es más que el régulo de antimonio calcinado por el espíritu vitriólico que hay en el sublimado.

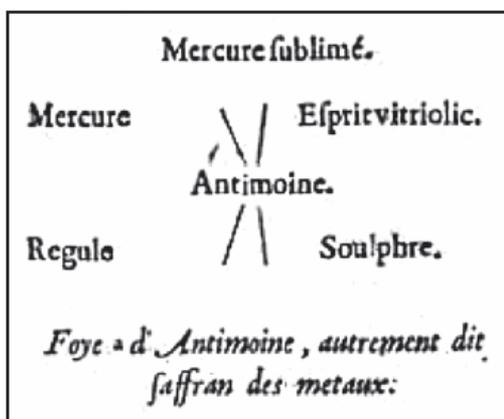


Fig. 1. Esquema de la argumentación de Béguin: la primera ecuación química de la historia

El esquema le sirve a Béguin para fundamentar de manera 'visible' su argumentación: no hay mercurio en el llamado mercurio de vida porque ha quedado unido al azufre en la retorta y por lo tanto, no puede estar en el producto que se destila. El esquema muestra al 'mercurio sublimado' como si estuviera formado por mercurio y un ácido; y al antimonio, como si estuviera formado por régulo de antimonio y azufre. Resulta evidente que, para Béguin, hay unas sustancias (el cinabrio, el mercurio sublimado, el antimonio, 'el polvo emético') que son más compuestas que otras, que son más simples (el mercurio, el azufre, el régulo de antimonio, el espíritu vitriólico). El esquema reconstruye el cambio químico como una interacción de *mixtos* (nuestras 'sustancias químicas') en la cual se reordena 'lo simple' que estaba en 'lo compuesto' y, así, permite llevar la cuenta de lo que hay y de lo que no hay en ellas (hay mercurio en el cinabrio

y, por lo tanto, no lo hay en el mercurio de vida... y se le ha de cambiar el nombre). No habla de transmutación, sino de una reordenación especial, que es *química*: cualquier químico sabe que los 'ingredientes simples' de las sustancias compuestas no están allí y puede comprender que el esquema sirve para llevar la cuenta de 'lo que tenemos' y para poder prever lo que se podrá obtener mediante cambios posteriores.

Esta explicación se genera en un momento histórico en el cual las propiedades de las sustancias se explican 'substancializándolas' según los 'principios' que supuestamente un cuerpo contiene (el mercurio filosófico era uno de ellos y proporcionaba volatilidad), pero al mismo tiempo se empieza a desarrollar la idea de que hay sustancias más 'compuestas' que otras, que son más 'elementales'. Béguin no confunde el mercurio-parte material de un mixto con el mercurio-propiedad, que no le interesa. Es decir, 've' el fenómeno desde la perspectiva de 'lo que hay antes' y 'lo que hay después' y se inventa una 'cosa' –¿que llegará a ser un elemento químico?– que se conserva, porque si no fuera así no se podría explicar el encadenamiento de cambios químicos. Además es muy fácil representarlo, dando un símbolo a esta 'cosa' que se conserva, y al mismo tiempo también es fácil imaginaria como un átomo irreductible...y así se van a ir desarrollando estas ideas a lo largo de la historia, por personas que hacen lo mismo que Béguin (obtener sustancias) y que piensan sobre la mejor manera de hacerlo y de explicar lo que pasa .

También de la misma manera, a partir de una práctica evaluable, muchos químicos del XVII y del XVIII, que disponían de laboratorios cada vez mejor equipados para obtener sustancias bien identificadas, desarrollaron nuevos criterios sobre la composición de las sustancias (lo simple, lo compuesto, lo 'mixto'), sobre el cambio (descomposición, composición, reordenamiento), y sobre su naturaleza y la de sus elementos. Empieza así una línea de trabajo, que ha sido llamada 'la tradición de las sustancias' (Gyung Kim, 1992) y que llega hasta nuestros días, siempre que 'se hace química' .

Los alumnos parten de una visión fundamentalmente substancializadora de las propiedades de los materiales (Sanmartí et al, 1995). Para superar este 'modelo' se necesita una nueva 'forma de mirar' los cambios químicos y una nueva forma de hablar sobre ellos (Nersessian, 1992). Observar e intervenir en la carbonización del azúcar y/o de la madera, desencadenar la reacción entre el azufre y el hierro u otros cambios químicos, lleva a los alumnos a imaginar explicaciones.

Entre ellas el profesorado privilegia las que aportan los puntos de vista científicos y pone en evidencia las ideas que se pueden comprobar o poner a discusión al realizar nuevas observaciones. Al mismo tiempo se generan formas de hablar sobre ellas o de representar gráficamente los cambios. Los nuevos modelos se han de poder aplicar a la interpretación de nuevos cambios químicos y, sin duda, habrán de evolucionar para que sean coherentes con lo observado.

Se trata pues de un proceso de práctica y de regulación constantes, que deben partir de la toma de conciencia (metacognición) por parte del propio alumno de los aspectos que no son coherentes en sus razonamientos, en su *modelo*...todo ello sin olvidar que cualquier proceso de cambio no es nunca totalmente racional.

En la disposición al cambio de ideas y en la aceptación de nuevos puntos de vista intervienen también factores de tipo emocional, por lo que es fundamental el clima creado en el aula que debe basarse en el convencimiento que el 'error' es algo totalmente normal en cualquier proceso de aprender y, al mismo tiempo, que todo el mundo puede aprender (Astolfi, 1999). Todo ello nos anima a plantear la enseñanza de la química también de manera práctica y axiológica, puesto que los conceptos químicos se forjaron para una práctica de la química que ha de poder ser evaluada.

### **3. La actividad química escolar: modelizar para poder controlar el cambio, tomar conciencia para controlar el aprendizaje**

Veremos a continuación una propuesta de 'química escolar' en la cual se intenta que la química que se aprende tenga como 'modelos' algunos fenómenos del mundo, aquellos que sean relevantes socialmente y significativos para los alumnos y alumnas y que pueden ser interpretados a partir de las reglas básicas de la química de las sustancias y de una incipiente teoría atómica química, que se irá desarrollando a medida que se vayan conociendo nuevos fenómenos químicos.

La reflexión sobre la historia de la química que se ha hecho en el apartado anterior nos permite ver que los 'modelos' para el conocimiento químico son los 'casos' que han de resolverse según la tradición de 'las sustancias' y no la teoría atómica desconectada de los fenómenos. Los átomos toman sentido en el esfuerzo por comprender cómo es posible que una sustancia sea substituida por otra; sólo entonces los átomos son 'químicos', como lo fueron los del

siglo XIX, cuando permitieron la emergencia de los conceptos químicos que ahora parecen derivarse de los átomos que físicos y químicos han ido construyendo a lo largo de este siglo XX.

Por ello, si los alumnos no perciben de antemano que hay algo complicado (el cambio químico) que corresponde a determinados fenómenos que se han de comprender, explicar la química como un baile de átomos no sirve de nada. El proceso de modelización química ha de contribuir a desarrollar las ideas de los alumnos sobre las partículas para hacerlas adecuadas para explicar los cambios químicos en los que se interviene; han de darse cuenta de que las partículas que se utilizan para explicar el cambio de estado de agregación no son las que se conservan en el cambio químico.

### *La ciencia (la química) escolar*

Las ciencias (la química) no pueden enseñarse desconectadas de la actividad científica gracias a la cual los fenómenos se controlan a la vez que se interpretan, porque esto conduciría al dogmatismo: parecería que el mundo es tal como dicen las ciencias, como si los científicos hubieran visto las entidades a las que se refieren al comunicar los resultados de sus investigaciones cuando, en realidad, las necesitan para explicar lo que sí han hecho y lo que sí han visto. Lo que da sentido a la actividad científica, a los experimentos de los que ésta se ocupa es una trama de ideas y de decisiones muy compleja, que se impulsa desde dentro de la matriz disciplinar y se concreta como Modelo Teórico. Por esto las prácticas de laboratorio en la escuela, diseñadas de manera demostrativa, no siempre tienen el éxito que se esperaría de ellas (Hodson, 1992; 1994).

Si la enseñanza ha de conducir a un aprendizaje significativo, también en la clase de ciencias debería producirse actividad científica que, en conjunto, dé sentido a los experimentos que se lleven a cabo (Hart, 2000). Esto va a ser posible si, en clase, se impulsa un proyecto que sea interesante para los alumnos y que permita que aprendan a intervenir racionalmente en los cambios: pensando sobre ellos mediante las entidades científicas y hablando de ellos mediante un lenguaje científico. Se desarrollan así todas las dimensiones cognitivas (Guidoni, 1985) y se genera Actividad Científica Escolar (ACE) (Izquierdo et al, 1999 a y 1999 b).

De esta manera el alumnado podrá elaborar una explicación científica del mundo como resultado de esta actividad, que no es sólo manipulativa sino que incluye la reflexión, el discurso y la valoración

de lo que se aprende; habrá 'modelizado los fenómenos' al haberlos transformado en ejemplos o MODELOS de Cambio Químico, que comparten afirmaciones que son válidas para todos los cambios químicos.

Nuestra aportación pretende aportar alguna orientación nueva respecto al proceso de 'modelización', aquél que transforma un 'hecho del mundo' en un 'hecho científico'; la diferencia entre ambos es el 'Modelo' que da sentido al primero y lo convierte en el segundo. El proceso de modelización ha de conseguir que gracias a una intervención diferente de la habitual, el enfoque inicial se transforme en otro más propio de un modelo científico. La didáctica de la física ha elaborado numerosos ejemplos de este proceso, pero no disponemos aún de suficientes ejemplos en química.

### ***Modelar los fenómenos***

Según Giere (1988) una teoría científica puede caracterizarse por el conjunto de sus modelos, que establecen relaciones de similitud con hechos del mundo mediante 'hipótesis teóricas'. Las hipótesis teóricas permiten experimentar, para ver si aciertan (si el hecho del mundo se comporta según el 'modelo') o no, y se pueden formular de la manera siguiente: 'Si este *esto* fuera tal *como dice el modelo*, al hacer *esto* pasaría *aquello*'

Todos los Modelos de una misma teoría científica comparten las mismas 'reglas del juego' (lo que se puede hacer y lo que no se puede hacer para contrastar las hipótesis), porque todos comparten una similar representación de lo que ocurre cuando se interviene en ellos.

La actividad científica de modelización en la escuela es más compleja, porque tiene dos dimensiones principales que se han de atender simultáneamente:

- la intervención en los fenómenos que van a ser científicos porque genera las preguntas que se van a poder responder mediante los modelos científicos que el profesor va a introducir;
- el desarrollo personal del alumno y la superación de sus problemas de aprendizaje.

Es decir, los alumnos y alumnas han de intervenir en fenómenos relevantes y plantearse preguntas sobre ellos, para llegar a comprender cómo funcionan mediante las ideas y conceptos de la química; y, a la vez, ha de aprender a identificar sus dudas y dificultades de aprendizaje y a superarlas. Debido a esto, la ciencia escolar se ha de planificar con mucho cuidado: no es la Ciencia de los Científicos la que decide sus contenidos, sino una reflexión propia de los profesores de ciencias que debe identificar qué cosas se van a poder aprender a partir de una determinada actividad científica escolar que sea factible.

Vamos a profundizar un poco más en cada una de las dos dimensiones de la actividad de modelización en clase.

*A. La intervención en los fenómenos ¿Cómo generar preguntas? ¡El cambio químico no es 'natural'!*

La primera cuestión que se ha de solucionar para poder diseñar la actividad química escolar es la falta de preguntas espontáneas sobre el cambio químico. Los alumnos aceptan que los cambios espectaculares (las explosiones, los cambios de color, los gases burbujeantes...) son 'cambios químicos'; si, a partir de ello y para explicar algo que no han preguntado, les cae encima un montón de información sobre átomos, moléculas, enlaces, símbolos y unas pocas prácticas de laboratorio realizadas deprisa y corriendo, poco es lo que pueden preguntar. Además, no caen en la cuenta de que los cambios en los organismos y en la naturaleza son 'químicos', sino que los consideran 'propios de la vida' y tampoco, en este caso, hay gran cosa que preguntar.

Sin preguntas 'que tiren del alumnado' no se puede generar una en la escuela una actividad científica (química) genuina.

Es necesario, por lo tanto, empezar por generar un espacio de reflexión a la medida del alumnado, presentando fenómenos sobre los cuales los alumnos y alumnas puedan preguntar, porque pueden intervenir en ellos (Flick, 1991); con ello, su atención podrá ser orientada por el profesorado hacia el control del cambio, tal como corresponde. Estos fenómenos no pueden ser los de un programa de química que pretenda definir las entidades químicas y sus relaciones, sino los de uno cuyo objetivo sea mostrar cómo es la intervención química en el mundo y cómo ésta se orienta y avanza gracias a determinadas ideas/entidades que van evolucionando y, algunas veces, concretándose en detalle. Es este proyecto de intervención el

que nos interesa, porque es el que ha generado los problemas y preguntas que han dado lugar a la ciencia química que forma parte de nuestra cultura y que, precisamente por esto, se enseña en las escuelas.

Los fenómenos adecuados para la ACE serán aquéllos que sean relevantes y que puedan dar lugar a una intervención lo más autónoma posible por parte de los alumnos. Han de ser suficientemente conocidos como para que la necesidad de intervención en ellos tenga sentido para los alumnos; se han de poder representar de manera abstracta, para relacionarlos con otros: un fenómeno 'único' no sirve para introducir entidades científicas, que se refieren siempre a *relaciones entre muchos fenómenos*. Estos 'fenómenos ejemplares' han de ser rastreados pacientemente en las diferentes disciplinas científicas para identificar los que son adecuados al contexto sociocultural del alumnado y les pueden resultar interesantes. No son los que parecen fáciles desde la química, que tradicionalmente empieza mostrando que no es lo mismo mezclar azufre y hierro que hacerlo reaccionar, aunque los alumnos nunca vayan a tener que hacer una cosa así en la vida cotidiana. Además, todos los fenómenos, una vez 'modelados', han de proporcionar un conjunto de 'ejemplos o modelos de cambio químico' (Estaña, 1996) que cubran los diferentes aspectos de la Teoría Química: de sus entidades, sus lenguajes, sus instrumentos y sus maneras de intervenir, puesto que nuestro objetivo docente es proporcionar una formación química básica a los alumnos.

Los proyectos de química más actuales ofrecen ya un amplio repertorio de fenómenos que pueden ser apropiados para la intervención química en ellos.

