

DESARROLLO DE UNA UNIDAD DIDÁCTICA: EL ESTUDIO DEL ENLACE QUÍMICO EN EL BACHILLERATO

GARCÍA FRANCO, ALEJANDRA¹ y GARRITZ RUIZ, ANDONI²

¹ Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

² Facultad de Química

Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 México DF

alegfranco@gmail.com

andoni@servidor.unam.mx

Resumen. La planeación y el desarrollo de unidades didácticas es un elemento inmejorable para preparar un conjunto de clases basadas en un enfoque constructivista, dentro del marco de un conocimiento pedagógico del contenido que impacte sobre el aprendizaje de la ciencia. Presentamos los detalles del análisis científico y didáctico, así como la selección de objetivos y las estrategias didácticas y de evaluación para la presentación del tema de «Enlace químico» ante dos grupos de estudiantes. Arribamos a varias conclusiones positivas, incluyendo el mejoramiento del objetivo final de la unidad didáctica, para tratar de llegar a una descripción general del enlace químico en la cual la selección de modelos (covalente, iónico, metálico, residual, etc.) responde a diferentes enfoques de representación del mismo fenómeno electrostático.

Palabras clave. Unidad didáctica, enlace químico, bachillerato, estrategia didáctica, conocimiento pedagógico del contenido.

Development of a didactic unit: The study of chemical bond in the last years of secondary school

Summary. The planning and development of didactic units is an unbeatable element for preparing a set of lessons based on a constructivist approach, within the framework of a pedagogical content knowledge that impacts on science learning. We are presenting the details of the scientific and didactical analysis, also of the selection of objectives, pedagogical and assessment strategies for the presentation of the «chemical bonding» topic to two groups of students. We have reached several positive conclusions that include improvement on the final objective of the didactic unit, trying to reach a general description of chemical bonding in which the selection of models on it (covalent, ionic, metallic, residual, etc.) responds to different approaches of essentially the same electrostatic phenomenon.

Keywords. Didactic unit, chemical bond, high school, didactic strategy, pedagogical knowledge of the content.

INTRODUCCIÓN

La preparación de un solo tema de la clase puede llevar horas a un buen profesor. No se trata únicamente de pasar la vista someramente por algunos libros de texto que traten el tema al que el profesor va a enfrentarse con las y los estudiantes, sino de comprender a fondo las múltiples implicaciones que tiene el aprendizaje de dicho contenido. Y no se trata sólo de aspectos sobre el contenido científico, sino también sobre la aplicación del conocimiento pedagógico del contenido (Shulman, 1986, 1987; Gess-Newsome y Lederman, 1999), con todos sus

recovecos, como la organización y el manejo de la clase, la selección de modelos y estrategias de instrucción, el cuidado del discurso en la clase y las fuentes del conocimiento pedagógico personal (Morine-Dershimer y Kent, 1999), para finalizar con la selección de estrategias de evaluación y valorar el posible éxito o fracaso obtenido durante el tratamiento del tema. El concepto referido se ha denominado en España «conocimiento didáctico del contenido», desde su introducción por Vicente Mellado (1996).

La preparación de clases es una tarea que debe enfrentar diariamente el profesor. Multitud de dudas le asaltan cotidianamente: ¿Qué debo hacer con mis estudiantes para ayudarlos a entender este concepto científico? ¿En qué materiales me puedo apoyar? ¿Qué cuestiones es posible que mis estudiantes sepan ya y cuáles otras serán difíciles para ellos/ellas? ¿Cuál es la mejor manera de evaluar lo que mis estudiantes han aprendido? (Magnusson et al., 1999).

Estos autores señalan que todas esas preguntas y las respuestas que dan cotidianamente los profesores en temas específicos de instrucción no han recibido mucha atención en el campo de la educación en ciencias. Concluyen (p. 127) que «se requiere mucha más investigación para definir el deseado conocimiento pedagógico del contenido empleado en tópicos específicos de ciencia y para examinar su influencia en la práctica de los profesores en situaciones de enseñanza específica». De Jong, Veal y Van Driel (2002) se han referido también a este punto, «no se conoce mucho acerca de la base de conocimientos de los profesores de química con respecto a temas como los de la bioquímica, la tecnología química y la cinética». Sánchez y Valcárcel (2000) nos indican que «para el profesor de ciencias el conocimiento del contenido que va a enseñar está inseparablemente unido con el proceso de cómo enseñarlo». De Jong y Van Driel (2004) tienen diversos trabajos en relación con el conocimiento pedagógico del contenido y el proceso de formación de profesores.

Campanario y Moya (1999) señalan el diseño de unidades didácticas como una de las tendencias más recientes y afortunadas para la enseñanza de la ciencia. Lledó y Cañal (1993, p. 11) apuntan también que «las investigaciones centradas en los medios y materiales didácticos no se han desarrollado, a nuestro entender, con la frecuencia e intensidad que habría sido menester». Por esta razón pensamos que este estudio resulta de importancia.

En este sentido, en esta investigación hemos utilizado el modelo de planificación de unidades didácticas propuesto por Sánchez y Valcárcel (1993), con el empleo de una secuencia de enseñanza constructivista (Driver y Scott, 1996), para el tema de enlace químico, y presentamos algunos resultados de su aplicación en dos aulas de bachillerato. La intención de esta investigación es triple:

– Por un lado, describir con detalle la planificación de una unidad didáctica siguiendo un modelo diseñado, que puede ajustarse a temas diversos como en este caso el enlace químico, de modo que haya una reflexión sobre la complejidad de la tarea a la que se enfrenta diariamente el profesor.

– Utilizar, dentro de este modelo de planeación, una secuencia de enseñanza constructivista que también ha probado ser útil en otros temas tales como la estructura y constitución de la materia, de forma que estas secuencias puedan mirarse como modelos aplicables a distintos contenidos.

– Aplicar la estrategia en dos aulas de bachillerato tratando de dar cuenta de la transformación en las concepciones de los alumnos, haciendo énfasis en aquéllas en las que explícitamente se han seguido las recomendaciones de la literatura.

LAS UNIDADES DIDÁCTICAS Y EL CONOCIMIENTO PEDAGÓGICO DEL CONTENIDO

Sánchez y Valcárcel (1993) han presentado un modelo para la planificación de la enseñanza basado en el diseño de unidades didácticas y, posteriormente, un ejemplo de una unidad sobre el estudio de las disoluciones en la educación secundaria (Sánchez et al., 1997). El modelo de estos autores incluye cinco componentes:

- a) análisis científico;
- b) análisis didáctico;
- c) selección de objetivos;
- d) selección de estrategias didácticas;
- e) selección de estrategias de evaluación.

Cinco componentes señalan también Magnusson y sus colaboradores (1999, p. 97) como parte del conocimiento pedagógico del contenido de los profesores (los hemos ordenado para que concuerden con los cinco componentes anteriores):

- a) conocimientos y creencias acerca del currículo de ciencias;
- b) conocimientos y creencias acerca del entendimiento estudiantil sobre tópicos específicos de ciencias;
- c) orientaciones hacia la enseñanza de las ciencias;
- d) conocimientos y creencias acerca de las estrategias instruccionales para la enseñanza de las ciencias;
- e) conocimientos y creencias acerca de la evaluación en ciencias.

No cabe duda de que ambos temas están compuestos de los mismos cinco elementos, lo que lleva a la conclusión de que la unidad didáctica al estilo de Sánchez y Valcárcel se orienta a desarrollar el conocimiento pedagógico del contenido del profesor que la diseña. Una unidad didáctica es, entonces, un instrumento para desarrollar, de acuerdo con Shulman, «las formas más útiles de representación de estas ideas; las analogías, ilustraciones, ejemplos, explicaciones y demostraciones más poderosas; en pocas palabras, las formas de representación y formulación del tema que lo hace comprensible a otros» (Shulman, 1987, p. 9).

Hemos introducido una estrategia didáctica constructivista, ya que promueve explicitar, en primer término, las concepciones alternativas de los estudiantes, para después promover la discusión que los aliente a extender, desarrollar y cambiar esas ideas, y también a proporcionar experiencias significativas que motiven a los estudiantes a entender las limitaciones de sus explicaciones y motivarlos a modificar su estatus, hasta concluir, en el mejor de los casos, con la aplicación afortunada por parte de los estudiantes de las ideas científicas (Wightman et al., 1987).