Podemos proponer ejemplos que proceden de la 'química cotidiana' ('carbonizar' los alimentos, la madera; cocinar con huevos; hacer jabón; controlar el agua de la piscina; cocer, controlando el fuego (freír, hervir, tostar, gratinar, rustir, asar, cocer a la brasa...); de la 'ciencia integrada' (organismos y salud, la función clorofílica, la respiración celular, la nutrición, los minerales y rocas, el control del suelo); de las nuevas propuestas que surgen de la creciente necesidad de relacionar la Ciencia, la Técnica y la Sociedad, de nuevos proyectos como Salters, Chemistry in Context, Chemistry in Community, etc. (Gómez Crespo et al., 2000; Caamaño, 1999; Grupo Salters, 1999) (problemas en el medio ambiente, como 'seguir la pista al mercurio, al plomo', el problema del dióxido de carbono y el calentamiento global, las combustiones, la corrosión,

las pilas; a química del agua: el control de la piscina, del agua del grifo; análisis del agua de los ríos, del mar)

Los fenómenos seleccionados han de poder ser enfocados de acuerdo a alguno de los aspectos del cambio químico, aquél que más fácilmente pueda ser sugerido a partir de una manipulación al alcance del alumnado, aquél que más fácilmente pueda ser representado mediante una analogía o una metáfora que permita orientar convenientemente la atención de los alumnos hacia preguntas productivas (que son aquéllas que los alumnos pueden llegar a responder si se les ayuda a fijarse en los aspectos más relevantes para desarrollar las 'buenas ideas' que orientaron la pregunta).

### *B. Controlar el aprendizaje. El lenguaje, como instrumento*

La actividad científica en la escuela tiene como finalidad 'aprender a razonar a la manera de los científicos' pero la evaluación forma parte de lo que 'tira del alumnado' en la escuela y le impulsa a actuar siguiendo las consignas del profesor. El proceso de modelización no va a funcionar si no va acompañado de un dispositivo didáctico que favorezca la expresión y la comunicación de las ideas: entre el profesor y el alumnado (en ambos sentidos: de profesor a alumno y de alumnos a profesor) y entre los alumnos; y, a la vez, que muestre las 'reglas del juego' de la ciencia escolar, que culmina con una evaluación de la misma valorando, precisamente, el diálogo y la participación. (Estaña et al, 2001).

Tal como se ha dicho, la actividad científica escolar va a tener éxito si la representación del mundo de los alumnos evoluciona hacia una que sea más científica. Van a tener que experimentar, puesto que los conceptos químicos son para intervenir en el mundo, para transformarlo y para controlar los fenómenos; pero lo que finalmente aprenderán será consecuencia de haber llegado a conectar la explicación del profesor y de los libros con lo que están haciendo. Por esto el discurso, y no la experimentación, es lo que impulsa el desarrollo de la actividad escolar y la hace avanzar. Por ello en la clase de ciencias se enseña a 'hablar y escribir ciencias'. Ha sido siempre así, pero en general se imponían en clase los términos científicos que los alumnos debían saber definir; la modelización, en cambio, requiere una interacción dialógica entre las ideas del alumnado y las del profesor/a (Mortimer y Scott, 2003) en la cual se vinculan las acciones, el pensamiento y el lenguaje, generando así un

ambiente adecuado para la curiosidad intelectual y para la emergencia de explicaciones significativas (Kuhn, 1993; Byrne et al., 1994).

#### 4. Un ejemplo: ¡Carbonizar no es quemar!

Presentamos a continuación un ejemplo que se ha desarrollado en una clase de segundo de ESO. El objetivo era iniciar el estudio de la química introduciendo la 'manera de mirar' que requiere compartir las afirmaciones propias de la TEORÍA 'CAMBIO QUÍMICO', que son las siguientes:

- Hay sustancias simples y compuestas que aparecen y desaparecen en el cambio químico
- Hay elementos que se conservan
- La materia y la energía se conservan

Se escogió como fenómeno la carbonización de la madera. Con ello aprovechamos experiencias que se habían realizado en cursos anteriores sobre carbonización del azúcar (Estaña, 1996; Estaña y Izquierdo, 2001). Este fenómeno presenta las siguientes características que lo hacen apropiado para nuestros objetivos:

- Ha dado lugar a una industria popular de mucha importancia en algunas regiones de Catalunya (obtener carbón).
- Resulta suficientemente familiar como para que todos los alumnos puedan opinar sobre él.
- Puede dar lugar a experimentos de clase: *destilar-carbonizar serrín*.
- Se puede relacionar con otros fenómenos: el pan que se nos 'quema' al intentar tostarlo, el azúcar que se carboniza si se calienta demasiado
- Se confunde con quemar y este malentendido debe aclararse.
- 'Carbonizar' y 'Quemar' son dos 'cambios químicos' diferentes que se han de llegar a relacionar y diferenciar.

*Descripción de la intervención docente*

Se desarrolló en doce sesiones a lo largo de un mes, en las que participaron tres profesores: el titular de la clase, una alumna de CAP y su tutora; y en sesiones de refuerzo intercaladas en la programación habitual del área de ciencias experimentales. Cinco de estas sesiones fueron registradas en video. Se siguió un 'ciclo de aprendizaje' en el que diferenciamos cuatro etapas: exploración, introducción de conceptos, estructuración y aplicación. Después de cada sesión, los alumnos explicaron lo que habían hecho en clase respondiendo las preguntas siguientes:

¿Qué tenemos? ¿Qué hacemos? ¿Qué pasa? ¿Por qué pasa?

Estas preguntas fueron siempre las mismas, pero las respuestas evolucionaron a lo largo de las sesiones.

Nuestro objetivo fue que la transformación de la celulosa en carbón llegase a ser un 'modelo' de la teoría "Cambio Químico".

- Al empezar, los alumnos leyeron un texto sobre 'Obtener carbón'; se les explicó como funciona una carbonera y se simuló el fenómeno en clase, quemando parcialmente un montón de palillos y calentando un poco de serrín envuelto en papel de aluminio que simula la carbonera.
- En la segunda sesión se discutió lo que ha pasado y, por escrito, los alumnos hablaron de las diferencias entre la madera que se había quemado y la que se había carbonizado. El profesor introdujo sus explicaciones e hizo una experiencia en la que mostró como controlar el fenómeno: la madera ardía si estaba en contacto con el oxígeno y en caso contrario se carbonizaba. Para empezar a pensar en lo que había pasado, calentó serrín en un tubo de ensayo y recogió los gases que se obtenían; una parte de ellos condensó en un líquido amarillo. Un alumno sugirió que era 'savia' y muchos alumnos hicieron suya esta idea. También se propuso pesar la madera antes y después de carbonizarla. Se plantearon preguntas para ser investigadas en la siguiente sesión: ¿Dónde está lo que se ha perdido? ¿Cuánto pesa? ¿Estaba antes, en la madera?
- En la tercera sesión los alumnos discutieron a partir de lo que habían escrito al intentar explicar lo que había pasado. Por grupos, propusieron un montaje para repetir la carbonización de manera más sistematizada y se decidió colectivamente cómo

proceder. Cada grupo tomó cantidades diferentes de serrín y pesó el tubo en el que lo calentaron. Se procuró que observaran la aparición de agua, gases y carbón que antes no estaban allí. Los alumnos lo explican sólo como destilación de sustancias que ya estaban antes, idea que se deberá ayudar a cambiar.

Por ejemplo, algunos alumnos insisten en la idea de que en la madera había savia, y que al calentarla se evapora y, al condensarse de nuevo, forma el líquido amarillo. Esta opinión se transforma en hipótesis: 'Si hubiera una mezcla de savia y celulosa se podrían separar calentando, pero después podríamos volver a tener la madera inicial uniendo de nuevo la savia y la celulosa'. Eso no es lo que ocurre, porque ya no se recupera de ninguna manera el serrín inicial.

- Se propone que los alumnos preparen una explicación lo más convincente posible utilizando las ideas nuevas que se han ido introduciendo en la discusión y reforzando la explicación mediante símbolos que les ayude a comprender que hay algo que no se puede ver pero que explica lo que pasa. Los profesores recuerdan de nuevo que "va de Química" y que "al final hay otras sustancias diferentes de las que formaban la madera, como por ejemplo el carbón, y que en esto consiste el cambio químico".
- En la cuarta sesión, extraordinariamente rica, los alumnos, por grupos, explican lo que ha pasado a partir de los textos que han redactado en casa. Utilizan símbolos (en actividades previas se había trabajado el modelo de partículas, ver Estaña et al. 2001) para mostrar como era antes la celulosa y lo que pasa al calentarla, similares a los que habían utilizado en una actividad anterior en la que explicaron la carbonización del azúcar. Se reconoce que el carbón es una sustancia más simple que la celulosa. Los profesores proponen, como tarea para el próximo día, la elaboración de maquetas que permitan explicar mejor sus ideas definitivas, después de haber reflexionado sobre todo lo que se ha ido diciendo y suponiendo que la madera está formada sólo por celulosa.
- En la quinta y última sesión los alumnos presentan sus maquetas, por grupos, y con ellas explican la carbonización de la madera al calentarla. También pudieron explicar la diferencia entre 'carbonizar' y 'quemar', teniendo en cuenta que en este segundo caso intervenía también el oxígeno. Los alumnos utilizaron los conceptos de sustancia simple y compuesta y de elemento y, en

general, se refirieron a las 'partículas que forman la madera', llegando a la conclusión de que algunas de ellas eran las mismas que formaban el carbón. Con todo, fue sorprendente la diversidad de maquetas y de recursos que utilizaron los diferentes grupos de alumnos; se pudo constatar también cómo incorporaron sugerencias de los profesores y de los compañeros.

Finalmente, se amplió el tema de discusión con otras reflexiones y preguntas, que dieron lugar a un debate muy animado. Algunas de ellas fueron:

*¿Cómo se sabe cuántos elementos hay? ¿Cómo se descubrió que el diamante y el carbón están hechos de carbono? ¿Por qué no se puede volver a tener celulosa a partir de los productos de la descomposición, si las plantas lo hacen? ¿Por qué no se puede hacer madera en el laboratorio? ¿Cómo se sabe cuántos átomos de cada elemento hay en las moléculas? ¿Qué es el fuego?*

Es evidente que no se pudieron responder todas estas preguntas, planteadas en una sesión abierta en la que la participaron la mayoría de alumnos; pero consideramos que fue importante que se llegaran a formular, puesto que orientaron a los estudiantes hacia temas que se van a estudiar más adelante.

Nos parece que se puede afirmar que al finalizar las sesiones los alumnos empezaron a comprender los problemas que plantea el CAMBIO QUÍMICO, que se puede hablar de él en términos de 'sustancias' y de 'elementos' y que va muy bien poderlo representar mediante partículas, aunque resulte difícil llegar a conocerlas bien. Esto es diferente a lo que ocurre en el planteamiento tradicional, según el cual se empieza por definir el cambio químico, diferenciándolo del físico, y por definir las entidades fundamentales (sustancias simples y compuestas, elementos, átomos, enlaces)

Las preguntas de evaluación que correspondan a una enseñanza de la química enfocada de esta manera han de referirse a la interpretación química de los fenómenos que han sido estudiados; no se pueden preguntar definiciones del libro o descripciones teóricas que no tienen sentido al margen de la intervención experimental.

### *La estructura del proceso de modelización*

A partir de ésta y otras experiencias de modelización (ver de nuevo Estaña y Izquierdo, 2001) podemos avanzar algunas características generales de este proceso, que deberán ser analizadas con más detenimiento a medida que se contrastan con nuevos ejemplos. En primer lugar describimos cómo se ha impulsado en este caso las diferentes etapas del proceso de aprendizaje según el cual planteamos las unidades didácticas:

<b>En general</b>	<b>En esta investigación</b>
<p><i>Exploración:</i></p> <p>Seleccionamos <i>fenómenos</i> que den lugar a <i>episodios</i> sobre los cuales los alumnos puedan opinar, en los cuales puedan intervenir con una cierta autonomía. En esta etapa <i>se les sugieren</i> preguntas que les inciten a actuar y a pensar.</p> <p>Los 'episodios' ya tienen significado para los alumnos, sea en un 'modelo científico escolar previo', sea en un modelo generado en el contexto cotidiano.</p>	<p><i>Exploración:</i></p> <p>El fenómeno seleccionado es <i>la carbonización de algunos materiales cuando se les calienta sin que lleguen a arder</i>. El episodio es <i>'vamos a calentar madera hasta que se convierta en carbón. Una parte de la madera arde, pero hemos de conseguir que la otra parte se carbonice'</i>.</p> <p>Los alumnos conocen el 'Modelo de Partículas' aplicado a los cambios de estado.</p> <p>Sus ideas iniciales, expresadas en el lenguaje común, son que <i>'el fuego ha consumido una parte de la madera' y ha dejado el carbón</i>. No utilizan el modelo de partículas en sus explicaciones. Nos proponemos ayudar a reformular el significado científico de dicha expresión cotidiana.</p>

<i>En general</i>	<i>En esta investigación</i>
<p data-bbox="157 187 330 211"><i>Estructuración</i></p> <p data-bbox="157 246 611 677">Se propone un nuevo experimento, más controlado, con lo cual las preguntas se convierten en hipótesis teóricas que se han de comprobar. Se proponen montajes. Se introducen las entidades químicas apropiadas. Se reflexiona sobre qué razones justifican que el cambio que se ha producido es un CAMBIO QUÍMICO. Se desarrolla el modelo de partículas. Se impulsa la explicación de lo que pasa mediante maquetas, dibujos o esquemas, para hacer ver lo que no se ve, pero que sirve para explicar y para volver a intervenir.</p>	<p data-bbox="624 187 797 211"><i>Estructuración</i></p> <p data-bbox="624 246 1070 1142">Se repite el fenómeno, con un montaje adecuado para poder recoger los gases que se desprenden. Se desarrollan las hipótesis teóricas y se llega a la conclusión de que no se ha producido una separación de sustancias, sino un cambio químico; a la vez, se escribe sobre ello y se representa mediante símbolos. Los alumnos han construido 'maquetas' para representar lo que pasa, intentando utilizar un modelo de partículas que pueda explicarlo.. Justifican y discuten entre ellos y con el profesor estas construcciones. Ya no son la mismas que las que se utilizaron para explicar el cambio de estado. Tanto las partículas como los enlaces que las unen adquieren un nuevo significado, 'químico' (átomos de elementos). Se llega a la conclusión que 'descomponer' no es 'quemar' (la diferencia es la intervención del oxígeno y el resultado final: en el primer caso el sólido que se obtiene es carbón, en el segundo es ceniza y también los gases que se forman son diferentes, puesto que ha intervenido el oxígeno)</p>

<i>En general</i>	<i>En esta investigación</i>
<p><i>Aplicación- Evaluación</i></p> <p>Se justifica lo que ha pasado mediante las entidades químicas. Se utilizan los cambios de masa para seguir la pista de los elementos. El 'episodio' es ya un 'hecho científico' que se puede repetir tantas veces como se quiera, con los mismos resultados. A partir de él, se pueden explicar otros fenómenos parecidos, pero no todos; van a hacer falta nuevas 'modelizaciones' para nuevas familias de fenómenos que también cumplan las reglas del Cambio Químico.</p>	<p><i>Aplicación- Evaluación</i></p> <p>El alumnado debería llegar a diferenciar entre 'quemar' y 'descomponer' en los otros fenómenos similares; a identificar las sustancias azúcar, celulosa y agua como sustancias compuestas y el carbón, cobre, hierro como sustancias simples, y aceptar que el elemento carbono está en algunas sustancias simples y compuestas y no en otras, y que lo mismo ocurre con los otros elementos que ya conoce. También ha de demostrar que es capaz de justificar el montaje experimental y de utilizarlo en otras ocasiones, así como interpretar los cambios de masa para poder interpretar con ellos otros fenómenos.</p>

Por lo que se refiere estrictamente al proceso de modelización, identificamos tres 'momentos' de aprendizaje que no han coincidido necesariamente, para cada uno de los alumnos, con las etapas del proceso de enseñanza planteado. Por ejemplo, algunos de ellos sólo formularon preguntas cuando participaron con toda la clase en la interpretación del fenómeno; o cuando, con su pequeño grupo, construyeron la maqueta y discutieron cuál podría ser la más adecuada para representar lo que había pasado. Estos alumnos se beneficiaron de las aportaciones de los líderes del grupo, sin que esto significara que fueran pasivos o que se quedaran al margen del trabajo que se realizaba en el aula. Simplemente conectaron en algunos momentos, aunque no hemos estudiado con detalle cómo y cuándo se produjo esta interacción.

A continuación describimos las principales características de estos momentos, considerando el grupo-clase globalmente:

**1er momento:** Realización de la experiencia y formulación de preguntas, a partir del marco inicial *'Tenemos unos Materiales que están formados por Partículas y que se Transforman al Calentarlos'*

Los alumnos no se sorprenden por lo que ocurre, puesto que la acción de 'carbonizar' es cotidiana. Como que esta acción se está

realizando en un contexto escolar, en el que es habitual realizar experimentos, saben que han de discutir sobre lo que está pasando y saben también que lo van a hacer en términos de partículas y de cambios en los materiales. Por ello, mientras calientan la madera, se lleva a cabo una discusión en la que intervienen ofreciendo diferentes explicaciones.

Con la ayuda del profesor, quedan planteadas en clase las preguntas que van a considerarse 'Hipótesis Teóricas' debido a que obligan a contrastar los cambios que se han producido con el modelo de 'Materiales y Partículas' de que disponen. Estos modelos se van a ir desarrollando gracias a las nuevas intervenciones (pesar antes y después, recoger los gases, condensar...) que van haciendo necesarias las nuevas 'entidades químicas' que introducirá el profesor.

A pesar de que las preguntas se formulan de manera abierta y cooperativa, no resultan igualmente significativas para cada uno de los alumnos. Esto se ve claramente en la segunda etapa del proceso, orientada por las preguntas que deberían funcionar como 'hipótesis teóricas'.

**2º momento:** Los alumnos responden a las preguntas o 'hipótesis teóricas' con la ayuda de las representaciones simbólicas que generan para interpretar lo que pasa. A partir de ellas se establece un diálogo participativo, gracias al cual se van explicitando las nuevas 'reglas de juego' del Cambio Químico (las sustancias cambian, pero algo no cambia puesto que la materia no desaparece) y las partículas que adquieren importancia son 'átomos químicos'/elementos (que ya no son las partículas -con las que han trabajado anteriormente- que se mantienen en el cambio de estado).

Creemos que la representación simbólica de lo que se supone que está pasando es crucial en esta etapa, porque ayuda a interiorizar las explicaciones orales del profesor y a contrastar las nuevas ideas con las informaciones del libro y con las intervenciones de los compañeros. Los alumnos empiezan reproduciendo los símbolos que habían utilizado para representar los cambios de estado de los materiales, pero a lo largo de esta etapa los símbolos se van transformando para adquirir un nuevo significado.

**3er momento:** En la tercera etapa del proceso se evalúan los resultados de manera cooperativa, con la finalidad que los alumnos tomen conciencia de lo que ha aprendido. Hablan de lo que ven en términos de lo que no ven y desarrollan sus propias maquetas que les

sirven para explicar lo que ha pasado y que les ayuda a relacionarlo con lo que ocurre en otros fenómenos.

Creemos poder afirmar que el conjunto de fenómenos de los que se habló inicialmente (algunos materiales se carbonizan) y el episodio (descomponer el serrín) se han transformado, para los alumnos, en un MODELO DE CAMBIO QUÍMICO (la descomposición de las sustancias que forman la madera y otros materiales similares).

## 5. Conclusiones

La enseñanza de la química planificada como actividad de modelización de los fenómenos permitiría recuperar el significado práctico y axiológico de los conceptos químicos, puesto que éstos sólo dicen cómo es el mundo a partir de lo que se puede hacer en él. Si los fenómenos que se escogen son relevantes desde un punto de vista social este nuevo enfoque de la enseñanza sería adecuado para la alfabetización científica de la ciudadanía, permitiendo introducir las entidades científicas a partir del conocimiento profundo de fenómenos en los que se puede intervenir.

Esta nueva enseñanza de la química está apareciendo ya en los nuevos textos de 'química en contexto' o química según enfoques CTS; pero es necesaria más investigación para establecer las relaciones adecuadas entre los fenómenos que se estudian, la intervención en ellos que es factible en la escuela y las entidades químicas que pueden introducirse de manera convincente. Los temas de estos nuevos programas ya no serán los átomos, los electrones o la tabla periódica; serán los temas de la vida cotidiana que se transformarán en modelos de CAMBIO QUÍMICO al introducir los lenguajes, las imágenes y las metáforas adecuados para ilustrar, entre todos ellos, los diferentes aspectos de una teoría química que llegará a ser completa sin ser en ningún momento errónea.

Con ello se podrían desarrollar los nuevos enfoques emergentes en la enseñanza de la química, rompiendo definitivamente con la química académica del XIX y abriendo el paso a la química del siglo XXI, en la cual los átomos cuánticos y los instrumentos que controlan el impacto de las radiaciones permiten nuevas actuaciones en el mundo que aún no aparecen suficientemente en los currículos pero que ya forman parte del imaginario de los niños y niñas de hoy.

## Referencias

- ASTOLFI, J.P. (1999). El error, un medio para enseñar. Sevilla: Díada Editora
- BENNET, J., HOLMAN, J. (2002). Context-based Approaches to the teaching of the Teaching of Chemistry: What are they and what are their effects?, en J. Gilbert et al. (ed.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, pp.165- 184. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- BYRNE, M., JOHNSTONE, A.H., POPE, A. (1994). Reasoning in Science: a language problem revealed? *SSR*, 75 (272): 103-107.
- CAAMAÑO, A. (1999). La química en el bachillerato. Nuevos contenidos CTS, per los mismos conceptos, *Aula de innovación educativa*, n.81, p.35.
- CAAMAÑO, A. (2001). Repensar el curriculum de química en los inicios del siglo XXI, *Alambique*, 29, p.43.
- CAAMAÑO, A. (2003). La enseñanza y el aprendizaje de la química, en M. P. Jiménez (coord.) et al., *Enseñar Ciencias*, Barcelona: Graó.
- ESTANYA, J.L. (1996). La importància dels exemples en la ciència escolar. *Tesina de master*. UAB
- ESTAÑA, J.L, IZQUIERDO, M. (2001). Contribución del lenguaje al proceso de modelización del Cambio Químico. *Documento no publicado*, LIEC, UAB
- FLICK, L. (1991). Where concepts meet Percepts: Stimulating Analogical Thought in Children. *Science Education*, 75 (2), 215-230.
- GIERE, R. (1988). *Explaining Science*. University of Chicago Press.
- GÓMEZ-CRESPO, M.A., GUTIÉRREZ, M.S., MARTÍN-DÍAZ, M.J., CAAMAÑO, A. (2000). Un enfoque ciencia-tecnología-sociedad para la química del bachillerato. El proyecto Salters, en I.P. Martins (ed.) *O Movimento CTS na Península Ibérica*. Aveiro. Universidade de Aveiro, p. 73-83.
- GRUPO SALTERS. (1999). Proyecto Química Salters, *Cuadernos de Pedagogía*, 281, p.68.
- GUIDONI, P. (1985). On Natural Thinking. *International Journal of Science Education*, 7 (2) 133- 140.
- GYUNG KIM, Mi, (1992). Layers of chemical language. I. Constitution of bodies v. structure of matter. *His. Sci.* pp. 69-96
- HART, C. et al., (2000). What is the purpose of this Experiment? Or Can Student learn Something from Doing Experiments? *Journal of Research in Science Teaching*, 37 (7) 655-675
- HODSON, D. (1992). Assessment of Practical Work. Some considerations in Philosophy of Science. *Science and Education*, 1 115-144

- HODSON, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. *Enseñanza de las ciencias* 12 (3): 299-313
- IZQUIERDO, M., SANMARTI, N. y ESPINET, M. (1999a). Fundamentación y diseño de las prácticas escolares de ciencias experimentales. *Enseñanza de las ciencias*, 17 (1), 45-59, 1999
- IZQUIERDO, M., SANMARTÍ, N., PUJOL, R.M. y SANMARTÍ, N. (1999b). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra, 79-91
- IZQUIERDO, M. (2001). El naixement de la Química Moderna Revista de la Societat Catalana de Química, 2, pp. 43- 48, 2001
- JORBA, J., SANMARTÍ, N. (1995). Enseñar, aprender y evaluar: un proceso de regulación continua. Publicaciones del MEC: Madrid.
- JUSTI, R. y GILBERT, J. (2002). Models and Modelling in Chemical Education, en J. Gilbert et al. (Ed) *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 47- 68.
- KUHN, D., (1993). Science as argument: Implications for Teaching and Learning Scientific Thinking. *Science Education* 77 (3), 319-337.
- MORTIMER, E. y SCOTT, P. (2003). Capturing and characterising the talk of high school science lessons: A framework for analyzing meaning making interactions. *II Encontro Internacional linguagem, cultura e cognição*. Minas Gerais, Brasil.
- NERSESSIAN, N. (1992). How do scientist think? In *Cognitive models of Science*, R. Giere Ed. University of Minnesota Press: Minneapolis.
- SANMARTI, N., IZQUIERO, M. y WATSON, R. (1995). The substantialisation of properties in pupils' thinking and in the History of Science. *Science & Education*, 4: 349-369
- SOLSONA, IZQUIERDO, M. y de JONG, O. (2003). Exploring the development of the students' conceptual profiles of chemical change'. *IJSE*, 25 (1), 3 – 12.

## Capítulo 7

---

### *Teaching practice and research in chemistry education: living apart or together?*

---

**Onno De Jong**

Utrecht University, Department of Chemical Education,  
o.dejong@phys.uu.nl

**SUMMARY.** *Teachers and researchers complain about a gap between chemistry (or broader: science) education research and the implementation of research findings in the teaching practice. The present paper deals with views on this gap, especially views on explanations for the gap and views on actions for bridging the gap. These views are discussed by presenting several realistic measures for establishing closer links between research and teaching practice.*

**RESUMEN.** *Los maestros y los investigadores se quejan acerca del distanciamiento entre la investigación en educación química (en general, en didáctica de las ciencias) y la implementación de los resultados de la investigación en la práctica docente. El presente capítulo trata de visualizar esta falta de sintonía, e insiste especialmente en la búsqueda de explicaciones y en las acciones que se han de llevar a cabo para que la investigación y la práctica se aproximen. Se discuten estos planteamientos y se presentan varias prácticas para establecer conexiones entre la investigación y la docencia.*

### **Introduction**

Research in chemistry education is a rather young branch on the tree of human knowledge, much younger than research in modern chemistry that started about two centuries ago (Lavoisier, Proust, Dalton). However, the origin of chemistry education research can be located halfway the last century, so, about 150 years later. The rise of chemistry education research has strongly been influenced by large-scale science curriculum reform in the USA, initiated in the late 1950s, and the UK, initiated in the early 1960s. Prominent chemistry curricula for secondary schools were the North-American projects of Chemical Education Materials Study (CHEM Study) and the Chemical Bond Approach (CBA), and the British project of Nuffield Chemistry. The reform was mainly guided by curriculum concerns and courses were designed to represent more adequately the 'body of knowledge' of chemistry in terms of basic chemistry concepts and rules (instead of a

large number of chemistry facts). For that reason, the materials were developed by broad teams of leading chemists and chemistry educators, advised by specialists from other educational areas, such as the psychology of learning. The new curricula were based on shared expertise and opinions regarding chemistry education, but chemistry education research was lacking, for the simple reason that this research did not exist at that time. It came up through the curriculum reform because there was increasing interest in gathering evidence to establish the effects of the new curricula on students' knowledge and performance.

The further development of chemistry education research has been stimulated by a new wave of curriculum reform since the 1980s, for instance, the British Salters Chemistry project, and the North-American project of Chemistry in the Community (ChemCon). In the context of this reform, the design of chemistry courses was much more guided by concerns for the learner and how what is learned may contribute to effective citizenship. New themes entered chemistry education research, for instance, chemistry students' alternative conceptions and ways of reasoning, and the learning of chemistry concepts in contexts. Interest in the chemistry teacher also came up, especially his or her (initial) knowledge and beliefs of how to teach chemistry topics and issues.

The main goal of research in chemistry education, like research in chemistry, is the building of knowledge. This knowledge can be generated regardless of whether the knowledge is of immediate usefulness. But it can also be generated because of the primary goal of the applicability. The present article deals with the 'applied' perspective by addressing the relationship between chemistry education research and teaching practice. This relationship is problematic. For many years, researchers have pointed out the poor effects of their efforts, for example, they complain that the outcomes of research often do not find their ways into the practice of teaching of chemistry and other natural sciences (Shymansky & Kyle, 1992). On the other hand, practising science teachers consider personal experiences, common sense, and official documents as much more important sources of their professional knowledge than results of research (Costa, Marques & Kempa, 2000) In conclusion, a gap between chemistry (or more general: science) education research and teaching practice can be indicated.

The present paper deals with views on this gap, especially views on explanations for the gap and views on actions for bridging the gap.

These views are discussed by presenting several realistic measures for establishing closer links between research and teaching practice. A sharp distinction between (research in) chemistry education and science education will not be made. Although the paper mainly covers secondary education level, most of the content can be extrapolated towards tertiary level.

### **Views on explanations for the research-practice gap**

In recent years, there has been a growing interest in explanations for the research-practice gap (cf. Costa et al. 2000; Hurd, 1991; White, 1998). The reported reasons can be classified into two categories: (a) personal reasons, expressed from the teacher or researcher perspective, and (b) structural reasons, expressed from the common perspective. Some of them are presented below.

#### ***Some personal factors***

Teachers and researchers feel a need to survive. Teachers cannot find enough time to reading research articles because they are already too busy with their existing teaching. Even if they have time for reading, they need extra time for translate and integrate the content into their teaching practice. Researchers also have to survive, which means that they have to publish in high-ranked journals read by only a few teachers. Of course, some of them publish in journals for teachers, but that does not provide rewards in terms of 'research' output.