El tema de enlace químico nos llamó la atención debido a las pocas referencias reunidas en la base de datos de concepciones alternativas de Duit (2004), la cual en su versión de 1998 (la empleada al inicio de este trabajo en

el año 2001) sólo señalaba cuatro artículos de Peterson y Treagust, uno de Griffiths y Preston (1992) y uno de Taber y Watts (1996). Afortunadamente, aparecieron varios artículos anteriores y posteriores a 1998 que completaron más o menos el panorama de las concepciones alternativas. Podemos remarcar como autores importantes al mismo Taber (1994, 1997a y 1997b, 1998, 1999, 2000a, 2001, 2002a) y a De Posada (1993, 1997, 1999a, 1999b, 2000), así como en menor grado a Furió y Calatayud (1996), Boo (1998), Birk y Kurtz (1999), Barker (2000b), Borsese y Esteban (2001), Nicoll (2001), Coll y Treagust (2001) y Coll y Taylor (2002). Recientemente también apareció un primer artículo de revisión sobre las concepciones alternativas específicas en el tema del enlace químico (Özmen, 2004) y otro de Riboldi y otros (2004).

Vamos a ir detallando nuestra experiencia como docentes de la unidad didáctica sobre enlace químico en cada uno de los cinco puntos mencionados más arriba.

I. ANÁLISIS CIENTÍFICO

Para muchos investigadores, el concepto de *enlace químico* es considerado crucial dentro de la química, ya que de su correcta comprensión depende que el estudiante pueda desarrollar con éxito otras áreas de esta ciencia e incluso de la biología. Dice Linus Pauling (1992, p. 521) explícitamente que «el concepto de enlace químico es el concepto más valioso en química. Su desarrollo en los pasados 150 años ha sido uno de los grandes triunfos del intelecto humano». Ronald Gillespie (1997) califica al enlace químico como una de las seis grandes ideas de la química.

Sin embargo, muchos miembros de la comunidad química son de la idea de Kutzelnigg (1984), quien indica que «el enlace químico es un fenómeno altamente complejo que elude todos los intentos de una descripción sencilla». Una primera conclusión es que el tema del enlace químico resulta ser importante, aunque complejo.

Indican, Sánchez y Valcárcel (1993), que el objetivo del análisis científico es doble: la estructuración de los contenidos de enseñanza y la actualización científica del profesor.

Los temas de enlace químico que se ofrecieron a los estudiantes fueron tomados de DeKock (1987) y del libro de Garritz y Chamizo (1994), con el siguiente orden general de preguntas clave para avanzar hacia las concepciones científicas del enlace (en cursivas, a continuación, seguidas en ocasiones por la mención de las aplicaciones a las que se pretendía llegar):

1. *¿Por qué se unen los átomos?*
2. *¿Qué es la electronegatividad?*
3. *¿Qué es el enlace iónico?*

Las aplicaciones del modelo iónico a las que se pretende llegar son:

- Los cristales iónicos presentan altos puntos de fusión

debido a las fuerzas electrostáticas multidireccionales existentes entre los iones.

- Los cristales iónicos se fracturan al someterlos a altas presiones, pues se forman planos de repulsión iónica.

- Los cristales iónicos no conducen la electricidad (en estado sólido), pero sí lo hacen fundidos, debido a la presencia de iones móviles.

- Los cristales iónicos, cuando se disuelven, conducen la electricidad a través de sus iones disociados.

4. *¿Qué es el enlace covalente?*

Las aplicaciones del modelo covalente a las que se pretende llegar son:

- Las sustancias formadas por moléculas (por supuesto, con enlaces covalentes) pueden disolverse en agua, o no. Ello depende de su polaridad.

- Hay sustancias que, al disolverse en agua, no producen partículas cargadas; es decir, no todas las sustancias están formadas por iones. Por ello no conducen la electricidad, ni sólidas, ni fundidas, ni disueltas.

- Estas sustancias están formadas por moléculas neutras donde se encuentran fuertemente ligados los átomos que las componen, por enlaces dirigidos en una sola dirección.

- Las sustancias moleculares covalentes tienen sus moléculas unidas en estado sólido por fuerzas intermoleculares poco intensas, por lo cual su punto de fusión es bajo. Típicamente, las sustancias moleculares son gases o líquidos a temperatura ambiente. Sólo los sólidos covalentes (diamante, grafito, sílice), con fuerzas multidireccionales, tienen altos puntos de fusión.

5. *¿Qué es un enlace covalente polar?*

6. *¿Qué es el enlace metálico?*

Las aplicaciones del modelo metálico a las que se pretende llegar son:

- Es el que se presenta en los metales, a través de un enlace entre los iones positivos, acomodados en los puntos de la estructura cristalina, y los electrones libres que están deslocalizados sobre todo el cristal.

- Los iones positivos en el enlace metálico forman, por lo general, estructuras de tres tipos: cúbica centrada en las caras, cúbica centrada en el cuerpo y hexagonal de empaquetamiento compacto

- La gran fuerza cohesiva resultante de la deslocalización electrónica es la responsable de la firmeza de los metales.

- La movilidad de los electrones deslocalizados hace a los metales buenos conductores del calor y la electricidad.

– Los metales son dúctiles y maleables porque sus estructuras cristalinas pueden deformarse sin que se formen planos de repulsión iónica.

7. *¿Qué enlaces existen entre las moléculas en un sólido o un líquido?*

Las aplicaciones del modelo de interacciones intermoleculares a las que se pretende llegar son:

– Los compuestos moleculares (con enlaces covalentes) pueden presentar polaridad, la cual se debe a la presencia de zonas con cargas netas positivas y negativas a lo largo de la molécula.

– Estos dipolos eléctricos interactúan unos con otros, formándose con ello una interacción entre dos o más moléculas.

– Esta interacción es la que debe romperse cuando la sustancia funde o ebulle, lo cual ocurre a mayor temperatura conforme más intensas son dichas fuerzas intermoleculares.

8. *¿A qué se debe la solubilidad de las sustancias en otras sustancias?*

Como vemos, la presentación no incluye los aspectos cuánticos del enlace. Se ha demostrado que los alumnos de secundaria y bachillerato no pueden con la abstracción de este tipo de conceptos (De la Fuente et al., 2003; Tsaparlis, 1997). Tsaparlis y Papaphotis (2002) encuentran poco entendimiento real de los temas relevantes de química cuántica en estudiantes del bachillerato griego.

II. ANÁLISIS DIDÁCTICO

Sánchez y Valcárcel (1993) señalan dos indicadores de la capacidad cognitiva del alumno, que es algo crucial para determinar lo que es capaz de hacer y aprender: sus conocimientos previos y el nivel de desarrollo operativo donde se encuentran los alumnos en relación con las habilidades intelectuales necesarias para la comprensión cabal del tema.

1. Concepciones alternativas sobre el enlace químico

Para la búsqueda bibliográfica sobre las concepciones alternativas en el tema del enlace químico recurrimos a cuatro fuentes primarias, dos de ellas de orden general (Duit, 2004; Wandersee, Mintzes y Novak, 1994) y las otras tres específicas de la química (Garnett, Garnett y Hackling, 1995; Barker, 2000a; Taber, 2002).

Las concepciones alternativas de los estudiantes sobre enlace químico, en general, no puede considerarse que se forman fuera del salón de clases, dado el nivel de abstracción de este concepto y que las experiencias de los estudiantes con el enlace químico son muy indirectas, de modo que podemos atribuir las concepciones alternativas de los estudiantes a la forma en la que el tema es

abordado en el salón, a los materiales que se utilicen y, sobre todo, a la representación que el estudiante construya sobre este concepto.

Sin embargo, el concepto de *enlace químico* no ha sido suficientemente estudiado (De Posada, 1999a), en cuanto a las concepciones alternativas que los estudiantes tienen. Taber (1997a) señala que esto puede deberse a la complejidad del tema, a la inexistencia de muchas concepciones alternativas y a la cantidad de conocimiento previo que debe comprenderse para entender este concepto, cuestión que analizaremos en la sección sobre el nivel de desarrollo operatorio.

En estos estudios, se ha encontrado que los estudiantes reconocen sólo dos tipos de enlace como verdaderos: los covalentes y los iónicos. Dado que el marco de trabajo del octeto sólo proporciona un modelo coherente para el enlace iónico y covalente, los estudiantes clasifican los enlaces metálicos, polares y los puentes de hidrógeno como alguna otra cosa distinta de verdaderos enlaces químicos.

Empecemos por detallar las concepciones alternativas más referidas en la literatura, para cada uno de los diversos modelos de enlace químico.