Another explanatory factor behind the reported ones might be the differences in the way in which researchers and practitioners view each other. Teachers might be inclined to think that research ought to provide them with solutions for their teaching difficulties. Researchers might be inclined to believe that teachers are able to transform the reported research outcomes into useful ideas for teaching. Unfortunately, from both sides, the expectations are too high and the views are not very realistic.

#### ***An important structural factor***

In my opinion, one of the most important structural factors regards the impact of leading theories of teaching and learning. I will elaborate this factor concisely. Over the past several decades, the (theoretical) framework of chemistry education research is strongly influenced by cognitive theories of teaching and learning (as the

successor of behaviouristic theories). In the beginning, these theories stimulated a rise of the research interest in chemistry courses, based, for example, on theories of conditions of learning (Gagne, 1965), or theories of guided discovery learning (Bruner, 1975). Many studies on these courses were mainly focused on learning outcomes and did not explore the interaction of instruction and learning. Many research data were obtained by using multiple-choice questions and other quantitative methods (cf. Nurrenberg & Robinson, 1994).

In my opinion, the value of the mentioned cognitive theories for improving chemistry education is restricted. The conclusions of research that has been carried out in the context of such theories tend to be too general to be helpful for designing courses in specific chemistry topics. For example, it is possible to develop several diverging courses from one and the same cognitive theory. The reverse way is also possible: one specific course can be based on different cognitive theories. In other words, there is no close relationship between these cognitive theories and specific education practices. Many studies have focused on aspects of teaching and learning that are essentially 'content-free' and refer to general problems. However, most chemistry teachers are faced with content-related difficulties in teaching and learning. They want to understand the reasons why these specific problems arise. In sum, as long as chemistry education research generates outcomes in terms of general conclusions and implications, many teachers will be disappointed, and the gap between research and practice remains.

### **Influences of new views on teaching and learning**

During the last decade, there has been increased interest in studies of the teaching and learning of specific chemistry topics. This issue-specific research is strongly stimulated by the current leading theory of knowledge acquisition: constructivism. According to this perspective (see e.g. Driver, 1989), learning is a dynamic and social process in which learners actively construct meaning from their actual experiences in connection with their prior understandings and the social setting. A major implication for chemistry teachers is the idea that they should have an insight into students' (authentic) conceptions and ways of reasoning with respect to chemistry topics. Many issue-specific studies are focused on students' difficulties in understanding specific chemistry concepts and rules. A database of these studies is developed by Anderson and McKenzie (2002), and can be found on the website: [www.card.unp.ac.za](http://www.card.unp.ac.za). Many studies involve qualitative methods for collecting data, for example, by recording interviews,

think-aloud monologues (Bowen, 1994), or classroom discussions (De Jong, 1995).

In my opinion, issue-specific research is an important tool for improving chemistry education. However, its value depends on the nature of the chosen research instruments. Records of interviews and think-aloud monologues can be used before or after classroom instructions, but they are not very fruitful for investigating the teaching and learning of chemistry as it actually takes place in the classroom. For that kind of research, it is particularly useful to produce records of discussions between students and their teachers in educational situations. Moreover, these records can also be used to analyse specific chemistry teachers' conceptions and actions. However, studies that include data about classroom discussions and other teaching and learning activities are rather scarce. In sum, chemistry education research that generates issue-specific conclusions and implications can contribute to bridge the research-practice gap. This kind of research is necessary, but it is obvious that this is not sufficient. Other actions for bridging the gap are also needed. Some suggestions for these actions are reported in the next section.

### **Linking research to practice at a structural level**

Several scholars suggest improving the communication and collaboration between researchers and teachers (cf. Gilbert, De Jong, Justi, Treagust & Van Driel, 2002; Hurd, 1991). In the present section, I will elaborate the collaboration between teachers and researchers by concisely presenting an action research approach that is called 'developmental' research (Lijnse, 1995). In this approach, a small-scale curriculum development is linked to in-depth research on social, content and context specific teaching and learning processes. The structure of the research involves repeated cycles (a spiral) of activities. This cyclical method includes the following stages. First, the evaluation of current educational situations, for instance, the identification of students' pre-knowledge and skills. In that stage, analysing existing explorative studies can be useful. Second, in conjunction with reflection on science and science education, research questions are formulated. Third, new teaching strategies and materials are developed and implemented. Fourth, teaching and learning processes are investigated during classroom and laboratory sessions. Important ways of collecting data are audio/video-records of educational activities. Finally, the results are used in a new cycle of research.

Important tools for teaching and investigating are 'didactic' scenarios. By the way: the term 'didactic' does not refer to the (dominant Anglo-Saxon) meaning of technical education tricks, but to the (dominant Dutch-German) broader meaning of teaching and learning processes. These scenarios can be developed through collaboration between researchers and teachers, and in connection with the development of teaching and learning materials. Lijnse and Klaassen (2003) have described the following functions of 'didactical' scenarios. First, describing the expectations of researchers and teachers about the teaching and learning of a particular topic or issue. Second, guiding teachers what they should do (and why) when teaching. Third, acting as a research instrument when analysing deviations from what was expected (testing hypotheses). Finally, contributing to the construction of well-founded structures for teaching particular topics or issues.

In the area of chemical education, an example of a 'development' research project, that includes the use of a 'didactical' scenario, is presented by Stolk, Bulte, De Jong and Pilot (2003). Their study deals with a new issue in the Dutch chemistry curriculum, viz. the teaching and learning of chemistry concepts in contexts. Preceding to their project, a teaching-learning module about 'superabsorbents' was developed by some teacher-designers. By using this module, teachers can help their students to understand, and select, water-absorbing materials for diapers (nappies) and other applications. The chemistry behind this context consisted of basic organic concepts, polymers, and the hydrophilic feature of substances in relation to their molecular structure. The chemistry teachers that were involved in the project joined a course that consisted of college workshops connected with classroom teaching. They discussed the module and formulated their expectations for the lessons, recorded their teaching, and, after teaching, they evaluated the module and their classroom activities in terms of deviations from their expectations. The researchers in the project prepared a 'didactical' scenario (together with the teachers), observed the lessons, and interviewed the teachers before and after teaching. The findings show a fruitful collaboration between teachers and researchers, especially regarding the clarification of teachers' conception and performance in the classroom with respect to the new curriculum content. Although the teachers acknowledged the usefulness of the research activities, most of them indicated to have a lack a clear insight in the underlying goals of the course and the research. The findings were used to revise the module, the 'didactical' scenario, and the design of the teacher course for a next cycle of teaching and inquiry.

In conclusion, the present 'developmental' research is one of the many faces of action research. This paradigm can contribute to bridge the research-practice gap, but it is also obvious that a number of potholes should be filled and pitfalls avoided in order to make the bridge an effective way of bringing research and practice together.

## References

- ANDERSON, T. R., y MCKENZIE, J. (2002). Using meta-analysis to develop a database of students' conceptual and reasoning difficulties (CARD). In Malcolm, C., & Lubisi, C. (Eds.). *Proceedings of the 10<sup>th</sup> SAARMSTE Conference* (Section III, pp. 11-17). Durban: University of Natal Press.
- BOWEN, C. W. (1994). Think-aloud methods in chemistry education. *Journal of Chemical Education*, 71, 184-190.
- BRUNER, J. S. (1973). *Towards a Theory of Instruction*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- COSTA, N, MARQUES, L., y KEMPA, R. (2000). Science teachers' awareness of findings from education research. *Research in Science and Technology Education*, 18, 37-44.
- DE JONG, O. (1995). Classroom protocol analysis: a fruitful method of research in science education. In D. Psillos, D., (Ed.). *European Research in Science Education* (pp. 146-156). Thessaloniki: Thessaloniki University Press.
- DRIVER, R. (1989). Changing conceptions. In Adey, P., (Ed.). *Adolescent Development and School Science* (pp. 79-99). London: Falmer Press.
- GAGNE, R. M. (1965). *The Conditions of Learning*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- GILBERT, J. K., DE JONG, O., JUSTI, R., TREAGUST, D. F., y VAN DRIEL, J.H. (2002). Research and development for the future of chemical education. In Gilbert, J. K., et al., (Eds.). *Chemical Education: Towards Research-based Practice* (pp. 391-408). Dordrecht/Boston: Kluwer Academic Publishers.
- HURD P. D. (1991). Issues in linking research to science teaching. *Science Education*, 75, 723-732.
- LIJNSE, P. (1995). 'Developmental research' as a way to an empirical-based 'didactical' structure' of science. *Science Education*, 79, 189-199.
- LIJNSE, P., y KLAASSEN, K. (2003). Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences? *International Journal of Science Education* (in press).

- NURRENBERG, S. C., y ROBINSON, W. R. (1994). Quantitative research in chemical education. *Journal of Chemical Education*, 71, 181-183.
- SHYMANSKI, J. A., y KYLE, W. C. (1992). Establishing a research agenda: critical issues if science curriculum reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 29, 749-778.
- STOLK, M J., BULTE, A. M. W., DE JONG, O., y PILOT, A. (2003). Professional development of chemistry teachers: contextualizing school chemistry. *Paper presented at the 2003 ESERA Conference*, 19-23 August 2003, Noordwijkerhout, The Netherlands.
- WHITE, R. T. (1998). Research, theories of learning, principles of teaching and classroom practice: examples and issues. *Studies in Science Education*, 31, 55-70.



## Capítulo 8

---

### *Discusión en torno a una propuesta para introducir la historia de la ciencia en la formación inicial del profesorado de ciencias<sup>5</sup>*

---

#### **Mario Quintanilla**

Facultad de Educación, Pontificia Universidad Católica de Chile  
mquintag@puc.cl

#### **Mercè Izquierdo Aymerich**

Facultat d'Educació, Universitat Autònoma de Barcelona  
merce.izquierdo@uab.es

#### **Agustín Adúriz-Bravo**

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires  
aadurizbravo@cefiec.fcen.uba.ar

**SUMMARY.** We propose and discuss a theoretical-methodological model to introduce the history of science at an early stage of science teachers' professional formation. The model includes contextual and historical information about the Chilean Educational Reform, in relation to science teaching. The categories of analysis of the proposed model are identified and briefly described; its rationale and the way of introducing the history of science in science teacher education are explained. We insist on the importance of a theoretical change in the models of sciences and sciences teaching that derive from the building of professional knowledge. Finally, there is a comment on various experiences developed in Chile that provide information on the viability of incorporating the history of science in the curriculum of pre-service chemistry teacher education programmers.

**RESUMEN.** Proponemos y discutimos un modelo teórico-metodológico para introducir la historia de la ciencia en una etapa temprana de la formación profesional del profesorado de ciencias. Incluimos información contextual e histórica acerca de la Reforma Educativa en Chile, en relación con la enseñanza de las ciencias. Identificamos y describimos brevemente las categorías de análisis del modelo propuesto; explicamos sus fundamentos y la manera en que proponemos introducir la historia de la ciencia en la formación del profesorado de ciencias. Insistimos en la importancia de un cambio teórico en los modelos de ciencia y de enseñanza de las ciencias que se derivan de la construcción del conocimiento profesional. Finalmente,

---

<sup>5</sup> Una versión preliminar de este trabajo fue presentado en la *Eighth International History, Philosophy, Sociology and Science Teaching Conference*, Leeds, Inglaterra, 2005.

comentamos varias experiencias desarrolladas en Chile que nos proporcionan información acerca de la viabilidad de incorporar la historia de la ciencia en el currículo de formación inicial del profesorado de química.

## **Introducción**

Hemos establecido, desde 2002, un marco de colaboración entre nuestras universidades (Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Buenos Aires y Universitat Autònoma de Barcelona) con el fin de compartir y potenciar las investigaciones e innovaciones que llevamos adelante en el campo de la enseñanza de la filosofía, la historia de la ciencia y la didáctica de las ciencias al futuro y actual profesorado de ciencias de todos los niveles educativos, desde el infantil hasta el universitario. Consideramos a estas tres disciplinas como 'metaciencias', puesto que las tres requieren llevar a cabo una reflexión teórica sobre las ciencias desde su perspectiva específica; y nos interesa que las tres se coordinen de la manera adecuada para que las propuestas docentes sean coherentes y eficaces.

Las metaciencias permiten relacionar el conocimiento científico que se construye en cada momento de la historia con los problemas que se intentan solucionar, las finalidades que se persiguen, las herramientas conceptuales y metodológicas disponibles, la cultura y los valores vigentes en ese momento y los conocimientos que se seleccionan en los currículos docentes, para formar a las nuevas generaciones (Matthews, 1994; Solsona, 1997; Izquierdo, 2000; Adúriz-Bravo, 2005; Quintanilla, 2005). De allí el enorme valor que encontramos a los contenidos provenientes de estas disciplinas para la práctica profesional de los profesores y profesoras de ciencias.

Desde hace diez años, los autores venimos trabajando en ideas teóricas y propuestas prácticas para acercar las metaciencias al profesorado de ciencias de nuestros países y para coordinar a las tres disciplinas. En los períodos de formación doctoral de dos de nosotros en la Universitat Autònoma de Barcelona bajo la dirección de la segunda autora, tuvimos oportunidad de enriquecer nuestras formulaciones y acciones en la didáctica de las ciencias con aportaciones de la filosofía y de la historia de las ciencias y de comenzar a compartir un espacio común de ideas teóricas que ahora fundamenta algunas primeras producciones e intervenciones conjuntas.

Los principales objetivos de nuestro proyecto conjunto son:

1. Favorecer entre el profesorado de ciencias (en formación y en activo) de nuestros países la reflexión sistemática y continua acerca de las diversas aportaciones que las metaciencias pueden hacer a su práctica profesional.
2. Desarrollar herramientas teóricas para introducir más eficaz y significativamente el componente metacientífico en la formación inicial y continuada del profesorado de ciencias.
3. Generar propuestas *aplicadas* de formación metacientífica.
4. Comparar los resultados de la introducción de ideas, materiales y abordajes en los distintos contextos en los cuales trabajamos.
5. Apoyar el intercambio de impresiones, experiencias y recursos entre profesores y profesoras de nuestros países, para que ellos conozcan realidades distintas a las propias y enriquezcan su práctica profesional.

El presente capítulo se propone:

1. Enunciar, caracterizar y discutir las bases orientadoras (o directrices) de un modelo teórico-metodológico (MTM) para incorporar la historia de la ciencia en la formación “temprana” del profesorado de ciencias.
2. Reportar algunas ideas que promueven, entre el profesorado de ciencias en formación y en activo, una reflexión rigurosa sobre la actividad científica en la historia y sobre la vinculación de esta con los procesos de enseñanza y divulgación.
3. Brindar herramientas para favorecer, en los profesores y las profesoras de ciencias, el análisis crítico permanente del desarrollo de las teorías científicas en la historia y la construcción de conocimiento profesional para modelizar esas teorías en el aula.

### **Naturaleza de la ciencia y enseñanza de las ciencias**

Una de las metas de nuestro trabajo de colaboración ha sido integrar el *componente metacientífico* en el currículo de formación inicial del profesorado de ciencias. Tal integración, aunque es objeto, en el ámbito internacional, de un vasto conjunto de reflexiones y

propuestas plasmado en la línea de investigaciones NOS (*naturaleza de la ciencia*), todavía está en sus inicios si nos referimos a propuestas concretas de integración de estos conocimientos en los planes de formación de los profesores (Matthews, 1994; McComas, 1998).

Actualmente, muchas escuelas y autores situados en las disciplinas de carácter metacientífico –como la epistemología, la historia de la ciencia y la propia didáctica de las ciencias– ven la ciencia como una *actividad humana* de producción, evaluación, aplicación y difusión de saberes inmersa en un contexto histórico, social y cultural que le da sentido al precisar las finalidades de intervención que se persiguen y los valores que se sostienen o están en juego en las comunidades e instituciones científicas en determinados momentos de la historia de la ciencia (Echeverría, 1995; Izquierdo, 2000; Bourdieu, 2003; Izquierdo y Adúriz-Bravo, 2005). Frente a esto, en las últimas décadas diversas investigaciones han insistido en señalar que la perspectiva del análisis histórico, *acerca de y sobre* la ciencia, se halla ausente en la educación científica y en la formación del profesorado de ciencias en diferentes contextos culturales, académicos e institucionales (Solsona, 1997; Álvarez Lires, 1998). Estas investigaciones de carácter *didáctico* concluyen que la transmisión y la divulgación de la ciencia en la escuela o en la universidad ignoran de manera intencionada el devenir histórico del conocimiento científico o simplemente destaca algunos ‘hitos relevantes’ que, debido a las tradiciones o a los énfasis clásicos de determinados contenidos, así lo permiten. (Gribbin, 2005)

De esta manera, queda en evidencia que el profesorado de ciencias naturales y los científicos y científicas, así como un número no despreciable de profesionales en los medios de comunicación de masas, transmiten una imagen de ciencia normativa y restrictiva, bastante alejada de los contextos culturales, sociales o políticos que han contribuido al desarrollo sistemático, permanente y continuo del conocimiento en las diferentes épocas. Los diferentes ámbitos y contenidos de la ciencia experimentan complejas y persistentes transformaciones como consecuencia de la creación de nuevo conocimiento. En consecuencia, se requiere una actualización oportuna del conocimiento profesional del profesorado de ciencias en formación y en ejercicio con el fin de instalar esta *historicidad* de la disciplina a enseñar.

En sintonía con las preocupaciones antes expuestas, la comunidad de investigación e innovación en didáctica de las ciencias naturales va llegando a algunos primeros consensos acerca

de qué hacer a la hora de tratar de enseñar las metaciencias al profesorado de ciencias. Nuestra intención es contribuir a afianzar esa línea, pensando sobre los contenidos y las metodologías más adecuadas para una apropiación significativa de este emergente componente curricular. Nos interesa, para ello, construir *directrices* (Adúriz-Bravo e Izquierdo, 2002) u orientaciones que provean ideas útiles a los formadores y formadoras del profesorado de ciencias (Quintanilla, 2006).

## La comunicación del conocimiento científico y las audiencias

(Quintanilla, 2006 ha destacado que los significados actuales de la historia de la ciencia también se han ido cambiando de manera a veces ambigua y misteriosa, compleja otras veces y, en algunos casos, inexplicablemente controvertida y confusa en cuanto a los registros, métodos e instrumentos, así como interpretada de múltiples formas según los textos y los datos disponibles o legitimados por la institución o el poder imperante (Hackmann, 1985; Samsó, 1991). Al respecto, son muchísimos los ejemplos donde se pueden ver estas situaciones en distintas 'etapas' de la evolución de las teorías de las diferentes áreas del conocimiento científico (Izquierdo, 1995; Crombie, 2000; Marantz, 2000; Pellón, 2003; Gribbin, 2005).

En este momento no se sabe todo lo que esperaríamos saber (y de la manera en que esperaríamos saberlo) acerca de qué es un *hecho histórico de la ciencia*. Hay momentos, en las diferentes culturas, en que la ciencia es más bien un proceso retórico sin grandes logros teóricos, cuyo propósito fundamental es lograr reconocimiento social, cultural, religioso e inclusive político (vinculado al control social por parte de las clases dominantes), tal como lo plantea Stephen Shapin a propósito de la enseñanza tecnocientífica en la Inglaterra victoriana del siglo XIX:

*Nuestra interpretación provee una explicación integrada de las relaciones entre los propósitos originales de control de los Institutos y la naturaleza del conocimiento científico presentado en sus currículos. (Shapin, 1977: 32; la traducción es nuestra)*

En la reflexión que estamos iniciando, nos damos cuenta del enorme valor del lenguaje y de los modos de comunicar y divulgar la historia de la ciencia en los diferentes ámbitos: escolares, profesionales o político-institucionales. Por ejemplo, sin ir más lejos, para Shapin

(1977) en la Inglaterra de John Dalton se promoverá una concepción de la ciencia en la que se confunde el filantropismo de la burguesía y la educación científica de la clase trabajadora, con la excusa de reducir o impedir la desestabilización social frente al avance de las ideas revolucionarias derivadas del desarrollo industrial y del nuevo orden económico capitalista que cuestionarán Engels y Marx<sup>6</sup>. Particularmente, la zona de Manchester (cercana a Eaglesfield, donde nació Dalton) se caracterizó por la consolidación progresiva de la Revolución Industrial, cuyos principales rasgos fueron la adopción de nuevas tecnologías, la reducción paulatina del sistema de explotación agraria, la especificación productiva regional, el aumento del crecimiento económico derivado de la diversidad industrial, el aumento de la burguesía capitalista y el descenso sistemático y progresivo de la mortandad (Pellón, 2003).

Como consecuencia de lo anterior, se puede predecir que si los diferentes públicos de la ciencia –estudiantes, profesorado, expertos y legos–, no conocen la importancia de los contextos en los que se formaron los conceptos científicos, poseen una visión deformada de la naturaleza de la ciencia (de su objeto y de su método) así como de la forma en que se construyen y evolucionan los conocimientos científicos. Así, estos públicos, en general, ignoran las repercusiones sociales de la ciencia, lo que en muchas ocasiones produce una actitud de rechazo hacia las materias científicas y dificulta su aprendizaje y comprensión, sobre todo cuando, desde la educación científica, se procura únicamente *axiomatizar* de manera reduccionista el lenguaje científico sin recurrir a un proceso de valoración e interpretación compleja y contextualizada de las teorías, los instrumentos y los fenómenos que se han estudiado a lo largo del tiempo. (Baraona, 1994; Pérez, 1998; Uribe y Quintanilla, 2004). Junto a todo ello, y como lo plantea Bourdieu (2003), las reglas del método científico tal y como son explicitadas por algunos filósofos fuertemente anclados en un modelo de racionalidad categórica no corresponden tampoco a la realidad de las prácticas; se promueve con todo ello una comunidad científica cerrada cuya investigación se refiere a un abanico muy definido de problemas y cuyo *paradigma* o *matriz disciplinaria*<sup>7</sup> es aceptado por una fracción importante de científicos y que tiende a imponerse a todos los demás sin tener en cuenta el contexto de práctica y de valores en el cual se desarrolla y se consolida.

---

<sup>6</sup> Para profundizar en estas ideas, ver Shapin (1977).

<sup>7</sup> La expresión destacada es del propio Bourdieu (2003: 34).

## La historia de la ciencia en la formación del profesorado de ciencias

La mayoría de las investigaciones en este campo (cf. Álvarez Lires, 1998) coinciden en afirmar el desconocimiento de la historia de la ciencia de los profesorado y también de los científicos y científicas. Hay diversos factores que explicarían, en gran medida,. Entre ellas se destacan:

1. La inexistencia de la HC en los contenidos escolares de los planes de enseñanza secundaria y en casi todos los planes de formación universitarios de científicos y profesorado de ciencias; en consecuencia, los licenciados en ciencias (y los futuros profesores) carecen, en general, de una visión histórica de sus disciplinas.
2. La persistencia de una concepción dogmática, utilitarista e instrumental de la ciencia en los centros de docencia e investigación en ciencias básicas y aplicadas.
3. El desinterés continuo de profesorado de ciencias y de científicos de asumir el análisis y la reflexión sobre los acontecimientos históricos como parte de la clase de ciencias y de la formación profesional, favoreciendo *únicamente* la formalización y el tratamiento algorítmico de la inmensa mayoría de los contenidos científicos.
4. Escasas publicaciones en el área de vinculación entre historia de la ciencia y educación científica, lo que dificulta el acceso a fuentes, documentos y sistematizaciones de calidad en tópicos particulares en ámbitos específicos.
5. Desinterés de la historia de la ciencia por parte de los científicos y del profesorado de ciencias, que la ven como "acontecimientos puntuales" desconectados de los contenidos que se "tienen que enseñar" y por los cuales la *sociedad evalúa las capacidades y competencias* de los estudiantes.

En definitiva, tenemos una *concepción heredada* de la ciencia con un fuerte carácter triunfalista, cuyos protagonistas son unos pocos 'privilegiados' creadores de teorías, experimentos, procedimientos e instrumentos, cuyas obras irrepetibles han alejado durante décadas el discurso científico 'socialmente construido' de los contextos culturales donde se ha generado y desarrollado (Nieto, 2005) (Bensaude y Rasmussen, 1997)

## Aspectos teóricos de la propuesta

Nuestras formulaciones conceptuales más recientes, que sirven como fundamento al diseño de intervenciones de formación temprana del profesorado de ciencias, incluyen, por ejemplo, las *bases orientadoras para incorporar la historia de la química en la formación docente inicial*, propuestas originalmente por Quintanilla (2004) y que aquí resignificamos en la figura 1. Este esquema sirve de fundamentación para un estudio empírico que es objeto de otra investigación que se está iniciando (Merino y Quintanilla (2005)) El ciclo de diez etapas que proponemos incorpora las siguientes ideas de la investigación en didáctica de las ciencias (Adúriz-Bravo, 2001):

1. La formación del profesorado de ciencias naturales ha de ser en ciencias pero también *sobre* las ciencias, es decir, ha de tener un fuerte *componente metacientífico*.
2. Ese componente metacientífico (de historia, filosofía y didáctica de las ciencias) interactúa fuertemente con los demás saberes científicos del profesor o profesora de ciencias naturales (Bromme, 1988).
3. Este componente fundamentará el proceso de transposición didáctica o, según nuestra propuesta, de diseño de la actividad científica escolar, ACE.
4. Este componente de formación resulta de un proceso de selección muy pensado de algunos contenidos procedentes de las metaciencias eruditas, aquéllos que tienen valor para la práctica profesional del profesorado de ciencias.
5. Que ese componente se ha de construir a partir del conocimiento previo de la naturaleza de la ciencia de los profesores y profesoras en formación.
6. Este componente sirve a múltiples finalidades en distintos niveles de concreción.
7. Este componente ha de ser construido a partir de los saberes científicos de los profesores y profesoras y de manera coherente con ellos.

8. Este componente se ha de enseñar a través de *ejemplos paradigmáticos* que sean significativos para el profesorado de ciencias.

9. Los profesores y profesoras de ciencias han de llegar a ser capaces de autorregular sus conocimientos metacientíficos.

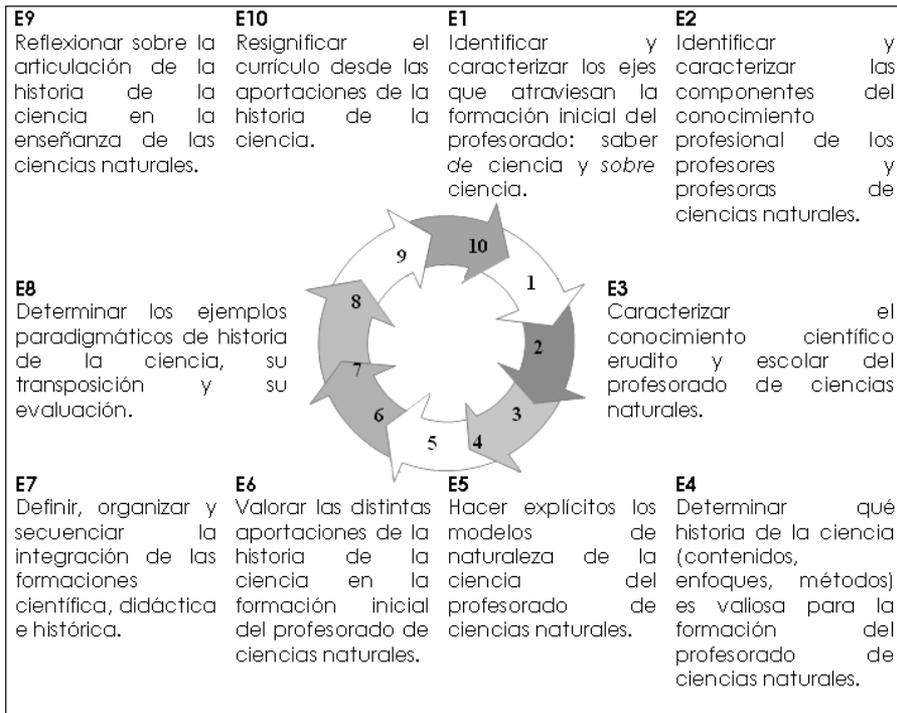
10. Este componente debería transformar en profundidad la forma en que los profesores y profesoras de ciencias se relacionan con los profesores de las otras disciplinas del currículo.

### **Breve caracterización y finalidades de las etapas de la propuesta o Modelo de formación que proponemos**

En cada una de las etapas del ciclo se introducen textos históricos y didácticos para ayudar a lograr las finalidades establecidas. Por ejemplo, en la etapa 10, los profesores y profesoras de ciencias naturales utilizan la historia de la ciencia para identificar los conceptos estructurantes y *modelos irreducibles* que seleccionarán como los más relevantes para construir un currículo de ciencias para el nivel educativo en el que se desempeñan.

Los instrumentos creados a partir de este ciclo tienen como objetivo ayudar al profesorado de ciencias en formación a reflexionar sobre los contenidos, instrumentos, objetivos, situaciones, procedimientos, valores, enfoques y materiales que les permitan valorar la contribución de la historia de la ciencia a su propio desarrollo profesional. Las ideas que vamos discutiendo en nuestro grupo de trabajo, que dan lugar a marcos conceptuales como este ciclo aquí presentado, nos sirven para fundamentar propuestas prácticas que estamos comenzando a ensayar (Izquierdo y Aliberas, 2004).

Veamos brevemente cada una de las etapas del ciclo que estamos proponiendo.



**Figura 1.** Etapas del *ciclo teórico metodológico* (CTM) para incorporar la historia de la ciencia en la formación inicial del profesorado de ciencias.