El enlace covalente

Peterson y Treagust (1989) desarrollaron un instrumento de opción múltiple para conocer las concepciones de los estudiantes de bachillerato respecto al tema del enlace covalente, en el que 7 de las 15 preguntas tienen que ver con la geometría molecular. Estos autores resumen las concepciones alternativas estudiantiles en seis conjuntos: polaridad del enlace, forma molecular, fuerzas intermoleculares, polaridad de las moléculas, regla del octeto y estructuras continuas covalentes (Peterson, Treagust y Garnett, 1989).

Dado que el cuestionario utilizado en este estudio se basa, en gran parte, en la teoría de la repulsión de pares electrónicos en la capa de valencia (VSEPR, por sus siglas en inglés) para predecir la geometría molecular y que este tópico está fuera del temario de la institución donde desarrollamos este trabajo, decidimos no considerar las preguntas realizadas por estos autores en la unidad didáctica desarrollada.

Este mismo cuestionario fue aplicado años más tarde por Birk y Kurtz (1999), quienes encontraron que, en el caso de estudiantes de bachillerato, el resultado está muy cerca del nivel estadístico para adivinar las respuestas. Furió y Calatayud (1996) mencionan también toda una serie de dificultades que presentan los alumnos en el tema de geometría y polaridad de las moléculas.

Taber (1997b) encontró que los estudiantes que explican el enlace covalente de acuerdo al marco del octeto, tienden a pensar que, en el enlace covalente, los átomos comparten electrones para obtener capas externas completas. El razonamiento científico de este principio

podría presentarse en términos de minimizar la energía libre, explicado a través de un mecanismo que surge de las interacciones electrostáticas entre las especies que reaccionan (Barker, 2000b; Taber, 2000b). Sin embargo, los estudiantes parecen entender las reacciones químicas en términos de la «necesidad» de los átomos de tener capas completas u octetos.

Taber (2000a) demostró que los estudiantes utilizan diversos marcos de trabajo para explicar el enlace: los átomos se unen para tener capas externas completas, para tener un nivel más bajo de energía, o debido a las atracciones entre partículas cargadas. El autor sostiene que los estudiantes pueden tener marcos de trabajo diferentes que son congruentes y coherentes (en forma de una teoría) y que son utilizados por el estudiante para explicar diferentes fenómenos. En ocasiones se utilizan los diversos marcos de forma simultánea, mientras que otras veces el contexto del problema o pregunta provoca el uso de uno u otro marco (Taber, 2000a). La relevancia de este estudio radica en que, si bien los estudiantes muchas veces aplican diferentes concepciones a un mismo concepto, lo que resulta, en un pensamiento, incoherente, fragmentario y fuertemente influenciado por el contexto, otras veces, los estudiantes pueden tener una serie de concepciones que son cada una de ellas estable y coherente internamente y que puede aplicarse a una diversidad de fenómenos.

Coll y Treagust (2001) encuentran asimismo que el marco de electrones compartidos y la estabilidad de octetos es el de referencia para estudiantes de la enseñanza secundaria y de licenciatura. No obstante, en el caso de estudiantes de posgrado, encuentran un extraño complemento de estos conceptos con otros propios de la teoría de orbitales moleculares.

El enlace iónico

Taber (1994, 1997a, 1997b), ha realizado estudios para entender las concepciones de los estudiantes acerca del enlace iónico, encontrando que explican este enlace de acuerdo a tres conjeturas distintas:

– **La conjetura de la valencia:** la configuración electrónica determina el número de enlaces iónicos que se forman. Por ejemplo, en el caso del cloruro de sodio, la conjetura de la valencia limita el sodio y el cloro a formar un solo enlace iónico puesto que dichos iones tienen una carga de magnitud 1.

– **La conjetura histórica:** los enlaces se forman sólo entre los átomos que aceptan y donan los electrones. De esta manera, se paga un precio por la historia en la que estuvo involucrado el electrón transferido: sólo quedan unidos los iones involucrados en la transferencia electrónica; no existe enlace iónico de éstos con los otros iones de la malla.

– **La conjetura de solamente fuerzas:** los iones interactúan con los demás iones a su alrededor pero no se encuentran unidos por un enlace iónico sino solamente «por fuerzas». Así, se forman dos tipos de enlaces:

uno de ellos iónico, entre los iones involucrados en la transferencia electrónica, y el otro como una fuerza, de magnitud menor, entre los iones de diferentes cargas no involucrados en la transferencia.

Para Taber, el uso de estas tres conjeturas demuestra que existe un marco de trabajo «molecular» para interpretar el enlace iónico. El uso de este marco puede originarse en la forma en la que se enseña el enlace iónico: haciendo énfasis en el proceso de formación de iones y omitiendo o ignorando la estructura cristalina de estos compuestos y las múltiples interacciones multidireccionales existentes entre todos los iones presentes.

Taber (1997b) y Oversby (1996) concluyen que muchos estudiantes de química hacen un énfasis exagerado en el proceso de transferencia electrónica, usan, explícita o tácitamente, una noción de pares iónicos como moléculas (Nelson, 1996) y prestan atención a la irrelevante «historia del electrón» cedido y atrapado.

De Posada (1999) ha encontrado que los conceptos de ion y átomo les parecen muy similares a los alumnos. Explica, además, que una buena parte de los estudiantes se confunde por la manera en la que se representan las fórmulas químicas de los compuestos iónicos, que son equivalentes a aquéllas de los compuestos moleculares. Casi la tercera parte de los alumnos, al pedirles que dibujaran 10 KCl, dibujó moléculas de cloruro de potasio, indicando sus iones en algunos casos, pero unidos por enlaces sencillos. Más de la tercera parte de los alumnos dibujó una red de iones y la otra tercera parte dibujó átomos. Los conceptos de *red* y de *ion* han sido poco asimilados por los estudiantes, por lo que muchas veces resulta más utilizada la estructura molecular para explicar la estructura interna de sustancias simples.

Otro autor que ha contribuido a aclarar las concepciones alternativas estudiantiles en el tema del enlace químico ha sido Boo (1998), aunque sus hallazgos son repetitivos de los de Taber y De Posada.

Riboldi, Pliego y Odetti (2004) acaban de informar de una serie de concepciones alternativas comunes en alumnos de la universidad y preuniversitarios, como las siguientes: átomos de diferentes elementos se unen solamente mediante enlaces iónicos; el enlace iónico es más fuerte que el covalente; los átomos que se unen para formar una molécula permanecen sin modificar en absoluto su estructura interna.

El enlace metálico

De Posada (1993) ha solicitado a los estudiantes que dibujen la estructura interna de un clavo de hierro. Algunos estudiantes dibujan pequeñas láminas o trozos del metal; el resto hace uso de términos como átomos, restos positivos y nube electrónica, partículas y moléculas. Otros, sin embargo, representan los iones positivos sin la nube electrónica, otros más presentan la nube electrónica con átomos neutros. Como vemos, hay una gran diversidad de concepciones.

En otro estudio (De Posada, 1999), ha solicitado a los estudiantes dibujar diez partículas de calcio (Ca). Ninguno de los estudiantes más pequeños dibujó una red, mientras que la mayoría de los estudiantes más grandes dibuja una red compuesta por átomos y sólo una pequeña proporción dibuja una red metálica. En un estudio comparativo (De Posada, 1997), se encuentra que, a pesar de que aproximadamente el 30% de los estudiantes mayores dibujan la estructura del metal de acuerdo con el modelo del mar de electrones en el caso del hierro, solamente un número muy pequeño de estudiantes hace lo mismo en el del calcio.

Como conclusión a este estudio, se encuentra que el enlace metálico no está suficientemente asimilado por los alumnos. Una posible razón es el poco énfasis que sobre el tema encuentran Solbes y Vilches (1991) en los cuarenta y ocho libros de texto que analizan en su estudio. Estos autores plantean que son pocos los textos que adoptan una visión unitaria del enlace y que a ello se deben muchas de las limitaciones didácticas y de los obstáculos epistemológicos con que se encuentran los alumnos.

2. Nivel de desarrollo operatorio

Es muy importante señalar que el tema del enlace químico se ve rodeado de conceptos diversos que deberían ser plenamente comprendidos para entenderlo, entre los que podemos mencionar: átomo, molécula, compuesto, carga y fuerza eléctrica, atracción, repulsión, entre otros. La representación que el estudiante tenga de cada uno de estos conceptos (que se deben estudiar previamente al tema del enlace) puede resultar determinante para la forma en la que se aprende este nuevo concepto.