### *E.1 Identificar y caracterizar los ejes que atraviesan la formación inicial del profesorado: saber de ciencia y sobre ciencia*

En esta visión del proceso de construcción, reconstrucción y deconstrucción del hecho histórico de la ciencia, las acciones que resultan relevantes para la intención pedagógica, epistemológica y didáctica tienen que ver con identificar y caracterizar los ejes que atraviesan la formación inicial del profesorado: *saber de ciencia y sobre ciencia*. Debemos insistir en el hecho de que la formación inicial (y también la permanente) del profesorado de ciencias se sostiene básicamente en los sistemas de creencias o representaciones sociales que profesoras y profesores tienen acerca del objeto de conocimiento y de la naturaleza de la ciencia a enseñar. En estos sistemas coexisten, de manera persistente e intuitiva, significados tradicionales, dogmáticos, simples, poco elaborados e inestables, la mayoría de las veces ambiguos, que condicionan e incluso determinan los procesos de enseñanza, evaluación y aprendizaje de

los saberes científicos (Porlán y Rivero, 1998). Al respecto, hemos insistido en la necesidad de avanzar hacia representaciones más complejas y holistas de la naturaleza de la ciencia y de la construcción de conocimiento profesional e histórico, en las que se describan y analicen la actividad de los profesores de ciencias en formación de una forma más comprensiva y amplia, al tiempo que el 'científico' esté consciente del modelo epistemológico de ciencia y del modelo de enseñanza de las ciencias que conllevan estas orientaciones con relación a favorecer el vínculo entre la historia de la ciencia y la solución de problemas 'actuales' de las teorías científicas.

### *E.2. Identificar y caracterizar los componentes del conocimiento profesional del profesorado de ciencias*

De manera aparentemente natural, es común representarse el proceso de construcción profesional y científica sólo como un enfrentamiento del estudiante con la teoría y su contrastación (experiencias, procedimientos, instrumentos, contenidos, etc). En este enfrentamiento (la mayoría de las veces tensionante), el profesor o profesora de ciencias en formación trata de penetrar cada vez más profundamente en los aspectos desconocidos de la situación, de comprender mejor de qué se trata la situación problemática planteada y de hallar los instrumentos más adecuados que le permitan tener acceso a la solución deseada 'por el científico'. Al respecto hemos venido trabajando la idea de los 'planos del desarrollo' que conectan muy bien con la necesidad de situar el análisis de la historia de la ciencia en una orientación naturalista que supere los rangos propiamente instrumentales del contenido, así como del conocimiento profesional y favorezca en el profesor en formación el sentido que tiene la construcción del conocimiento científico en determinada época o cultura. En nuestras propuestas específicas<sup>8</sup> de formación inicial y continua de profesores de ciencias distinguimos tres planos fundamentales en el abordaje de problemas científicos en el aula: el *plano instrumental-operativo*, el *plano personal-significativo* y el *plano relacional o social o plano cultural de transferencia*.

### *E.3. Caracterizar el conocimiento científico erudito y escolar del profesorado de ciencias*

Al proponernos reflexionar sobre los modos de construcción histórica del conocimiento en general y de la ciencia experimental en particular, se hace necesario comprender e interpretar no sólo la

---

<sup>8</sup> Al respecto, sugerimos ver el artículo: Labarrere y Quintanilla (2002).

'tradición científica' con sus aportes, estructuras y lógicas de construcción, sino también algo más. Valoramos la visión cognitiva del conocimiento científico que fundamenta una propuesta *ciencia que enseñamos* o *ciencia escolar* (Izquierdo y Adúriz-Bravo, 2003) como 'actividad científica escolar (ACE). La visión cognitiva refiere la importancia de la naturaleza y significado de los modelos teóricos que se enseñan, de la actividad científica en el contexto de la educación, de los lenguajes de la ciencia, de los modos de razonar y de los modos de comunicarla a otros.

Una formación inicial del profesorado de ciencias que incluya la historia de la ciencia necesariamente debe implicar que el *formador de formadores* desarrolle la idea central de *pensar con modelos teóricos* y de reflexionar sobre sus prácticas pedagógicas cotidianas con categorías de análisis comprensivas que favorezcan la debida orientación aplicada del conocimiento científico enseñado, comprobando las implicaciones que dichos modelos o teorías han tenido en la historia (Duschl, 1997; Fourez, 1998; Pérez, 1998; Klimovsky, 2001).

*E.4. Determinar qué historia de la ciencia (contenidos, enfoques, métodos) es valiosa para la formación del profesorado de ciencias*

Se debe enfatizar al profesorado de ciencias en formación el hecho de que hay 'diferentes épocas' de la historia de la química y fuentes diversas para abordarla, conocerla e interpretarla. Por eso, es apropiado que las así llamadas *etapas de la historia de la ciencia* (de las diferentes disciplinas) puedan ser analizadas desde una lectura general del conocimiento (por ejemplo, la ciencia en las civilizaciones antiguas, la ciencia en el Renacimiento...) y desde una lectura particular (por ejemplo, hechos paradigmáticos a partir del siglo XVIII). Se hace necesario disponer de una literatura específica de 'narraciones científicas' que permitan el contrapunto, la discusión y el análisis del contenido histórico que se enseña teniendo en cuenta a sus destinatarios (Izquierdo, 2005). Del mismo modo, se han de introducir en la formación del profesorado nuevos aspectos de historia de la ciencia tales como el papel de las instituciones, las minorías, los elementos políticos, los aspectos valóricos y de género...que plantean nuevas miradas sobre la construcción histórica y evolutiva del hecho científico, así como sobre su aprendizaje y enseñanza (Solsona, 1997; Solsona y Quintanilla, 2005; Solar y Quintanilla, 2005).

### *E. 5. Hacer explícitos los modelos de naturaleza de la ciencia del profesorado de ciencias*

Una formación inicial de profesores de ciencia que considere las complejas conexiones entre la génesis del conocimiento científico, la naturaleza de la ciencia y los procesos de enseñanza de las ciencias debería promover un proceso reflexivo y comprensivo, en el que la construcción y formalización del conocimiento científico y su enseñanza adquieren una connotación metadisciplinaria de saberes que por su naturaleza epistémica están en permanente crisis y cambio, es decir, donde el profesor está aprendiendo a enseñar ciencia y el estudiante aprendiendo a aprenderla (según una visión interpretativo-crítica y mutable del conocimiento). Se hace necesario, entonces, que los profesores y profesoras de ciencias en formación realicen una reflexión teórica acerca de la naturaleza de la ciencia, explicitando sus ideas previas o teorías implícitas y evidenciando las definiciones que otorgan a los métodos, instrumentos y finalidades científicas.

En síntesis, se han de discutir las representaciones de ciencia y de enseñanza de la ciencia que los sujetos tienen, confrontando las ideas acerca del conocimiento asumido con determinadas categorías epistemológicas y evidenciando la complejidad de las teorías científicas, su método, su lenguaje y sus instrumentos.

### *E.6. Valorar las distintas aportaciones de la historia de la ciencia en la formación inicial del profesorado de ciencias*

La reflexión histórica sobre la evolución del conocimiento científico puede proporcionar elementos y metodologías de análisis que favorecen la resignificación de los contenidos científicos, de su génesis y de su enseñanza (Uribe y Quintanilla, 2004; Cuéllar et al., 2005). Por ejemplo, el caso del biólogo Gregor Mendel (1822-1884), cuyos aportes a la ciencia han sido fuente de numerosos y significativos trabajos en la historia de la genética se presenta *actualmente* fragmentada exclusivamente como si se tratara de la introducción de algoritmos estadísticos (Alzogaray, 2004; Marantz, 2001; Quintanilla, 2005).

La idea de historicidad de la ciencia en la formación profesional y en la enseñanza puede influir positivamente en nuevas actitudes y representaciones sobre la ciencia y sus métodos de producción (Quintanilla et al., 2005; Quintanilla et al., en prensa). Al

asumir que la ciencia es un proceso de construcción de conocimiento con dimensiones no sólo históricas sino también filosóficas, que es el producto de una compleja actividad social que precede y sigue al acto individual y cooperativo del descubrimiento (o creación) y justificación del nuevo conocimiento, se hace necesario relacionar los conceptos que se han de enseñar con los problemas en los cuales estos conceptos emergieron (Izquierdo, 1995, 2005). Para ello se han de evaluar marcos conceptuales diferentes a los actuales y tener en cuenta la relación entre la ciencia y los valores que se da en una cultura y en un "momento específico" de la historia de la humanidad; y evaluar la influencia de las ciencias en el desarrollo de una sociedad concreta. (Papp, 1988; Estany, 1993; Izquierdo et al., 2006).

#### *E.7. Definir, organizar y secuenciar la formación histórica, didáctica y científica, de manera integrada*

En la formación inicial de los profesores de química se requiere de la conjunción de tres núcleos básicos: el *histórico*, el *didáctico* y el *científico*. Nos referiremos brevemente a cada uno de estos núcleos y a las relaciones que se han de establecer entre ellos:

*Núcleo histórico.* Se han de comprender las ideas básicas de historiografía (diacronismo, presentismo, anacronismo, etc.) para poder aplicar correctamente la historia de la química al diseño de unidades didácticas específicas.

*Núcleo didáctico.* Se ha de aceptar que la didáctica es un campo de conocimiento e investigación que rescata con sentido educativo el contenido disciplinar y su epistemología, proveyendo modelos teóricos y modelos de acción docente.

*Núcleo científico.* Se ha de ser capaz de manejar los conceptos y procesos vertebradores de la química desde una lectura de ciencia naturalizada.

En Chile, las escasas investigaciones realizadas a la fecha en el ámbito de formación inicial y continua del profesorado de ciencias naturales dan cuenta del escaso abordaje y conjunción de estos tres núcleos básicos que constituyen la profesionalidad docente. Nos parece que el *modelo de las tres P* (Adúriz-Bravo e Izquierdo, 2005) es un interesante aporte en este sentido, puesto que proporciona orientaciones sobre cómo articular el análisis de la disciplina científica y su enseñanza con otros componentes esenciales como el psicológico, el histórico-epistemológico, el curricular y el cultural.

### *E.8. Determinar los ejemplos paradigmáticos de historia de la ciencia, su transposición y su evaluación*

Sugerimos trabajar con *episodios paradigmáticos de la historia de la ciencia* reflexionando, para uno de ellos, sobre las consecuencias de su enseñanza. Se puede recurrir a estrategias de diferente tipo, como lo plantearemos al finalizar este capítulo. La articulación entre el 'saber científico construido en la historia', la *transposición* del saber enseñado en la clase de ciencias y su evaluación requiere una manera de representarse el mundo que debe imponer coherencia entre las teorías y los fenómenos y por ello la modelización teórica bien argumentada debe incorporar en los ciclos de aprendizaje (Merino y Quintanilla, 2005).

Bajo esta óptica surgen interrogantes como los siguientes: ¿Cuáles son los hechos de la historia de la ciencia más apropiados para que el profesor o profesora en formación elaboren un modelo teórico a través de las diferentes actividades de aprendizaje, instrumentos de evaluación, imágenes y símbolos formales que presenta el episodio histórico? ¿Cómo dar un inicio adecuado al pensamiento teórico de los estudiantes y saber cuáles son las proposiciones más correctas para relacionar los fenómenos históricos de la ciencia con dichos modelos en la clase? ¿Cuáles son las estrategias de evaluación más adecuadas para posibilitar la construcción de esos conceptos haciendo que la historia de la ciencia sea un instrumento mediador entre la ciencia de los científicos y la ciencia que han de aprender a enseñar nuestros profesores? En este sentido, son de interés el uso de analogías y metáforas que, teniendo como centro el discurso argumentado en base a modelos teóricos, desafían la creatividad y la imaginación. (Izquierdo, 2000).

### *E. 9. Reflexionar sobre la articulación de la historia de la ciencia en la enseñanza de las ciencias*

Para desarrollar el pensamiento y promover la construcción de conocimiento profesional del profesorado de ciencias en formación son necesarias estrategias dirigidas a favorecer la participación de los estudiantes en su propia evaluación del desarrollo progresivo y complejo de su identidad profesional y de su sentido de pertenencia a un colectivo (Angulo, 2002; Copello, 2002). Para enriquecer esta reflexión es conveniente recordar que las ciencias tienen una naturaleza retórica, discursiva, muchas veces determinada por la

autoridad científica del momento o por el consenso de sus comunidades, donde las explicaciones e interpretaciones han dado paso a diferentes significados en diferentes momentos de la historia (Baraona, 1994; Crombie, 1993; Izquierdo, 1995; Quintanilla et al., 2005). Si se tratara del profesorado de química, por ejemplo, haríamos reflexionar al profesor o profesora en formación con preguntas como las siguientes: ¿Qué acontecimientos políticos ocurrían en Francia en la época de Lavoisier?, ¿Qué pensaba él de la química?, ¿Qué sabemos de su personalidad? ¿Por qué muere guillotinado?...

#### *E. 10. Resignificar el currículo integrado desde las aportaciones de la historia de la ciencia*

Los profesores de ciencia en formación inicial y continuada han de comprender que las rutas de construcción del conocimiento científico son complejas y requieren poder relacionar los conocimientos de muchas disciplinas; sólo así se podrá comprender bien la historia de la ciencia y aprovecharla para la didáctica de las ciencias. Del mismo modo, se ha desmitificar la práctica experimental como si fuera la única vía para aprender ciencias y proponer opciones diferentes vinculadas a pensar, hacer y narrar la ciencia en la escuela (Izquierdo, 2000; Quintanilla, 2005).

### **Algunos resultados preliminares**

En el Departamento de Didáctica de la Facultad de Educación de la Pontificia Universidad Católica de Chile hemos introducido la historia de la química con diferentes *instrumentos, contenidos históricos y metodologías*.

#### *Los instrumentos utilizados: la memoria didáctica y la 'V' heurística*

La *Memoria Didáctica* (MD) es un documento (producto), pero es también el instrumento-estrategia (diario de reflexión y análisis) de producción y transformación de las inferencias, análisis, generalizaciones y propuestas de intervención del profesor. Así, la MD puede aparecer como instrumento para la transformación, es decir, para hacer evolucionar o sus representaciones iniciales acerca de la historia de la ciencia, la evaluación, la ciencia transpuesta, los estudiantes como sujetos, sobre sí mismo, etc. a través de la actividad de reflexión que promovemos al introducir el componente histórico del conocimiento (Sanmartí, 2000).

Del mismo modo, la *'V' heurística de Gowin* ha resultado ser

un instrumento-método estratégico para ayudar a los profesores y profesoras en formación a comprender la estructura y desarrollo del conocimiento profesional y científico y las formas que de producirlo, divulgarlo y transformarlo (Novak y Gowin, 1988). Cuando se utiliza la 'V' como recurso heurístico en una actividad de aprendizaje y de evaluación, se ayuda a los profesionales e investigadores en formación a reconocer la interacción existente entre lo que ellos ya conocen y los nuevos conocimientos que están produciendo. En consecuencia, se centra en la reflexión (metacognición), entendida como conocimiento del sujeto sobre sus propios procesos y, sobre todo, como acceso al control y regulación consciente de la actividad cognitiva desarrollada en la MD.