Concluimos que hay tal multiplicidad de conceptos previos que deben ser comprendidos para iniciar el estudio del enlace químico, que el nivel de desarrollo operatorio de un grupo de treinta alumnos se espera que sea de gran diversidad. Habrá estudiantes que aceptan ya la existencia de átomos y moléculas; sin embargo, otros seguirán pensando en una estructura continua de la materia, o habrá los familiarizados ya con el concepto de carga eléctrica y otros que no han visto interactuar dos cargas opuestas. Con esta diversidad de desarrollos operatorios esperamos una amplitud grande de respuestas.

III. SELECCIÓN DE OBJETIVOS

El objetivo más importante de exponer a dos grupos de treinta estudiantes a los conceptos del enlace químico es lograr, en una buena proporción de ellos y ellas, discutir sus concepciones sobre el tema y reexaminarlas, hasta llevarlos a la conclusión de que algunas de sus representaciones resultan incompletas para explicar la naturaleza y propiedades de las sustancias con diferentes enlaces. Sabemos que este proceso es el principio del cambio conceptual (Posner et al., 1982) y que es un proceso gradual y complejo en el cual la información que llega a los alumnos gracias a la experimentación, la indagación

y la instrucción es usada para enriquecer o reestructurar sus creencias y suposiciones iniciales. En la siguiente sección trataremos de señalar una forma en la que este cambio puede ser llevado al salón de clases.

Aunque se ha señalado (Scott et al., 1994, p. 218) que «no existe un método o ruta instruccional única para enseñar un tema particular desde una perspectiva constructivista», cualquier estrategia debe promover el aprendizaje para la comprensión, es decir, debe inducir a los estudiantes a realizar cambios en sus ideas acerca de cómo funciona el mundo (Dykstra et al., 1992), lo cual implica diferencias importantes frente a los enfoques más tradicionales de la enseñanza. Del mismo modo, se trata de hacer la enseñanza de la ciencia más significativa para los estudiantes y de conferirles responsabilidad sobre su proceso de aprendizaje.

El segundo objetivo, más específico, es que la idea de presentar el enlace químico en primer término como interacción entre partículas cargadas puede proveer de un marco general de trabajo, que permita transitar hacia los diversos modelos existentes para comprender los casos particulares del enlace. El concepto de *interacción*, de acuerdo con Pozo y Gómez Crespo (1998, p. 126), es uno de los esquemas conceptuales sobre los que se asienta el conocimiento científico, ya que permite transitar desde las explicaciones unicasales, es decir, de un solo factor o agente, a las explicaciones de causalidad múltiple, que aceptan la acción mutua entre dos o más factores dentro de un sistema.

Este objetivo incluye otro muy importante: que el alumno concluya que los diversos tipos de enlace son hechos aparentemente diferentes, pero que tienen un carácter electrostático común, es decir, que son diversos modelos aplicables al mismo tipo de fenómeno. Inmediatamente después, debemos lograr incluir la presentación de los tres tipos de enlace principales: iónico, covalente y metálico, así como el tema de las interacciones intermoleculares.

IV. SELECCIÓN DE ESTRATEGIAS PEDAGÓGICAS

No existen suficientes estrategias pedagógicas documentadas; sin embargo, hemos elegido la de Driver y Scott (1996), que Duit (1999) llama *secuencia constructivista de enseñanza* y que fue desarrollada para diversos temas dentro del proyecto Children Learning in Science, CLIS (Wightman et al., 1987).

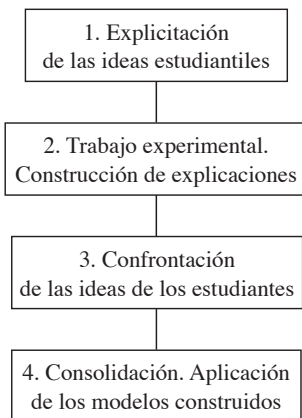
En general, la secuencia de enseñanza comienza con explicitar las ideas de los estudiantes sobre el tema que se va a tratar, después se desarrollan algunas actividades que ayudan a los estudiantes a reestructurar sus ideas y, finalmente, se proveen oportunidades para que los estudiantes revisen y consideren cualquier cambio que resulte en sus concepciones.

Esta secuencia considera alcanzar el cambio conceptual con base principalmente en el conflicto cognitivo: las actividades están fuertemente atadas a las ideas iniciales

de los estudiantes y se van promoviendo discusiones mediante diversas actividades y preguntas que permiten que los estudiantes puedan ir pensando sobre sus ideas para finalmente proveer oportunidades donde se pueda aplicar la teoría científica y en las que los estudiantes puedan ser concientes de lo que han aprendido.

Las fases de nuestra estrategia, acopladas de la de Driver y Scott (1996), fueron las de la figura 1.

Figura 1
Esquema de la estrategia de enseñanza utilizada para el tema del enlace químico.



1. Explicitar las ideas de los estudiantes

La primera parte de esta secuencia consiste en pedir a los estudiantes que contesten, en sesión plenaria, una serie de preguntas acerca de las propiedades de diferentes sustancias y de cómo éstas podrían explicarse en términos de su estructura interna. Las preguntas que se incluyeron fueron las siguientes:

- 1) ¿A qué se debe que las sustancias tengan tan distintos puntos de fusión?
- 2) ¿A qué se deben las fuerzas que mantienen unidas a las partículas que componen las sustancias?
- 3) ¿A qué se debe que algunas sustancias conduzcan la electricidad en estado sólido y otras no?
- 4) ¿A qué se debe que algunas sustancias se disuelvan en agua y otras no?
- 5) ¿Por qué existen sustancias, como el NaCl, que no conducen cuando están sólidas y sí lo hacen cuando están disueltas en agua?
- 6) ¿Será posible que una sustancia no conduzca la electricidad en estado sólido y sí cuando está fundida? ¿Por qué?

El maestro, en ese momento, se encarga de moderar la discusión y de hacer aclaraciones respecto a lo que los

estudiantes indican, sin tratar de cambiar las ideas de ellos, sino, más bien, dando libertad a la expresión de las mismas.

La sección donde los estudiantes hacen explícitas sus ideas es crucial en nuestra secuencia de aprendizaje, no solamente porque, de esta forma, el profesor podrá saber cuáles son las concepciones alternativas más comunes, sino, y probablemente de forma más importante, porque permite que los estudiantes sean concientes de sus propias ideas y que, al escuchar a otro, que tiene alguna idea distinta, puedan negociar y discutir sobre ello. Este es el primer paso para lograr que el discurso de clase tenga las ideas previas de los estudiantes como una referencia indispensable dentro de su estructura.

2. Trabajo experimental indagando sobre las propiedades de las sustancias

Paralelamente, el mismo día, los estudiantes realizan una pequeña investigación experimental en el laboratorio sobre las distintas propiedades de varias sustancias:

- Conductividad eléctrica en fase sólida (se les adelanta que esta propiedad habla de la presencia o no de cargas libres en la estructura).
- Conductividad eléctrica mientras están disueltas (habla de la presencia o no de cargas en disolución).
- Punto de fusión (habla de las mayores o menores fuerzas que hay que vencer para licuar la sustancia).

Se les proporcionan los puntos de fusión de algunas de las sustancias recibidas.

Se les pide que traten de encontrar una explicación para las propiedades de solubilidad y conducción eléctrica de las sustancias sólidas y disueltas en agua (para ello se provee a cada par de alumnos de un diodo emisor de luz con una pila de 9 voltios), contestando la serie de preguntas que fueron formuladas por el maestro en la primera parte de la secuencia. Esta tarea se realiza en parejas y las respuestas son entregadas al profesor.

3. Confrontación de las ideas de los estudiantes

Después de la sesión experimental, durante la segunda clase de la secuencia, las ideas estudiantiles se plasman en acetatos y se discuten con las alumnas y los alumnos. Atendiendo a otra recomendación frecuentemente expresada (Wandersee et al., 1994), se busca naturalidad en el análisis de las ideas estudiantiles, dando el debido respeto y procurándolo en las expresiones de los alumnos alrededor de las ideas de sus compañeros.

Es además importante mencionar que debe tratarse de que las ideas de los estudiantes sean presentadas en términos similares a las de los maestros, ya que, de esta forma, los estudiantes pueden elegir una idea, no solamente en términos de quién la dice, sino más bien basándose en su poder

para explicar un fenómeno determinado (Hewson, 1996). Así mismo, de acuerdo con Hewson y otros (1998), cuando las ideas de los estudiantes son tomadas seriamente en el discurso de la clase, cuando se hace referencia explícita a ellas durante la interacción en el aula, los estudiantes se sienten más cómodos al expresarlas y es posible que ocurra una proliferación de ideas, lo cual sugerirá la necesidad de reducir esta cantidad y de buscar las que son más adecuadas de acuerdo a determinados criterios.