Esta estrategia de construcción de conocimiento y de evaluación del desarrollo profesional docente se ha aplicado en el pregrado, en la formación continua y en el postgrado de la Facultad de Educación de la PUC desde 1998 a la fecha, en las áreas de ciencias experimentales y matemáticas, además de otras áreas tales como historia, geografía, arte, lengua y literatura, siendo muy valorada por los profesores en formación de las distintas disciplinas. Algunos de los trabajos realizados por el futuro profesorado de ciencia se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Materiales elaborados por profesores de ciencia en formación vinculando la historia de la ciencia con la secuenciación didáctica y la metacognición.

<b>Área científica</b>	<b>Título y contenido histórico trabajado</b>
Química Inorgánica	Historia de la teoría ácido-base y su enseñanza
Química Orgánica	Del carbono a los polímeros vitales
Genética	Aportes para introducir la historia de la genética en la enseñanza secundaria
Ciencias Naturales	La enseñanza de las teorías del origen de la vida
Química General	De Demócrito a Einstein
Química General	¿Cómo enseñar la evolución de la teoría atómica?
Matemática	La historia del "cero". Diseño de unidades didácticas

Además hemos venido desarrollando materiales que sintonizan con los cursos de *modelización didáctica* y *epistemológica* en la formación inicial de profesores de química. El lector podrá encontrar referencias específicas en la bibliografía del capítulo que indicamos más

adelante.

### *Los contenidos sobre historia de la química*

Del mismo modo, hemos favorecido cursos de perfeccionamiento con distintos énfasis y destinatarios, orientando, entre otros, los siguientes temas: orígenes de la química, historia de la teoría ácido-base, la química en las civilizaciones antiguas (Grecia, Roma y Egipto), historia de la química hasta el siglo XVIII, historia de la química desde mediados del siglo XVIII hasta el presente, introducción a la termodinámica y evolución de la teoría atómica. Estos temas, centrales en la química, han experimentado complejas y continuas transformaciones a lo largo de la historia. En consecuencia, el profesorado de ciencias en formación y en ejercicio requiere de una oportuna actualización de su conocimiento profesional.

### *Las metodologías utilizadas*

Para favorecer la comprensión, 'recreación' de los contenidos científicos desde la lectura histórica que propone este modelo de formación, se pensó en una propuesta activa en que los profesores y profesoras diseñaran y experimentaran de manera cooperativa materiales, prácticas experimentales, analogías, guías de observación, guías de campo, entre otros, incorporando la reflexión sobre la historia, la epistemología y la didáctica de las ciencias.

De acuerdo a lo planteado se propone:

1. Explicar historias *contextualizadas*, que pueden ser utilizadas desde un punto de vista didáctico para introducir conceptos, para motivar, para promover actitudes, para relacionar conocimientos de diferentes áreas, para fundamentar actividades interdisciplinarias, para ayudar a concebir unitariamente la enseñanza de diferentes disciplinas (científicas y *no* científicas).
2. Hacer simulaciones o dramatizaciones de situaciones históricas, en las cuales los estudiantes puedan argumentar. Por ejemplo, en el caso de teorías 'rivales', un grupo de la clase será partidario de una teoría, en tanto que otro grupo defenderá las ideas 'opuestas'.
3. Repetir prácticas relevantes, haciendo ver cuáles eran las ideas científicas en el tiempo en que ellas se realizaron, las

posibilidades de interpretación que se tenían y la utilidad experimental de las mismas, superando las limitaciones de un análisis centrado en 'si eran verdad o no lo eran'.

4. Identificar, caracterizar y describir instrumentos antiguos mediante láminas o esquemas obtenidos de reproducciones o de sitios en Internet. Reflexionar sobre los materiales con que fueron elaborados, cómo se divulgaron, qué aportaron, las ideas que suscitaban o las polémicas que generaban, etc.
5. Leer textos históricos expresamente seleccionados (como se hace en la clase de literatura), haciendo ver que los libros siempre se escriben pensando en quien los ha de leer y que reflejan los valores y cultura de una época. Al respecto, no se requiere de grandes fuentes bibliográficas, actualmente se puede acceder a imágenes y textos originales de gran calidad científica.
6. Dar a conocer personajes históricos que permitan comprender a los estudiantes los aspectos humanos de la ciencia y el conjunto de valores (individuales y sociales) en los cuales ella se desarrolla, valores que normalmente no aparecen o se atenúan en los libros de texto. Por ejemplo ¿Siempre se tuvieron recursos para investigar? Si no fue así, ¿cómo se las ingeniaron los científicos?, ¿Qué problemas personales conspiraron para que sus estudios fueran enseñados o divulgados?
7. Mostrar situaciones históricas de crisis y duda que promuevan en los estudiantes entender que el conocimiento científico no es un dogma ni una historia de buenos y malos científicos.
8. Promover el análisis de 'entramados' histórico-políticos, histórico-geográficos, histórico-sociales o histórico-económicos que favorecieron u obstaculizaron el desarrollo y la divulgación de la ciencia, sus problemas, instrumentos, etc. Por ejemplo: ¿por qué predominaron las ideas de Galeno durante tantos siglos?, ¿qué factores influyeron para que Servet fuera acusado de herejía y se quemaran sus libros?

### **A modo de conclusión**

Nuestras propuestas pretenden contribuir a mejorar la calidad del currículo de formación inicial del profesorado de ciencias incluyendo un

componente metacientífico (de reflexión sobre las ciencias desde perspectivas diversas) que favorezca un estilo más reflexivo y autorregulado de enseñar ciencias. Las innovaciones que proponemos requieren opciones institucionales fuertes para replantear los currículos, las estructuras administrativas, los modelos de formación y los significados que se dan a la profesión docente, así como los materiales y actividades de trabajo. Estas propuestas pueden ser implementadas, como se está haciendo en nuestras tres universidades, dentro de las asignaturas tradicionales de didáctica de las ciencias y mediante una oferta opcional o complementaria.

Actualmente estamos trabajando en el diseño de cursos completos centrados en las aportaciones de las metaciencias a la enseñanza de las ciencias y en la elaboración de materiales prácticos para incorporar temas de filosofía, historia de la ciencia y didáctica de las ciencias, de manera integrada, en la formación inicial y continuada del profesorado de ciencias. Al mismo tiempo, continuamos trabajando en la formulación de modelos teóricos para fundamentar estas propuestas. Muchos de nuestros materiales ya han sido publicados y empiezan a ser utilizados en nuestros países.

## **Agradecimientos**

Este trabajo es el producto de la colaboración entre proyectos de formación e investigación financiados por la Pontificia Universidad Católica (Chile), el Ministerio de Planificación y Desarrollo (Chile), la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT, Chile), el Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació (DURSI, Generalitat de Catalunya, España), el Departament de Didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals de la Universitat Autònoma de Barcelona (España), la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad de Buenos Aires (UBACyT, Argentina), la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (ANPCyT, Argentina) y la Fundación Antorchas (Argentina).

## **Referencias**

- ADÚRIZ-BRAVO, A. (2005). *Una introducción a la naturaleza de la ciencia. La epistemología en la enseñanza de las ciencias naturales*. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- ADÚRIZ-BRAVO, A. (2001). *Integración de la epistemología en la formación del profesorado de ciencias*. Tesis doctoral. Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona. En línea: <http://www.tdx.cesca.es/TDX-1209102-142933>

- ADÚRIZ-BRAVO, A. e IZQUIERDO, M. (2005). Utilising the '3P-model' to characterise the discipline of didactics of science. *Science & Education*, 14(1), 29-41.
- ADÚRIZ-BRAVO, A. e IZQUIERDO, M. (2002). Directrices para la formación epistemológica del futuro profesorado de ciencias naturales, en PERAFÁN, G.A. y ADÚRIZ-BRAVO, A. (comps.). *Pensamiento y conocimiento de los profesores. Debate y perspectivas internacionales*, pp. 127-139. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional/Colciencias.
- ÁLVAREZ LIRES, M. (1998). L'histoire des sciences et des techniques dans la formation du professorat. Ponencia presentada en la *Conference on the History of Science and Technology in Education and Training in Europe*, Estrasburgo, Francia.
- ALZOGARAY, R. (2004). *Una tumba para los Romanov*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- ANGULO, F. (2002). *Aprender a enseñar ciencias: Análisis de una propuesta para la Formación Inicial del Profesorado de Secundaria, basada en la metacognición*. tesis doctoral. Barcelona. Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona.
- BARAONA, J. (1994). *Ciencia e historia*. Valencia: Editorial SEC.
- BENSAUDE, B. y RASMUSSEN, A. (eds.) (1997). *La science populaire dans la presse et l'édition. XIX et XX siècles*. París: CNRS.
- BOURDIEU, P. (2003). *El oficio del científico. Ciencia de la ciencia y reflexividad*. Barcelona: Anagrama.
- BROMME, R. (1988). Conocimientos profesionales de los profesores. *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (1), 19-29.
- COPELLO, M.I. (2002) Didáctica: Un compromiso con el conocimiento biológico escolar significativo y relevante para la vida. *Pensamiento Educativo*, 30, 271-294.
- CROMBIE, A. (2000). *Historia de la Ciencia: De San Agustín a Galileo/ 1 Siglos V-XIII* Madrid: Alianza Editorial.
- CUÉLLAR, L.; PÉREZ, R. y QUINTANILLA, M. (2005). La propuesta de Ernest Rutherford en los libros de texto en Colombia: Un análisis desde la historia de las ciencias y la visión de transposición didáctica en ellos. *Actas del VII Congreso Internacional de Enseñanza de las Ciencias*, Granada, España.
- DUSCHL, R. (1997). *Renovar la enseñanza de las ciencias. Importancia de las teorías y su desarrollo*. Madrid: Narcea.
- ECHEVERRÍA, J. (1995). *Filosofía de la ciencia*. Madrid: Akal.
- ESTANY, A. (1993). *Introducción a la filosofía de la ciencia*. Barcelona: Crítica.
- FOUREZ, G. (1998). *La construcción del conocimiento científico*. Madrid: Narcea.
- GRIBBIN, J. (2005). *Historia de la ciencia*. Barcelona: Crítica

- HACKMANN, W. (1985) Instrumentation in the theory and practice of science: scientific instruments as evidence and as aid to discovery *Annali dell' Istituto e museo di Storia della Scienza di Firenze*, 10, 87-115.
- IZQUIERDO, M. (2005). Hacia una teoría de los contenidos científicos escolares. *Enseñanza de las Ciencias*, 23(1), 111-122.
- IZQUIERDO, M. (2000). Fundamentos epistemológicos, en PERALES, F.J. y CAÑAL, P. (eds.). *Didáctica de las ciencias experimentales. Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias*, pp. 11-34. Alcoy: Marfil.
- IZQUIERDO, M. (1995). La función de las fórmulas en la formación y divulgación del conocimiento científico. *Actas de las XIII Jornadas de Historia y Filosofía de la Ciencia*, Vigo, Galicia.
- IZQUIERDO, M. y ADÚRIZ-BRAVO, A. (2005). La enseñanza de los componentes prácticos y axiológicos de los conceptos químicos, en CABRÉ, M.T. y BACH, C. (eds.). *Coneixement, llenguatge i discurs especialitzat*, pp. 325-345. Barcelona: Institut Universitari de Lingüística Aplicada (UPF)/Documenta Universitària.
- IZQUIERDO, M. y ADÚRIZ-BRAVO, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science & Education*, 12(1), 27-43.
- IZQUIERDO, M. y ALIBERAS, J. (2004). *Pensar, actuar i parlar a la classe de ciències. Per un ensenyament de les ciències racional i raonable*. Bellaterra: Servei de Publicacions de la UAB.
- IZQUIERDO, A. e IZQUIERDO, M. (2000). *Oro para la libertad*. Barcelona: Octaedro.
- IZQUIERDO, M., VALLVERDÚ, J.QUINTANILLA, M. y MERINO, C. (2006) Relación entre la Historia y la filosofía de la ciencia II, *Alambique*, pp 78-91, Ed.Graó, España
- KLIMOVSKY, G. (2001). *Las desventuras del conocimiento científico: Una introducción a la epistemología*. Buenos Aires: A/Z Editora.
- LABARRERE, A. y QUINTANILLA, M. (2002). La solución de problemas científicos en el aula. Reflexiones desde los planos de análisis y desarrollo. *Pensamiento Educativo*, 30.,121-138.
- MARANTZ, E. (2000). *El monje en el huerto*. Madrid: Debate.
- MATTHEWS, M. (1994). *Science teaching. The role of history and philosophy of science*. Nueva York: Routledge.
- McCOMAS, W. (ed.) (1998). *The nature of science in science education. Rationales and strategies*. Dordrecht: Kluwer.
- MERINO, C. y QUINTANILLA, M. (2005). Desarrollo de un instrumento de evaluación para discriminar los criterios y categorías del uso de la historia de la ciencia en la enseñanza *Actas del VII*

- Congreso Internacional en Didáctica de las Ciencias, Granada, España.*
- NOVAK, J. y GOWIN, D. (1988). *Aprender a aprender*. Barcelona: Martínez Roca.
- NIETO, A. (2005). *¿Qué ciencia y para qué públicos? Algunas reflexiones entorno al problema de la popularización, sgs XVIII-XX*. (Documento interno). Universitat Autònoma de Barcelona.
- PAPP, D. (1988). *Breve historia de las ciencias*. Buenos Aires: Emecé.
- PELLÓN, I. (2003). *Dalton, el hombre que pesó los átomos*. Madrid: Editorial Nívola.
- PÉREZ, C. (1998). *Sobre un concepto histórico de ciencia. De la epistemología actual a la dialéctica*. Santiago de Chile: Editorial LOM
- PORLÁN, R. y RIVERO, A. (1998). *El conocimiento de los profesores*. Sevilla: Díada.
- QUINTANILLA, M. (2006) Historia de la ciencia, ciudadanía y valores: claves de una orientación realista pragmática de la enseñanza de las ciencias. En: *Educación y Pedagogía*, V (45), Cap.1, 9-24
- QUINTANILLA, M. (2005). Historia de la ciencia y formación del profesorado: Una necesidad irreducible. *Tecné, Episteme y Didaxis*, número extra, 34-43.
- QUINTANILLA, M. (2004). Bases orientadoras para la incorporación de la historia de la ciencia en la formación temprana de profesores de química. Documento interno. Santiago de Chile: PUC.
- QUINTANILLA, M., IZQUIERDO, M. y ADÚRIZ-BRAVO, A. (2005). Avances en la construcción de marcos teóricos para incorporar la historia de la ciencia en la formación inicial del profesorado de ciencias naturales. *Actas del VII Congreso Internacional de Didáctica de las Ciencias*. Granada, España.
- QUINTANILLA, M., SAFFER, G., IZQUIERDO, M. y ADÚRIZ-BRAVO, A. (en prensa). Nicolás Copérnico desde una propuesta realista pragmática de la historia de la ciencia, en QUINTANILLA, M. (ed.). *Historia de la ciencia. Aportes para su divulgación y enseñanza*. Bogotá: Fundación Proideas.
- QUINTANILLA, M., MACEDO, B. y KATZKOWICZ, R. (2005). Ciencia, ciudadanía y valores. *Actas del VII Congreso Internacional de Didáctica de las Ciencias*. Granada, España.
- SAMSÓ, J. (1991). *Ciencias de los Antiguos en al-Andalus*. Madrid: Mapfre.
- SANMARTÍ, N. (2000). El diseño de unidades didácticas, en Perales, F.J. y Cañal, P.(eds.). *Didáctica de las ciencias*

- experimentales. Teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias*, 239 -266. Alcoy: Marfil.
- SHAPIN, S. (1977). Science, nature and control: Interpreting mechanics' institutes. *Social Studies of Science*, 7, 31-74.
- SOLAR, H. y QUINTANILLA, M. (2005). Algunas reflexiones para considerar la historia de la ciencia en la formación inicial y continua del profesorado de matemática. *Actes de la II Jornada sobre la història de Ciència i l'Ensenyament, Societat Catalana d'Història de la Ciència*. Barcelona, España.
- SOLSONA, N. (1997). *Mujeres científicas de todos los tiempos*. Barcelona: Talasa.
- SOLSONA, N. y QUINTANILLA, M. (2005). Reflexions i propostes per al debat educatiu – didàctic entorn a la història de la ciència. *Actes de la II Jornada sobre la història de Ciència i l'Ensenyament, Societat Catalan d'Història de la Ciència*, Barcelona, España.
- URIBE, M. y QUINTANILLA, M. (2004). Aplicación del modelo de Stephen Toulmin al estudio de la evolución del sistema cardiovascular. Ponencia presentada en el *VII Congreso Latinoamericano de Ciencia y Tecnología*, Buenos Aires, Argentina.