4. Consolidación del modelo científico

La fase de consolidación es muy importante en el desarrollo de nuestra estrategia, ya que, en ella, el conocimiento que ha sido construido puede ser aplicado en contextos diferentes y puede ayudar a resolver nuevos problemas, logrando así una de las condiciones necesarias para el cambio conceptual: la aplicabilidad.

En esta cuarta etapa, que se llevó a cabo en cuatro sesiones en el salón de clase, se promueve la discusión de las ideas estudiantiles y la presentación del modelo científico, en la búsqueda de que los estudiantes disminuyan el estatus de sus concepciones previas o elijan las de otros estudiantes que sean más cercanas a las científicamente aceptadas.

Al activar los procesos de conflicto cognitivo, no se logra de inmediato el cambio conceptual, el cual se sabe hoy que es un proceso pausado; lo que se intenta es lograr una modificación en el estatus de las ideas de los estudiantes. De hecho, las actividades de aprendizaje que se plantean tienen el objetivo de elevar el estatus de determinadas ideas frente a otras y, por lo tanto, pueden involucrar experiencias que no puedan explicarse con sus ideas actuales o encontrar formas en las que piensen acerca de los «problemas» que representan sus ideas (Hewson, 1996). La idea es que los estudiantes puedan, de alguna forma, elegir una idea de entre una variedad de acuerdo con la información que poseen.

La secuencia propuesta por Driver y Scott (1996), y retomada por nosotros en este trabajo, descansa sobretodo en el vehículo del conflicto cognitivo, que permite transitar desde concepciones alternativas hasta la aplicación y uso de ideas más cercanas a las científicas en contextos adecuados, aunque su validez ha sido puesta en tela de juicio (Duit, 1999).

Si los estudiantes son capaces de explicitar sus ideas, de escuchar las ideas de otros, de valorarlas en términos de su poder explicativo, de pensar en otras ideas, de modificar las suyas, podemos decir que están siendo metacognitivos y pensando no sólo con sus ideas sino sobre sus ideas, logrando así promover el cambio conceptual.

Dedicamos parte del esfuerzo de la clase a la aplicación de los modelos de enlace químico (ver la sección de análisis científico) y a la interpretación de las propiedades que mostraron los materiales en la sesión experimental. Se intenta entonces generar, a partir de los fenómenos del laboratorio, una insatisfacción con la explicación que

los alumnos pueden dar, para ir caminando a través de ejercicios, discusiones y preguntas hacia una nueva concepción que permita dar respuestas más satisfactorias a las mismas cuestiones.

El papel del maestro durante esta etapa es crucial, ya que es él quien puede proponer actividades o plantear preguntas que permitan a los estudiantes atender ciertos aspectos problemáticos, o bien quien puede presentar teorías alternativas con posibilidad de ser comparadas con la propia (Driver y Scott, 1996).

Concluimos la sexta sesión con la entrega y discusión de quince preguntas sobre el enlace químico, para que los estudiantes que se hubieran acercado al modelo científico se dieran gusto aplicando sus nuevas ideas para responderlas frente a sus compañeros. En el transcurso de esta última clase se analizó la veracidad o falsedad de las siguientes declaraciones:

- 1) Los cristales metálicos se mantienen unidos debido a atracciones entre iones.
- 2) Los cristales iónicos contienen moléculas en su interior.
- 3) Los enlaces intermoleculares pueden llegar a ser enlaces covalentes.
- 4) Los enlaces covalentes tienen una direccionalidad dada?
- 5) En los cristales covalentes, los átomos se mantienen unidos por enlaces covalentes que forman una red tridimensional.
- 6) En un cristal molecular, los puntos de la malla cristalina están formados por moléculas y las fuerzas atractivas entre ellas son fuerzas intermoleculares de Van der Waals o de puente de hidrógeno.
- 7) La mayor parte de las sustancias orgánicas sólidas están formadas por cristales moleculares.
- 8) Todas las sustancias están formadas por moléculas.
- 9) Todas las sustancias iónicas son solubles en agua.
- 10) Todos los compuestos con enlaces covalentes tienen puntos de fusión relativamente bajos.
- 11) Sólo los metales conducen la electricidad en estado sólido.
- 12) Ningún compuesto covalente conduce la electricidad, sea sólido, fundido o disuelto.
- 13) Los compuestos iónicos siempre cuentan con enlaces multidireccionales.
- 14) Siempre que la temperatura de fusión es elevada existen en las sustancias enlaces multidireccionales.
- 15) Los sólidos moleculares orgánicos son probablemente más solubles en tolueno que en agua.

V. ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN

Para la evaluación de la unidad didáctica, se empleó fundamentalmente un cuestionario que se aplicó a los dos grupos, tanto antes de comenzar el estudio formal del tema como al concluirlo. Algunas de las preguntas se tomaron de los artículos de Posada (1993, 1997) del enlace químico y estructura interna de la materia y que fueron formuladas sobre los siguientes tópicos:

Pregunta 1. Las diferencias y semejanzas que asignan los estudiantes entre las fuerzas intermoleculares y los enlaces intramoleculares.

Pregunta 2. La razón por la que ocurren los enlaces químicos.

Pregunta 3. La razón de las diferencias entre los puntos de fusión de las sustancias.

Pregunta 4. La forma en la que los estudiantes representan distintas sustancias (un grano de sal, un clavo de hierro, un trozo de diamante y una botella que contiene oxígeno).

Además del cuestionario, se utilizaron los registros de los alumnos en las actividades experimentales, así como su participación en las discusiones en el salón de clases. Se procuró una observación cuidadosa del trabajo de los alumnos, de manera que la evaluación no fuese solamente con el objetivo de poner una calificación a los estudiantes, sino tratando de que el proceso de evaluación dé cuenta de las dificultades y avances de los estudiantes a lo largo del proceso de enseñanza-aprendizaje.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La estrategia, como aquí se ha presentado, fue aplicada en dos grupos de primer año de bachillerato (15-16 años), de 29 y 33 alumnos en una institución incorporada a la Universidad Nacional Autónoma de México. Se utilizó el tiempo que regularmente se asigna a la enseñanza de este tema de acuerdo con el currículo planteado. La aplicación se llevó a cabo en seis sesiones de trabajo, cuatro de 100 minutos y dos de 50 minutos.

Para el desarrollo de la investigación, se utilizaron tres instrumentos diferentes:

1) Cuestionario que se aplicó a los dos grupos en los cuales se llevó a cabo, tanto antes como después (dos semanas) de la aplicación de la estrategia.

2) Entrevistas a 4 estudiantes de cada grupo, elegidos al azar, siempre y cuando no tuvieran inconvenientes en participar. Estas entrevistas se llevaron a cabo de manera semiestructurada siguiendo un guión basado en las mismas preguntas propuestas en el cuestionario.

3) Observaciones realizadas en clase, de forma paralela al desarrollo de la estrategia de enseñanza.

Para determinar las categorías de análisis, una vez revisados los cuestionarios, se comenzó un proceso de categorización de las respuestas. Dada la naturaleza abierta del cuestionario, la intención fue tratar de ubicar las que eran más próximas, de forma que pudiéramos tener unas cuantas categorías que explicaran el pensamiento de los estudiantes en torno a este concepto. Una vez hecho este recorte de las respuestas, se trataron de encontrar los elementos más recurrentes y sobre los que se profundiza en las entrevistas y que se apoyan también en las observaciones realizadas.

RESULTADOS

Categorías obtenidas a partir del cuestionario

Los resultados más notables de las pruebas pretest y posttest son los siguientes:

En la pregunta 1, sobre las diferencias y semejanzas entre los enlaces intramoleculares e intermoleculares, lo más notable, antes y después de la intervención educativa es la reducción del porcentaje de alumnos que no contesta, que pasa del 29% al 7%. Los alumnos que sí contestan incrementan las respuestas que marcan que la mayor diferencia entre un enlace intramolecular y uno intermolecular es la magnitud de la fuerza involucrada (pasa de 15,2% a 39,3% en el grupo 1).

Sobre la pregunta 2, que tiene que ver con la razón o causa del enlace, presentamos la tabla 1.

Tabla 1

Respuestas en ambos grupos a la pregunta 2 del cuestionario: «Explica cuál es la razón por la que los átomos se unen para formar sustancias.»

Pregunta 2. Razón o causa del enlace	Grupo 1 % de respuestas		Grupo 2 % de respuestas	
	Pretest	Postest	Pretest	Postest
Estabilidad	13,8	3,4	17,3	10,3
Estabilidad por cargas (equilibrar, neutralizar)	24,3	24,3	20,7	20,7
Estabilidad por tener capas llenas de ocho electrones	17,2	24,1	17,2	31,2
Electronegatividad		13,8		10,3
Otras	34,4	34,4	31,0	27,5
No contesta	10,3		13,8	

Como hemos visto, para el desarrollo de la estrategia, era crucial la comprensión de la causa del enlace. En ambos grupos, tanto en el pretest como en el postest, aparece una variedad importante de respuestas. La estabilidad es la razón que aparece con mayor frecuencia (entre 55% y 60% de las respuestas tanto en el pretest como en el postest); sin embargo, después de la enseñanza se ve un aumento en la explicación que se da para la estabilidad, lo que puede indicar un avance en los estudiantes, en términos de pasar de un conocimiento meramente declarativo a un conocimiento que permita la explicación de las causas. La electronegatividad es una respuesta que aparece solamente en el postest, por lo que podemos inferir que es un concepto que se introduce con la enseñanza y que no queda del todo claro en los estudiantes.

Con relación a la pregunta 3 presentamos la tabla 2.

Como se puede observar, en esta pregunta podemos ver una reducción importante en las categorías que los estudiantes utilizan para explicar la diversidad de los puntos de fusión de las sustancias. En el postest, la gran mayoría de las respuestas, en ambos grupos, se concentran en la categoría de tipo de enlace (más del 60%), aunque un porcentaje menor ubica la direccionalidad como un factor que determina el punto de fusión.

Con relación a la pregunta 4, en la que se pide que describan la estructura interna de algunas sustancias las transformaciones más radicales en las respuestas pretest y postest son las siguientes:

– Estructura interna del cloruro de sodio: es un cubo de iones pasa de 5% a 31%, aunque permanece de 57% a 43% la respuesta de que es un cubo de átomos.

– Estructura interna de un clavo de hierro: pasan de 20% a 34% los alumnos que consideran esta estructura constituida por átomos de hierro unidos entre sí por muchas uniones. Baja notablemente el número de alumnos que no contesta la pregunta, de 75% a 11%.

– Estructura interna del diamante: se eleva de 27% a 70% el porcentaje de alumnos que piensa que está compuesto

por átomos de carbono unidos entre sí. Disminuyen de 35% a 8% los alumnos que no contestan la pregunta.

La comprensión de los estudiantes sobre el enlace químico

Presentamos a continuación algunos aspectos detectados a partir de las entrevistas, las observaciones de clases y los cuestionarios que, al apoyarnos en la literatura, nos dan alguna luz sobre la forma en la que los estudiantes comprenden el concepto de *enlace químico*.

– *La regla del octeto como principio explicativo.* Cuando preguntamos a los estudiantes las causas del enlace químico, la respuesta más común se relaciona con principios relativos a la regla del octeto, ya sea compartir electrones, acomodar electrones, tener una capa externa llena o, explícitamente, tener ocho electrones, en algunos casos con facetas antropomórficas o animísticas como relatan Taber y Watts (1996), por ejemplo: «En el enlace covalente se comparten los electrones porque quieren [sic] o porque piensan que tienen configuración de gas noble y se vuelven estables, eso es lo que es el enlace y los mantiene unidos. Si no hubiera enlace no tendrían configuración de gas noble, y pues no serían estables y pues, quieren ser estables.»

Si bien la regla del octeto es un principio heurístico que funciona para explicar el enlace en la mayoría de las sustancias que se estudian en el bachillerato, no existe en ella, en realidad, ningún principio explicativo, salvo, si acaso, la mentada estabilidad de los átomos de los gases nobles con ocho electrones en su capa de valencia. Una de las razones que Taber (1997a, 1997b, 1999) postula para explicar por qué el principio del octeto es tan poderoso es que es el marco más coherente posible que los estudiantes tienen a la mano.

– *La inexistencia de «moléculas iónicas».* Tuvimos presente la recomendación de no escribir las reacciones de formación de los iones como parte de la explicación del enlace iónico en la presentación ante los grupos de la es-

Tabla 2

Respuestas en ambos grupos a la pregunta 3 del cuestionario: «¿Cuál es el motivo de que las sustancias tengan diferentes puntos de fusión?»

Pregunta 3 Razón de la diversidad en los puntos de fusión	Grupo 1 % de respuestas		Grupo 2 % de respuestas	
	Pretest	Postest	Pretest	Postest
Capacidad calorífica	25,0		20,7	
Fuerzas de cohesión	28,6		20,7	3,4
Fuerza de los enlaces	17,9	31,2	24,2	27,6
Tipo de enlace		44,8	3,4	44,9
Tipo de enlace y direccionalidad		17,2		13,8
Direccionalidad		3,4		
Otras	28,5	3,4	31,0	10,3

trategia didáctica. Afortunadamente, nuestros resultados apuntan a que, en ningún caso, los estudiantes dibujen, en el postest, un par de átomos unidos o nada que se asemeje a moléculas dentro de una red; de hecho, este porcentaje tampoco era muy alto al iniciar la estrategia didáctica (10%), aunque sí es una concepción recurrente informada en la bibliografía (De Posada, 1993; Taber, 1997). Sin embargo, la estrategia planteada tenía como objetivo explícito no escribir el proceso de formación de iones, sino más bien hacer énfasis en la red de iones que se forma y que da a las sustancias con este enlace sus características particulares.

– *La representación adecuada de los metales y de los sólidos covalentes.* En el caso en el que se pedía a los estudiantes dibujar la estructura interna de un clavo de hierro (Fe) y de un diamante (C), hay un aumento muy importante de estudiantes que contestan la pregunta en el postest. Esto nos indica que se ha construido una representación gráfica de la estructura interna de los metales y de los sólidos covalentes. En buena parte de los casos se logra la representación correcta de los metales: «En los metales, en medio hay cationes y alrededor están los electrones.»

– *El punto de fusión y su relación con el enlace. Explicaciones unicasuales.* El punto de fusión de una sustancia es una propiedad que se relaciona con:

- la fuerza del enlace entre cada uno de los átomos que forman la sustancia; y
- la cantidad y direccionalidad de estos enlaces, es decir, la estructura de la sustancia.

Sin embargo, a través de nuestro estudio, podemos dar cuenta de que sólo un porcentaje muy reducido de los alumnos (15%) toma en cuenta ambos factores al explicar a qué se debe que las sustancias tengan puntos de fusión tan diversos. Sus explicaciones son unicasuales.

– *Del conocimiento declarativo al conocimiento explicativo.* Como hemos visto en los resultados, los alumnos transitan desde respuestas meramente declarativas en el pretest (tales como «los átomos se unen por sus cargas» o bien «los átomos se unen para ser más estables» hasta respuestas que contienen algún tipo de explicación para el fenómeno que se les presenta en el postest, por ejemplo, «los átomos se unen, porque al obtener ocho electrones en su última órbita, son más estables» o bien «las partículas cargadas de los átomos, protones y electrones, interactúan provocando la atracción»). Así, aunque no acaba la gran mayoría de asimilar las razones científicas que hay detrás de los enlaces químicos, va utilizando estrategias más racionales en el análisis de los mismos.

CONCLUSIONES

Utilizar el modelo de planificación didáctica (Sánchez y Valcárcel, 1993), considerando también los elementos del conocimiento pedagógico del contenido (Gess-Newsome y Lederman, 1999), ha sido fundamental para

conseguir llevar a cabo una estrategia de enseñanza que toma en cuenta los aspectos que están presentes en el salón de clases cuando se trata de enseñar algún tema en particular.

La estrategia específica de enseñanza ha sido una secuencia constructivista propuesta por Driver y Scott que descansa fuertemente en el análisis y la discusión de las ideas estudiantiles como método de enseñanza-aprendizaje. Es evidente, después de la aplicación de la unidad didáctica, que la estrategia no consigue (o no ha sido detectado) un cambio revolucionario, radical, en las concepciones de los alumnos respecto al enlace químico; sin embargo, también es evidente que existen algunas modificaciones en estas concepciones, que nos dejan pensar que ésta ha sido eficaz en la mejor comprensión de los fenómenos relacionados con el enlace.

Por último, cerramos este artículo con la mención de una conclusión importante de esta intervención educativa: los alumnos no alcanzan a reunir una razón electrostática plausible para explicar los distintos modelos del enlace químico y nosotros, como docentes, no logramos detectarlo a tiempo para incorporar elementos en este sentido en la estrategia didáctica. Tampoco podemos dar referencias de libros de texto que sí intenten cubrir todos los tipos de enlace con un modelo electrostático común que permita racionalizar que los diversos modelos son parte del mismo fenómeno. No conocemos libros de texto con esta característica.