## Consideraciones y recomendaciones aportadas en los debates

Tanto las ponencias como los debates posteriores pusieron en evidencia la difícil situación de la enseñanza de la química en el momento actual y las perspectivas de innovación que se están proponiendo en estos momentos. Las aportaciones fueron muy diversas, pero pueden agruparse en torno a algunas ideas que nos parecen importantes porque pueden contribuir a estructurar nuevas propuestas de enseñanza de la química.

### *La Química*

En estos momentos no es una asignatura tan valorada como debería ser si se considera su importancia en la biología moderna, en la nanotecnología, en la nueva ciencia de materiales y en la industria farmacéutica. Sugiere 'artificialidad' y contaminación, en cuanto a su impacto en el mundo y transformación subsiguiente; y dificultad, en cuanto a su impacto en los alumnos y transformación subsiguiente de sus ideas.

### *El Currículo*

El profesor se encuentra atrapado en una grave contradicción: hay muy buenos materiales curriculares, innovadores, que proporcionan materiales didácticos para enfoques que van desde la utilización de los ejemplos cotidianos hasta un tratamiento conceptual muy serio de prácticas experimentales bien diseñadas y relevantes; pero, en general, las innovaciones son difíciles de aplicar, teniendo en cuenta tanto el tiempo que se dedica a enseñar química en la ESO y en el bachillerato como la 'academicidad' de los programas oficiales que aún son los que configuran los libros de texto que las administraciones validan y que por ello, implícitamente, están recomendando a las escuelas.

### *Ciencia, Técnica, Sociedad*

Ha llegado el momento de cambiar los contenidos de química y no sólo la metodología didáctica. Las aportaciones que tienen en cuenta las interacciones entre la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad abren nuevos caminos, que han de consolidarse mediante unos fundamentos teóricos, tanto didácticos como conceptuales. Sin embargo, para que estos cambios lleguen a consolidarse será necesario incidir también en los exámenes oficiales.

### ***Epistemología de la química***

Se destaca las características propias de la química, que no puede ser reducida a la física. La epistemología proporciona al profesor un mejor conocimiento del contenido que ha de explicar y facilita su adaptación a un contexto pedagógico. El enfoque filosófico se concreta en los 'modelos', como representaciones abstractas que han acompañado siempre la tarea experimental de los científicos.

### ***Modelos***

En estos momentos la palabra 'modelo' se aplica a entidades muy diferentes y se constatan hasta 14 categorías diferentes de modelos. Los modelos de 'ácido' y de 'base', por ejemplo, han sido muchos y se han producido importantes cambios epistemológicos al pasar de unos a otros. Por ejemplo, el modelo de Arrhenius incide en el aspecto 'relacional' de ácido-base, que con anterioridad era simplemente una propiedad de algunas sustancias. Es dudoso hasta qué punto el 'corte' es revolucionario o si, al contrario, se puede pasar de unos modelos a otros de manera evolutiva o bien modificando el contexto, las finalidades o las preguntas. No resulta sencillo combinar la enseñanza de la química según una orientación CTS y los modelos abstractos, a menos que éstos se apliquen a situaciones muy contextualizadas o a problemas sociales.

### ***Aprendizaje***

¿Cómo se aprende? Todos los nuevos enfoques que se aplican a comprender la cognición humana son de un interés primordial para nosotros. El énfasis actual en las 'competencias' nos puede ser desfavorable, de nuevo, porque se considera que las competencias básicas (de las cuales dependerían, supuestamente, las demás) son las ciencias y las matemáticas.

### ***Experimentación en química***

La comparación entre dos grupos de alumnos, uno inglés y el otro español, muestra que la experimentación no siempre incide en una mejor comprensión del cambio químico. A los alumnos les resulta muy difícil aceptar que hay oxígeno en el óxido de magnesio, por ejemplo, y aceptan fácilmente que se ha producido una 'transmutación', pero no comprenden el significado de una reacción química. Teniendo en cuenta que la experimentación es imprescindible para que los conceptos químicos tengan sentido, se

han de buscar urgentemente nuevas maneras de interpretarla; la modelización parece ser un camino adecuado.

### ***Substancialización de las propiedades***

El análisis epistemológico de la química muestra que la substancialización de las propiedades es uno de los principales obstáculos para interpretar los cambios químicos. La experimentación, por ella sola, no resuelve este problema, sino que algunas veces incluso lo agrava.

### ***Ideas de los alumnos***

En química, una idea previa que dificulta mucho la comprensión del cambio químico es la 'substancialización de las propiedades', de la que se han ofrecido, de la que se han ofrecido muchos ejemplos, tanto en las ponencias como en los debates. Los alumnos substancializan también los procesos, como por ejemplo la 'interacción con la luz', que da color a los cuerpos, o la energía. Los iones se conciben como 'cosas' que se enlazan, el calor, como un agente activo del cambio. Confunden los metales con el carácter metálico y no tiene sentido, para ellos, que el cloro, por ejemplo, sea un oxidante. Todo ello muestra que las dificultades de aprender química radican en el enfoque inicial frente al cambio químico y que, en gran parte, se dieron también en la historia. La manera de presentar los temas ha de cambiar y los conceptos y términos químicos han de adquirir significado al explicar fenómenos concretos, y no al revés.

### ***Discurso en clase***

Hay un centenar de definiciones de 'modelo' y queda claro que éste es ahora un tema central en Didáctica de las Ciencias. Pero el énfasis debe ponerse en el discurso en el aula, gracias al cual los modelos toman sentido experiencial y dan lugar a lenguajes cada vez más especializados. El discurso en clase permite también diferenciar entre el 'modelo' y las fórmulas y los fenómenos, así como utilizar los modelos como analogía. Para ello se requiere tener experiencia del fenómeno que se 'modeliza' y ser capaz de reconocer en qué es similar y en qué es diferente del modelo. Por ello, en química, el contexto determina en gran parte al modelo. La interacción en clase es esencial para avanzar en este sentido.

### ***Actividad metacognitiva***

El modelo no es sólo una manera de representar el fenómeno sino que también es una manera de pensar. Se ha de impulsar la reflexión que ayude a los alumnos a 'pensar mediante modelos' y no a

'estudiar' los modelos como si fueran una nueva imposición curricular. Representar la molécula de agua mediante tres bolas enlazadas, por ejemplo, no es suficiente para que los alumnos 'piensen mediante átomos'.

### ***Perfil conceptual***

La atención a los 'perfiles conceptuales' se relaciona estrechamente con el discurso en clase, puesto que reconoce que el sentido de la palabra es personal, aunque se estabiliza por la cultura, mediante la comunicación. La aproximación histórica que se ha hecho en el Seminario permite ver que incluso en un concepto aparentemente tan unívoco como 'molécula' se dieron varios perfiles conceptuales en diferentes épocas y también en clase hay una gran variedad de ellos.

### ***PCK, 'Pedagogical Content Knowledge'***

El 'Pedagogical Content Knowledge' reúne conocimiento sobre lo que se ha de enseñar y las diferentes estrategias adecuadas para hacerlo, así como sobre las dificultades específicas a las que se ha de enfrentar el estudiante, como, por ejemplo, sus ideas previas. Es un concepto importante para la formación inicial del profesorado y, en nuestra tradición, corresponde en parte a la 'transposición didáctica' o, según el enfoque más radical al diseño de la actividad científica escolar (ACE).

### ***Formación de profesores***

Los profesores presentan 'modelos para enseñar', que a menudo son modelos que habían sido consensuados por los científicos en otras etapas históricas que se ofrecen a los alumnos para hacer más 'digerible' la química; el problema es que los alumnos no los toman como 'modelos' sino como 'realidad'. Y ocurre también que los modelos acaban siendo, para algunos profesores, algo más que se ha de enseñar. Los profesores jóvenes deciden a veces no enseñar 'modelos químicos' o dejar que los alumnos se los inventen. La formación de profesores ha de hacer ver que un 'modelo' no es sólo una manera de representarse los fenómenos mentalmente sino también una forma de pensar y de actuar: se han de mostrar los aspectos ontológicos, epistemológicos y praxeológicos. Los ejemplos que se proponen han de ser adecuados al modelo, para poder comprender las similitudes y diferencias entre ambos: por ejemplo, hay demasiada distancia entre la electrólisis y su ecuación o entre la molécula de oxígeno representada por dos bolas unidas y su función en la combustión.

### ***Historia de la química***

Es necesaria como ingrediente del PCK, para comprender mejor las interpretaciones diversas del cambio químico, para identificar modelos que resultaron útiles. Con ello, se comprenden mejor los 'perfiles conceptuales' que caracterizan el pensamiento de los alumnos.

### **Recomendaciones finales**

Se manifestó preocupación por la insuficiente presencia de la química en los programas de alfabetización científica. Predomina, en cambio, una percepción negativa de la química, puesto que se habla más de su contribución al deterioro del medio ambiente que de sus aportaciones a la sostenibilidad ambiental. Es necesario hacer un esfuerzo para presentar la química de manera más amable y facilitar a todos su acceso a esta ciencia.

Se confirmó la importancia de contextualizar los conocimientos químicos, tanto teóricos como prácticos. En este sentido, es una aportación interesante el enfoque CTS (Ciencia, Tecnología, Sociedad). Si bien se confirma también la importancia de los modelos en química, se constata que hay aún pocas experiencias de modelización de los fenómenos químicos.

Se tomaron algunos compromisos de futuro:

- Se procurará impulsar programas de química 'en contexto' y la enseñanza de la química según un proceso de 'modelización'. Con ello se pretende evitar que los alumnos se queden a un nivel descriptivo, tanto de los fenómenos como de las teorías.
- Para ello va a ser necesario comprometernos en acciones de formación permanente, para profundizar en los aspectos conflictivos que se han puesto en evidencia.
- Como que la enseñanza de la química en contexto (CTS) y según una estrategia de modelización requiere discurso en clase (una nueva manera de argumentar, nuevos símbolos...) en esta nueva etapa se ha de dar una gran importancia al lenguaje.
- Desearíamos que este debate continuara con la constitución de un Seminario desde el cual poder coordinar investigaciones en didáctica de la química y poner en común las conclusiones de estas investigaciones y de las que se referencian en la bibliografía especializada.

## Asistentes al Seminario

Andrés Acher  
Agustín Adúriz-Bravo  
Luiz Otávio F. Amaral  
Aureli Caamaño  
Sabrina P. Canedo Ibarra  
Beatriz Cantero Riveros  
Regina Civil Sirera  
Digna Couso Lagaron  
Onno de Jong  
Mariona Espinet Blanch  
Lluís Espinós Pla  
Sibel Erduran  
Josep Lluís Estaña  
Mercè Feliu Hurtado  
Roser Franco  
Mercè Izquierdo  
Marc García Vilanova  
Alma Adriana Gómez  
Josefa Guitart Mas  
Anna Marbá Tallada  
Rosa M<sup>a</sup> Melià Avia  
Eduardo Mortimer  
Miquel Padilla Muñoz  
Carles Parejo Farell  
Roser Pintó  
Teresa Prieto  
Maria del Tura Puigvert Masó  
Imma Ros Clavell  
Neus Sanmartí  
Marta Segura Fàbregas  
Núria Solsona Pairó  
Josep M<sup>a</sup> Valls i Casanovas  
Antònia Via Giménez  
Ximena Vildodola  
Mario Quintanilla  
Rod Watson  
Jan Van Driel

## Relatores

Han actuado como relatores en las diferentes sesiones del Seminario, por orden de intervención:

Tura Puigvert / IES Alexandre Satorra

Teresa Prieto / Universidad de Malaga

Rod Watson / King's College, Londres

Mercè Izquierdo / Universitat Autònoma de Barcelona

Núria Solsona / IES Josep Pla

Mariona Espinet / Universitat Autònoma de Barcelona

Inma Ros / Departament de Ensenyament

**Mercè Izquierdo** es doctora en Química Inorgánica y Catedrática en el Departamento de Didáctica de las Matemáticas y de las Ciencias Experimentales. Es autora de varias publicaciones y artículos de investigación y divulgación sobre la enseñanza y el aprendizaje de la química. El objetivo prioritario de su investigación es la elaboración de un marco teórico propio para la enseñanza de las ciencias. Para ello es necesario comprender los condicionantes que imponen los diferentes contextos a la emergencia del conocimiento científico e identificar los que son propios de la escuela. Para alcanzar este objetivo ha dirigido diversos trabajos de investigación, en los cuales ha profundizado en la función del lenguaje especializado y de los símbolos tanto en la historia de las ciencias como en la enseñanza de las ciencias.

**Aureli Caamaño** es doctor en Química por la Universidad de Barcelona. Catedrático de Física y Química de secundaria por el IES Barcelona-Congrés. Ha participado en el desarrollo de proyectos de ciencias (Química Faraday, GAIA, Química Salter) y es autor de varios libros de texto para ESO y Bachillerato. Ha investigado sobre las concepciones de los estudiantes sobre la estructura de la materia y ha participado en múltiples programas de formación del profesorado de ciencias.

**Mario Quintanilla** es doctor en Didáctica de las Ciencias por la Universitat Atònoma de Barcelona. Su principal línea de investigación está vinculada al discurso científico. En este sentido ha publicado artículos de divulgación e investigación relacionados con el discurso profesional del profesor de ciencia, las ideas científicas en los adolescentes, las representaciones de la ciencia y la enseñanza de las ciencias en profesores en formación y profesores en ejercicio.