Pudimos darnos cuenta, al final de la estrategia didáctica, que los alumnos tienen (o siguen teniendo, en algunos casos) la idea de que los modelos de enlace químico son explicaciones alternativas, sólo aplicables, cada uno de ellos, a un tipo de sustancia, es decir, que no tienen elementos en común. Solbes y Vilches (1991) han encontrado que es frecuente que los libros de texto aborden cada uno de los modelos de enlace como descripciones reales y correctas más que como aproximaciones con limitaciones inherentes.

Borsese (1991) sostiene que «no debe preocuparnos la diferencia entre la complejidad de los modelos que se utilizan y la realidad que pretenden explicar, sino más bien, hacer que los estudiantes sean conscientes del rol provisorio de los modelos, de su significado y de sus limitaciones» y considera que puede utilizarse un enfoque elemental del enlace químico que se derive a partir de una matriz conceptual única basada en las interacciones coulombianas de atracción. Borsese y Esteban (2001, p. 95) intentan una explicación electrostática aplicable para todos los tipos de enlace. Es bien cierto que éste puede ser un modelo muy simplificado, pero permite explicar de manera cualitativa la tendencia de los átomos a unirse entre sí, lo cual puede ser suficiente para un curso de química básica, porque permite, a través de algunos conceptos (carga nuclear efectiva, ley de Coulomb, núcleo, electrones), interpretar todos los tipos de enlace y, además no interfiere, sino que promueve aprendizajes posteriores más profundos relacionados con este tema, a diferencia de la insistencia en la regla del octeto como explicación al enlace.

Según Taber (1997a), la mejor forma de avanzar en la comprensión del enlace químico en este nivel debe caracterizarse por la construcción de un esquema basado en los principios electrostáticos. Se trata de dar a los estudiantes un marco explicativo que tenga sentido para ellos, que sea poderoso para explicar fenómenos diversos y que no tengan que adoptar uno en el que los átomos quieren y necesitan tener ocho electrones en su última órbita, porque ésa es su naturaleza.

Una cuestión que apunta en el sentido expresado es incluir, en la unidad didáctica, un esquema triangular tipo Van Arkel (1949), al que luego nos han acostumbrado Jensen (1994 a, 1994b, 1995), Laing (1993) y Spencer y otros (1999). En este tipo de diagrama se revela claramente que los enlaces covalentes, iónicos, metálicos y semimetálicos son diferentes modelos extremos entre los cuales existe una enorme diversidad de «grises» representados por los enlaces reales (ver, por ejemplo, la

figura 5.10 de la p. 222 de la traducción al español de Spencer et al., 2000).

Las investigaciones recientes en educación química muestran un interés creciente por hacer énfasis en la comprensión de los conceptos más allá de la memorización de algoritmos o datos (Niaz, 2001). Por ello es fundamental que la enseñanza de conceptos centrales para el estudio de la química, como es el del enlace, tienda a la comprensión del fenómeno, de modo que tenga sentido para los estudiantes que lo aprenden. Por tanto, es importante la decisión de abordar los elementos que son comunes a los diversos modelos de enlace, más allá de hacer una exposición y explicación exhaustiva de las características de cada uno de ellos. De esta manera, se pueden ubicar todos los modelos de enlace bajo un mismo marco conceptual, cuestión que ha permanecido ajena a la enorme mayoría de los libros de texto de química y a la enseñanza en los niveles preuniversitarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARKER, V. (2000a). *Beyond Appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas*. A report prepared for the Royal Society of Chemistry, versión electrónica, pp. 1-79. Consultada el 30 de junio de 2005 en la URL: <<http://www.chemsoc.org/networks/learnnet/miscon.htm>>. Una traducción al español de la segunda edición de este escrito acaba de aparecer con el nombre de casada de la autora, como Kind, V. (2004). *Más allá de las apariencias. Ideas previas de los estudiantes sobre conceptos básicos de química*, p. 157. México: Aula XXI Santillana-Facultad de Química, UNAM.
- BARKER, V. (2000b). Students' reasoning about basic chemical thermodynamics and chemical bonding: what changes occur during a context-based post-16 chemistry course. *International Journal of Science Education*, 22(11), pp. 1171-1200.
- BIRK, J. y KURTZ, M. (1999). Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding. *Journal of Chemical Education* 76(1), pp. 124-128.
- BOO, H. K. (1998). Students' understandings of chemical bonds and the energetics of chemical reactions. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(5), pp. 569-581.
- BORSESE, A. (1991). Una matriz conceptual única para los diversos tipos de enlace químico. *Enseñanza de las Ciencias*, 9(2), pp. 306-307.
- BORSESE, A. y ESTEBAN, S. (2001). Didáctica de la naturaleza de la materia en los diferentes niveles escolares. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 30, pp. 91-97.
- CAMPANARIO, J.M. y MOYA, A. (1999). ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2), pp. 179-192.
- COLL, R.K. y TREAGUST, D.F. (2001). Learners' Mental Models of Chemical Bonding. *Research in Science Education*, 31, pp. 357-382.
- COLL, R.K. y TAYLOR, N. (2002). Mental models in chemistry: senior chemistry students' mental models of chemical bonding. *Chemical Education Research and Practice*, 3(2), pp. 175-184.
- DE JONG, O., VEAL, W.R. y VAN DRIEL, J.H. (2002). Exploring Chemistry Teachers' Knowledge Base, en Gilbert, J.K. et al. (eds.). *Chemical Education: Towards Research-based Practice*, pp. 369-390. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- DE JONG, O. y VAN DRIEL, J.H. (2004). Exploring the development of student teachers' PCK of the multiple meanings of chemistry topics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2, pp. 477-491.
- DE LA FUENTE, A.M., PERROTA, M. T., DIMA, G., GUTIÉRREZ, E., CAPUANO, V. y FOLLARI, B. (2003). Estructura atómica: análisis y estudio de las ideas de los estudiantes (8° de EGB). *Enseñanza de las Ciencias*, 21(1), pp. 123-134.
- DE POSADA, J. M. (1993). Concepciones de los alumnos de 15-18 años sobre la estructura interna de la materia en el estado sólido. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(1), pp. 12-19.
- DE POSADA, J.M. (1997). Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: structure and evolution. *Science Education*, 81(4), pp. 445-467
- DE POSADA, J.M. (1999a). Concepciones de los alumnos sobre el enlace químico antes, durante y después de la enseñanza formal. Problemas de aprendizaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2), pp. 227-245.
- DE POSADA, J.M. (1999b). The presentation of metallic bonding in high school science textbooks during three decades: science educational reforms and substantive changes of tendencies. *Science Education*, 83, pp. 423-447.
- DE POSADA, J.M. (2000). Problemas y soluciones didácticas para abordar el enlace químico. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 26, pp. 95-100.
- DEKOCK, R.L. (1987). The chemical bond. *Journal of Chemical Education*, 64(11), pp. 934-941.
- DRIVER, R. y SCOTT, P.H. (1996). Curriculum development as research: a constructivist approach to science curriculum development and teaching, en Treagust, D., Duit, R. y Fraser, B. (eds.). *Improving Teaching and Learning in Science and Mathematics*, pp. 94-108. Nueva York: Teachers College Press.
- DUIT, R. (1999). Conceptual change approaches in science education, en Schnotz, W., Vosniadou, S. y Carretero, M. (eds.). *Advances in Learning and Instruction Series. New Perspectives on Conceptual Change*, pp. 263-283. Oxford: Pergamon.
- DUIT, R. (2004). *Bibliography STCSE: Students' and teachers' conceptions and science education*. Leibniz Institute for Science Education: Kiel, Germany: IPN. Disponible en <www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/>.
- DYKSTRA, D.I., BOYLE, C.F. y MONARCH, I.A. (1992). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education*, 76(6), pp. 615-652.
- FURIÓ, C. y CALATAYUD, M.L. (1996). Difficulties with the geometry and polarity of molecules. Beyond misconceptions. *Journal of Chemical Education*, 73(1), pp. 36-41.
- GARNETT, P.J., GARNETT, P.J. y HACKLING, M.W., (1995). Students' alternative conceptions in chemistry: a review of research and implications for teaching and learning. *Studies in Science Education*, 25, pp. 69-95.
- GARRITZ, A. y CHAMIZO, J.A. (1994). *Química*. Wilmington, Delaware, EE UU: Addison-Wesley Iberoamericana. Reedición (2001). *Tú y la química*. México: Pearson Educación.
- GESS-NEWSOME, J. y LEDERMAN, N.G. (eds.). *Examining Pedagogical Content Knowledge*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- GILLESPIE, R.J. (1997). The great ideas of chemistry. *Journal of Chemical Education*, 74(7), pp. 862-864.
- GRIFFITHS, A.K. y PRESTON, K.R. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(6), pp. 611-628.
- HEWSON, P.W. (1996). Teaching for conceptual change, en Treagust, D., Duit, R. y Fraser, B. (eds.). *Improving Teaching and Learning in Science and Mathematics*, pp. 131-140. Nueva York: Teachers College Press.
- HEWSON, P.W., BEETH, M.E. y THORLEY, N.R. (1998). Teaching for conceptual change, en Fraser, B.J. y Tobin, K.G. (eds.). *International Handbook of Science Education*, pp. 199-218. Londres: Kluwer Academic Publishers.
- JENSEN, W.B. (1994a). Quantity or quality. *Education in Chemistry*, 31(1), p. 10.
- JENSEN, W.B. (1994b). Bond type versus structure type. *Education in Chemistry*, 31(4), p. 94.
- JENSEN, W.B. (1995). A quantitative van Arkel diagram. *Journal of Chemical Education*, 72(5), pp. 395-398.
- KUTZELNIGG, W. (1984). Chemical Bonding in Higher Main Group Elements. *Angewandte Chemie. International Edition in English*, 23, pp. 272-295.
- LAING, M. (1993). A tetrahedron of bonding. *Education in Chemistry*, 30(6), pp. 160-163.
- LLEDÓ, A.I. y CAÑAL, P. (1993). El diseño y desarrollo de materiales curriculares en un modelo investigativo. *Investigación en la Escuela*, 21, pp. 9-19.
- MAGNUSSON, S., KRAJCIK, J. y BORKO, H. (1999). Nature, Sources and Development of Pedagogical Content Knowledge for Science Teaching, en Gess-Newsome, J. y Lederman, N.G. (eds.). *Examining Pedagogical Content Knowledge*, pp. 95-132. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- MELLADO, V. (1996). Concepciones y prácticas de aula de profesores de ciencias, en formación inicial de primaria y secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(3), pp. 289-302.
- MORINE-DERSHIMER, G. y KENT, T. (1999). The Complex Nature and Source of Teachers' Pedagogical Knowledge, en Gess-Newsome, J. y Lederman, N.G. (eds.). *Examining Pedagogical Content Knowledge*, pp. 21-50. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- NELSON, P.G. (1996). To be a molecule or not to be. *Education in Chemistry*, 33(5), pp. 129-130.
- NIAZ, M. (2001). A rational reconstruction of the origin of the covalent bond and its implications for general chemistry textbooks. *International Journal of Science Education*, 23(6), pp. 623-641.
- NICOLL, G. (2001). A report of undergraduates' bonding mis-

- conceptions. *International Journal of Science Education*, 23(7), pp. 707-730.
- NUSSBAUM, J. y NOVICK, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11, pp. 183-200.
- OVERSBY, J. (1996). The ionic bond. *Education in Chemistry*, 33(2), pp. 37-38.
- ÖZMEN, H. (2004). Some Student Misconceptions in Chemistry: A Literature Review of Chemical Bonding. *Journal of Science Education and Technology*, 13(2), pp. 147-159.
- PAULING, L. (1992) The nature of the chemical bond-1992. *Journal of Chemical Education*, 69(6), pp. 519-521.
- PETERSON, R.F. y TREAGUST, D.F. (1989). Grade-12 Students' misconceptions of covalent bonding and structure. *Journal of Chemical Education*, 66(6), pp. 459-460.
- PETERSON, R.F., TREAGUST, D.F. y GARNETT, P. (1989) Development and application of a diagnostic instrument to evaluate grade 11 and 12 students' concepts of covalent bonding and structure following a course of instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(4), pp. 301-314.
- 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, pp. 211-227.
- POZO, J.I. y GÓMEZ CRESPO, M.A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia*. Madrid: Morata.
- RIBOLDI, L., PLIEGO, O. y ODETTI, H. (2004). El enlace químico: una conceptualización poco comprendida. *Enseñanza de las Ciencias*, 22(2), pp. 195-212.
- SÁNCHEZ, BLANCO, G. y VALCÁRCCEL, PÉREZ, M.V. (1993). Diseño de unidades didácticas en el área de ciencias experimentales. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(1), pp. 33-44.
- SÁNCHEZ BLANCO, G., DE PRO BUENO, A. y VALCÁRCCEL PÉREZ, M.A.V. (1997). La utilización de un modelo de planificación de unidades didácticas: el estudio de las disoluciones en la educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(1), pp. 35-50.
- SÁNCHEZ BLANCO, G. y VALCÁRCCEL PÉREZ, M.V. (2000). Relación entre el conocimiento científico y el conocimiento didáctico del contenido: un problema en la formación inicial del profesor de secundaria. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 24, pp. 78-86.
- SCOTT, P., ASOKO, H., DRIVER, R. y EMBERTON, J. (1994). Working from children's ideas: planning and teaching a chemistry topic from a constructivist perspective, en Fensham, P., Gunstone, R. y White, R. (eds.). *The Content of Science: a constructivist approach to its teaching and learning*, pp. 201-220. Washington: The Falmer Press.
- SHULMAN, L.S. (1986). Those who understand: Knowledge growth in teaching. *Educational Researcher*, 15(2), pp. 4-14.
- SHULMAN, L.S. (1987). Knowledge and teaching: foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), pp. 1-22.
- SOLBES, J. y VILCHES, A. (1991). Análisis de la introducción de la teoría de enlaces y bandas. *Enseñanza de las Ciencias*, 9(1), pp. 53-58.
- SPENCER, J.N., BODNER, G.M. y RICKARD, L.H. (1999). *Chemistry. Structure and dynamics*. Nueva York: John Wiley and sons. Trad. cast. (2000). *Química. Estructura y dinámica*. México: CECSA.
- TABER, K.S. (1994) Misunderstanding the ionic bond. *Education in Chemistry*, 31(4), pp. 100-103.
- TABER, K.S. y WATTS, M. (1996). The secret life of the chemical bond: students' anthropomorphic and animistic references to bonding. *International Journal of Science Education*, 18(5), pp. 557-568.
- TABER, K.S. (1997a). «Understanding Chemical Bonding». Tesis de doctorado no publicada. Inglaterra: Instituto Roehampton, Universidad de Surrey.
- TABER, K.S. (1997b). Student understanding of ionic bonding: molecular versus electrostatic framework? *School Science Review*, 78(285), pp. 85-95.
- TABER, K. S. (1998). The sharing-out of nuclear attraction: or 'I can't think about physics in chemistry'. *International Journal of Science Education*, 20(12), pp. 1001-1014.
- TABER, K. S. (1999). Alternative frameworks in chemistry. *Education in Chemistry*, 36(5), pp. 135-137.
- TABER, K.S. (2000a). Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Science Education*, 22(4), pp. 399-417.
- TABER, K.S. (2000b). What should we tell the pupils about why reactions happen? A Royal Society of Chemistry Teacher Fellowship discussion paper. Consultado de la URL <<http://www.leeds.ac.uk/educol/documents/00001652.doc>>, el 29 de junio de 2005.
- TABER, K.S. (2001). Building the structural concepts of chemistry: some considerations from educational research. *Chemical Education Research and Practice*, 2(2), pp. 123-158.
- TABER, K.S. (2002). *Chemical Misconceptions-Prevention, Diagnosis and Cure*. Londres: Royal Society of Chemistry.
- TSAPARLIS, G. (1997). Atomic and molecular structure in chemical education. A critical analysis from various perspectives of science education. *Journal of Chemical Education*, 74(8), pp. 922-925.
- TSAPARLIS, G. y PAPAPHOTIS, G. (2002). Quantum-chemical concepts: are they suitable for secondary students. *Chemical Education Research and Practice*, 3(2), pp. 129-144.
- VAN ARKEL, A.E. (1949). *Molecules and crystals*. Londres: Butterworths.
- WANDERSEE, J., MINTZES, J. y NOVAK, J. (1994) Research on alternative conceptions in science, en Gabel, D. (ed.). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, pp. 177-210. Nueva York: MacMillan Publishing Company.
- WIGHTMAN, T., JOHNSTON, K. y SCOTT, P. (1987). *Children's learning in science project (CLIS). Approaches to teaching the particulate theory of matter*. Leeds, Inglaterra: Centre for Studies in Science and Mathematics Education, Universidad de Leeds.

[Artículo recibido en agosto de 2003 y aceptado en julio de 2005]